6С4
Н63
УДК 621.791

Николаев Г. А. и др.

Н63 Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. Учеб. пособие для машиностроит. вузов. М., «Высш. школа», 1971.
760 с. с илл.

Перед загл. авт.: Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров.

В книге изложены основные вопросы по прочности и расчету сварных соединений и конструкций, сварочным напряжениям и деформациям, технологии производства сварных конструкций и др.

Приведено большое количество примеров конструктивных решений. Методика расчета сварных конструкций также иллюстрирована примерами.

3—2—5
62—70

6С4

Рецензенты: кафедра «Оборудование и технология сварочного производства» Ростовского-на-Дону института сельскохозяйственного машиностроения; проф., докт. техн. наук Д. И. Навроцкий.

Георгий Александрович Николаев
Сергей Александрович Куркин
Виталий Александрович Винокуров

«РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ»

Редактор *М. Т. Самсонова*
Художник *А. Т. Яковлев*
Художественный редактор *Т. А. Дурасова*
Технический редактор *Н. А. Битюкова*
Корректор *Г. А. Чечеткина*

Т—16317. Сдано в набор 22/I 1970 г. Подп. к печати 23 X 1970 г. Формат 60×90¹/₁₆. Объем 47,5 печ. л. Уч.-изд. л. 41,66. Изд. № ОТ-85/67. Тираж 20 000 экз. Заказ 823. Цена 1 р. 56 к.

План выпуска литературы издательства „Высшая школа" (вузы и техникумы) на 1970 г. Позиция № 62

Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14.
Издательство „Высшая школа"

Типография им. Анохина
Управления по печати при Совете Министров КАССР
г. Петрозаводск, ул. „Правды", 4

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая книга является учебным пособием по нескольким дисциплинам специальности 0504 «Оборудование и технология сварочного производства».

В учебном пособии изложены основные вопросы прочности и расчета сварных соединений и конструкций, сварочных напряжений и деформаций, технологии производства сварных конструкций, входящие в программы дисциплин «Сварные конструкции» и «Технология производства сварных конструкций». Некоторые главы освещают вопросы, изучаемые на старших курсах в дисциплине «Специальные главы сварных конструкций».

Авторы стремились изложить материал книги с учетом последних исследований прочности сварных соединений и новейшего опыта производства сварных конструкций как у нас в стране, так и за рубежом.

В учебном пособии использованы материалы научных исследований, проведенных на кафедре «Машины и автоматизация сварочных процессов» МВТУ им. Баумана, а также в других организациях.

Главы I, II, IV, V, VIII, X, XIV, XV, XVII (кроме § 7), XVIII (кроме § 15), XIX, XXI, а также § 1 и 2 главы XIII, § 1 главы XXIII написаны Г. А. Николаевым.

Главы III, XVI, XX, XXII, XXIII (кроме § 1), XXIV, а также § 2 главы XII, § 3 и 4 главы XIII, § 7 главы XVII, § 15 главы XVIII написаны С. А. Куркиным.

Главы VI, VII, IX, XI, XII (кроме § 2) написаны В. А. Винокуровым.

ГЛАВА I

ВВОДНАЯ

Сварка является одним из наиболее прогрессивных методов обработки металлов и неметаллических материалов.

Впервые в 1882 г. талантливый русский изобретатель Н. Н. Бенардос предложил способ соединения и разделения металлов непосредственно действием электрического тока с применением угольной дуги. Этот способ сварки угольной дугой носит его имя. В 1888—1890 гг. горный инженер Н. Г. Славянов разработал метод электрической сварки металлов металлическим электродом.

Широкое развитие дуговая сварка металлов получила лишь после Великой Октябрьской социалистической революции.

С 1932 г. применение сварки вместо клепки в конструкциях стало не только рекомендованным, но и обязательным в ряде объектов строительных конструкций. С этого же периода научно-исследовательские институты начали проводить работы по созданию электродов высокого качества.

Со второй половины 30-х годов сварка получила новое широкое применение в различных отраслях машиностроения: на автомобильных заводах в Москве и Горьком, при изготовлении всевозможных деталей и узлов машин на Ново-Краматорском заводе и др.; в энергомашиностроении (Металлический завод в Ленинграде); при сооружении строительных конструкций. В эти же годы в СССР было сооружено несколько сварных железнодорожных мостов.

С 40-х годов в СССР в результате деятельности Института электросварки АН УССР в первую очередь его основателя Е. О. Патона (именем которого назван Институт), а также других организаций начинается успешное применение в промышленности автоматической и полуавтоматической сварки под слоем флюса, которое сыграло выдающуюся роль сначала в период Великой Отечественной войны при создании вооружения, а позднее в деле широкого внедрения передовых методов сварки во всех отраслях народного хозяйства. С этого же времени получа-

ют распространение сварные конструкции не только из углеродистых, но и из различных легированных сталей, а также из сплавов цветных металлов в наиболее ответственных машиностроительных и строительных конструкциях, работающих при статических и динамических нагрузках при низких и высоких температурах.

Замечательными достижениями советской техники, отмеченные Ленинскими премиями, являются созданные силами Института электросварки имени Е. О. Патона и разработанные на ряде заводов методы индустриального изготовления сварных листовых конструкций (резервуаров и т. д.); электрошлаковая сварка, сыгравшая большую роль в развитии советского тяжелого машиностроения; разработанный несколькими организациями способ сварки в среде углекислого газа, а также метод контактной сварки с непрерывным оплавлением.

В 50-е годы получили развитие различные автоматические и механизированные методы сварки. Непрерывно расширяется метод сварки под слоем флюса. За последнее десятилетие в СССР значительных успехов достигло развитие методов сварки в среде аргона плавящимся и вольфрамовым электродами, в среде углекислого газа, электрошлаковой, а также автоматизированных методов контактной сварки. В СССР внедряются новые сварочные процессы: холодная сварка, сварка трением, сварка токами высокой частоты, ультразвуковая сварка, вибронаплавка, электроннолучевая и диффузионная сварки, сварка взрывом, различные процессы пайки металлов и сплавов и др.

Развитие сварочной техники происходило в СССР параллельно с развитием науки о сварке. В настоящее время в СССР над изучением основных проблем сварочной техники работает сеть научно-исследовательских институтов, вузов и заводских лабораторий.

Решениями XXI и XXII съездов КПСС принята грандиозная программа нового технического вооружения промышленности и поставлены перед сварщиками новые задачи исключительной важности.

Значительно увеличивается объем производства сварных конструкций во всех областях техники, особенно в машиностроении. В 1965 г. сварено всего 25 *млн. т* конструкций, из них: в промышленности — 15 млн. *т*, в строительстве — 7,6 млн. *т*. За семилетие уровень механизации сварочных работ вырос более чем в 4 раза по сравнению с 1958 г.; уровень механизации наплавочных работ достиг 42%, а объем производства сварочного оборудования увеличился в 5 раз; в 2,5 раза вырос выпуск инженеров и техников по сварочному производству. Значительное развитие получила наука о сварке.

Созданы комбинированные изделия из проката, отливок и поковок, соединяемые различными методами сварки, главным

образом электрошлаковым. Используются всевозможные стали, сплавы из цветных металлов, расширяется применение листового проката, гнутых и штампованных профилей, максимально индустриализуется производство изделий.

Большое внимание уделено расширению выпуска электросварочного оборудования: дуговых автоматов для сварки под слоем флюса, в среде защитных газов и т. д., контактных машин, оборудования для сварки новыми методами на основе их типизации.

Значительно возрос уровень автоматизации сварочных работ: в среднем 40% всех сварочных работ в промышленности, 20% в строительстве и 100% при изготовлении труб выполняются автоматами. Реконструирована база производства электродов и флюсов, значительно увеличен объем применения наплавочных работ, организованы показательные заводы и цехи.

Согласно решениям XXIII съезда КПСС и постановлению Правительства объем производства сварных конструкций в 1970 г. возрастет в 1,5 раза по сравнению с 1965 г. При этом автоматизация сварочных работ составит в среднем 51,5%, из них 60% по промышленности и 32% по строительству.

Прогрессивные методы сварки возрастут в 1970 г. по сравнению с 1965 г.: в среде защитных газов в 1,5 раза; электрошлаковой в 1,5 раза; контактной и дуговой под флюсом в 1,2 раза. Создаются центросвары и центрорезы для централизованного изготовления типовых узлов конструкций. Особенно важной задачей является освоение сварки прочных сплавов с пределом текучести 150 *кГ/мм*^{2} и выше, что позволит достигнуть значительной экономии проката, а также особо чистых металлов (медь, никель, железо), тугоплавких металлов и сплавов (ниобий, вольфрам, тантал).

На рис. 1-1 и 1-2 приведены примеры сварных конструкций, выполненных в СССР и за рубежом.

Сварные конструкции обладают многими преимуществами по сравнению с клепаными. Применение сварки, по сравнению с клепкой, в конструкциях из малоуглеродистых сталей позволяет получить экономию металла: 10÷20% в стропильных фермах, 15÷20% в кранах, 15÷25% в сосудах. Снижение стоимости сварных изделий, по сравнению со стоимостью клепаных, происходит в результате уменьшения веса сварных конструкций и трудоёмкости изготовления. Оборудование сварочных цехов проще и дешевле, чем клепальных.

При производстве резервуаров, котлов, вагонов-цистерн, трубопроводов, а также и в судостроении имеет исключительно большое значение возможность получения плотных соединений. При замене клепки сваркой создаются условия бесшумного процесса, что очень важно в вопросах охраны труда и техники безопасности. Перечисленные выше преимущества сварки перед

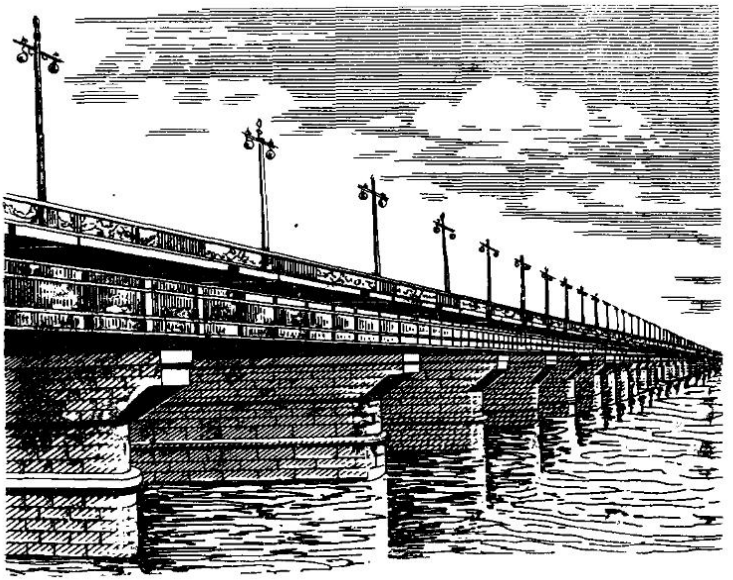


Рис. 1-1. Балочное неразрезное пролетное строение моста им. Е. О. Патона через Днепр в Киеве

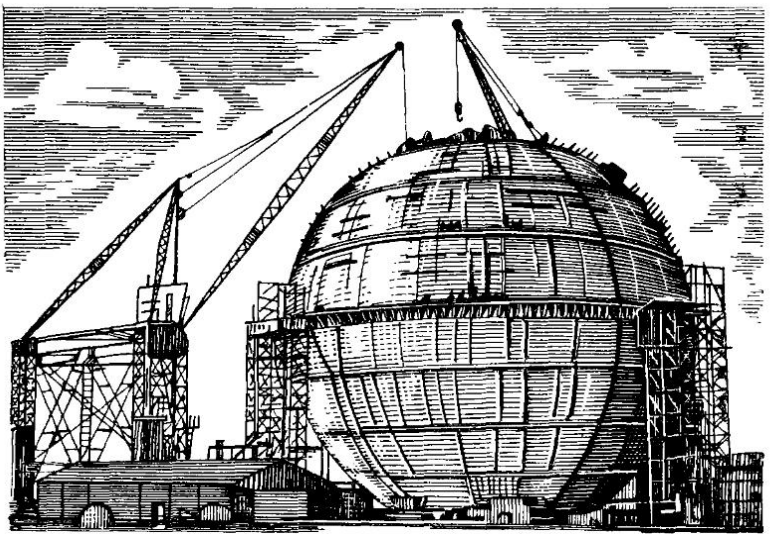


Рис. 1-2. Атомный реактор в Донрейе

клепкой позволили в настоящее время совершенно вытеснить клепку конструкций почти во всех областях техники.

Несмотря на значительные успехи в развитии литейной технологии, сварные конструкции по сравнению с литыми обладают важными преимуществами: уменьшается вес изделий в обработанном виде (чистый вес); при переводе стальных литых изделий на сварные конструкции уменьшение веса иногда достигает 30%, при переводе чугунных — 50÷60%. Это происходит вследствие того, что размеры литых конструкций часто зависят не только от прочности и жесткости, но и от условий производства литья; уменьшаются припуски на механическую обработку. Изделия после отливки весьма часто подвергаются механической обработке, и отход металла бывает значительным.

В сварных конструкциях указанные потери металла почти отсутствуют, обеспечивается получение высоких механических свойств. В литых изделиях при недостаточно хорошо отработанном технологическом процессе возникают поры, усадочные раковины. По этой причине многие рамы под машины, рамы тележек, корпуса редукторов и т. п., ранее изготовлявшиеся литыми, в настоящее время свариваются.

Капитальные затраты на оборудование сварочных цехов меньше, чем на оборудование литейных. В особенности дорого оборудование сталелитейных цехов. Сварные конструкции экономичнее и целесообразнее литых при индивидуальном и мелкосерийном производстве, а также в конструкциях, имеющих сложные геометрические формы, когда в процессе литья возникают затруднения. Но сварные конструкции уступают литым в экономичности при отливке изделий простых геометрических форм и при крупносерийном и массовом производстве.

Сварные конструкции позволяют рационализировать форму поковки, так как сваркой можно заменить одну сложную поковку большого габарита сочетанием двух или нескольких простых поковок или сочетанием поковки с прокатным элементом.

Высокая производительность сварочного процесса, хорошее качество сварных соединений и экономичное использование металла способствует тому, что сварочная техника стала ведущим технологическим процессом при изготовлении металлических конструкций всех видов.

ГЛАВА II

МАТЕРИАЛЫ

§ 1. СОРТА СТАЛЕЙ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Для сооружения металлических сварных конструкций применяют различные виды стального проката.

Углеродистые стали обыкновенного качества (кипящие, полуспокойные, спокойные) поставляются согласно требованиям по механическим свойствам и химическому составу.

Согласно ГОСТ 380 — 60 стали разделяют на три группы:

группа А — сталь, поставляемая по механическим свойствам;

группа Б — сталь, поставляемая по химическим свойствам;

группа В — сталь, поставляемая одновременно по механическим и химическим свойствам.

Выбор способа производства стали марки А (мартеновский, конверторный, бессемеровский) предоставляется заводу при условии, если механические свойства удовлетворяют требованиям табл. 2.1. В стали, поставляемой по группе Б, указывается способ плавки, при этом должны быть удовлетворены требования химического анализа, указанные в табл. 2.2 соответственно для мартеновской и кислородно-конверторной или бессемеровской плавок.

Сталь группы В маркируется буквой «В». Для этой стали должны гарантироваться механические свойства и химический состав. Эта сталь является более дорогой, по сравнению со сталью групп А и Б, и рекомендуется для наиболее ответственных сварных конструкций.

Номер марки углеродистой стали характеризует содержание в ней углерода. Чем выше номер, тем больше углерода содержится в стали. К стали предъявляются требования по пределу прочности $\sigma_в$ *кГ/мм*^{2}, пределу текучести $\sigma_т$ *кГ/мм*^{2}, величине относительного удлинения δ % при разрыве во время испытания коротких и длинных образцов, а также требования по содержанию C, Mn, Si и по предельно допустимому количеству примесей S и P.

Таблица 2.1

Механические свойства углеродистых сталей (ГОСТ 380 — 60)

Марка стали	Предел текучести по разрядам толщины проката, *кГ/мм²*, не менее			Предел прочности, *кГ/мм²*	Относительное удлинение, %, не менее		Испытание на загиб на 180° в холодном состоянии (*s* — толщина образца, *d* — диаметр оправки)
	1	2	3		δ_{10}	δ_5	
Ст. 0	—	—	—	Не менее 32	18	22	$d=2s$
Ст. 1, Ст. 1 кп	—	—	—	32—40	28	33	$d=0$
Ст. 2, Ст. 2 кп	22	20	19	34—42	26	31	$d=0$
Ст. 3 кп	24	22	21	38—40 41—43 44—47	23 22 21	27 26 25	$d=0{,}5s$
Ст. 3	24	23	22	38—40 41—43 44—47	23 22 21	27 26 25	$d=0{,}5s$
Ст. 4, Ст. 4 кп	26	25	24	42—44 45—48 49—52	21 20 19	25 24 23	$d=2s$
Ст. 5	28	27	26	50—53 54—57 58—62	17 16 15	21 20 19	$d=3s$

Примечание. δ_{10} относится к испытанию длинных образцов, у которых $l = 10\,d$; $l = 11{,}4\,\sqrt{f}$, где d — диаметр образца круглого поперечного сечения; l — длина образца; f — площадь прямоугольного поперечного сечения. Размеры образцов стандартизированы.

Стали мартеновские, как правило, предпочтительнее бессемеровских. Однако при специальной обработке качество бессемеровских значительно повышается. Спокойные и полуспокойные стали менее склонны к хрупким разрушениям, нежели кипящие,

Таблица 2.2

Химические свойства углеродистых сталей (ГОСТ 380 — 60)
(содержание элементов в процентах)

Марка стали		C	Mn	Si в сталях			P	S
				кипящей	полуспокойной	спокойной	не более	
Мартеновская и конверторная сталь								
М Ст. 0,	К Ст. 0	Не более 0,23	—	—	—	—	0,070	0,060
М Ст. 1,	К Ст. 1	0,06—0,12	0,25—0,50	Не более 0,05	0,05—0,15	0,12—0,30	0,045	0,055
М Ст. 2,	К Ст. 2	0,09—0,15	0,25—0,50	Не более 0,07	0,05—0,15	0,12—0,30	0,045	0,055
М Ст. 3,	К Ст. 3кп	0,14—0,22	0,30—0,60	Не более 0,07	—	—	0,045	0,055
М Ст. 3пс,	К Ст. 3пс	0,14—0,22	0,40—0,65	—	0,05—0,15	—	0,045	0,055
М Ст. 3сп,	К Ст. 3сп	0,14—0,22	0,40—0,65	—	—	0,12—0,30	0,045	0,055
М Ст. 4,	К Ст. 4	0,18—0,27	0,40—0,70	Не более 0,07	0,05—0,15	0,12—0,30	0,045	0,055
М Ст. 5	К Ст. 5	0,28—0,37	0,50—0,80	—	0,05—0,15	0,15—0,35	0,045	0,055
Бессемеровская сталь								
Б Ст. 0		Не более 0,14	—	—	—	—	0,090	0,070
Б Ст. 3		Не более 0,12	0,25—0,55	Не более 0,07	0,05—0,15	0,12—0,35	0,080	0,060
Б Ст. 4		0,12—0,20	0,35—0,55	Не более 0,07	0,05—0,15	0,12—0,35	0,080	0,060
Б Ст. 5		0,17—0,30	0,50—0,80	—	0,05—0,15	0,12—0,35	0,080	0,060

лишенные Si, а потому их рекомендуют для ответственных сварных конструкций.

Низколегированные конструкционные стали обладают повышенными механическими свойствами и стойкостью против коррозии при хорошей свариваемости.

В строительных конструкциях применяют марки низколегированных сталей: 15ХСНД, 10ХСНД, 10Г2СД, 15ГС, 14Г2, 09Г2С, 19Г и др. Механические свойства и химический состав низколегированных сталей, применяемых в отечественной практике, приведены в табл. 2.3. В последние годы получены соединения высокого качества при сварке бессемеровских сталей, а также малоуглеродистых термически обработанных сталей.

В машиностроении применяют низко- и среднелегированные закаливающиеся стали, обладающие повышенной прочностью, например, 25ХГСА, 30ХГСА, 30ХГСНА; высокопрочные — ВКС-1, ВЛ1Д; аустенитные нержавеющие — 1Х18Н9, 1Х19Н9Т, 1Х18Н9Ф, Х20Н12; жаростойкие, жаропрочные сплавы и т. п.

В СССР непрерывно ведутся работы по созданию высокопрочных сталей с высоким пределом прочности и текучести.

Основным способом повышения механических и улучшения технологических свойств низколегированных сталей, указанных в табл. 2.3 и других, например, 16ГС, 15ГФ, 10Г2С1 и т. д., является их термическая обработка — закалка с последующим отпуском, $\sigma_т$ повышается при этом на 20—40%. Стоимость термической обработки 1 $т$ стали составляет около 6—8 руб., т. е. 5—8% от стоимости горячекатаной стали.

Таким образом, термическая обработка для повышения механических свойств стали более рентабельна, нежели легирование сталей со значительным содержанием дорогостоящих добавок. Экономическая эффективность применения сталей повышенной прочности, по сравнению с обычной углеродистой, например Ст. 3, определяется соотношением

$$\frac{C_{пк}}{C_у} \cdot \frac{\sigma_{т\,у}}{\sigma_{т\,пк}},$$

где $C_{пк}$ и $C_у$ — стоимость единицы веса стали повышенной прочности и углеродистой;

$\sigma_{т\,пк}$ и $\sigma_{т\,у}$ — пределы текучести соответствующих сталей.

Чем меньше это отношение, тем эффективнее применение сталей повышенной прочности. Экономические расчеты показали, что применение сталей марок 14Г2 и 15ГС рентабельно, по сравнению со сталью Ст. 3, для растянутых, изгибаемых и для сжатых при небольшой гибкости элементов. Применение сталей 15ХСНД и 10ХСНД целесообразно главным образом для растянутых и сжатых при небольшой гибкости элементов, в изгибаемых же элементах стали этих марок не всегда выгодны. Стали повышенного качества применяют в тонкостенных трубах.

Таблица 2.3

Механические свойства и химический состав (в %) низколегированных сталей (ГОСТ 5058 — 65) горячекатаных

Марка стали	Толщина проката, *мм*	Предел прочности при растяжении $\sigma_в$, *кГ/мм²*	Предел текучести $\sigma_т$, *кГ/мм²*	Относительное удлинение δ_5, %	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
								не более		
14Г	4—10	46	29	21	0,12—0,18	0,17—0,37	0,70—1,00	0,30	0,30	0,30
19Г	4—10	48	32	22	0,16—0,22	0,17—0,37	0,80—1,15	0,30	0,30	0,30
19Г2	4—20	45	31	21	≤0,12	0,17—0,37	1,40—1,80	0,30	0,30	0,30
	21—32	45	30	21						
14Г2	4—10	47	34	21	0,12—0,18	0,17—0,37	1,20—1,60	0,30	0,30	0,30
	11—32	46	33	21						
18Г2	8—10	52	36	21	0,14—0,20	0,25—0,55	1,20—1,60	0,30	0,30	0,30
12ГС	4—10	47	32	26	0,09—0,15	0,50—0,80	0,80—1,20	0,30	0,30	0,30
16ГС	4—10	50	33	21	0,12—0,18	0,40—0,70	0,90—1,20	0,30	0,30	0,30
	11—20	49	32	21						
	21—32	48	30	21						
17ГС	4—10	52	35	23	0,14—0,20	0,40—0,60	1,00—1,40	0,30	0,30	0,30
	11—20	50	34	23						
09Г2С	4—10	50	35	21	≤0,12	0,50—0,80	1,30—1,70	0,30	0,30	0,30
	11—20	48	33	21						
	21—32	47	31	21						
10Г2С1	4—10	52	38	21	≤0,12	0,90—1,20	1,30—1,65	0,30	0,30	0,30
	11—20	51	36	21						
	21—32	50	35	21						

15ГФ	4—10	52	38	21						
	11—20	52	36	21	0,12—0,18	0,17—0,37	0,90—1,20	0,30	0,30	0,30
	21—32	48	34	21						0,05—0,10
14ХГС	4—10	50	35	22	0,11—0,16	0,40—0,70	0,90—1,30	0,50—0,80	0,30	0,30
15ХСНД	4—10	50	35	21	0,12—0,18	0,40—0,70	0,60—0,90	0,60—0,90	0,30—0,60	0,20—0,48

Таблица 2.4

Стали повышенной и высокой прочности

Марка стали	Химический состав, %							Механические свойства при растяжении		
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Zr	B	$\sigma_в$, кГ/мм²	$\sigma_т$, кГ/мм²	δ_0, %
								не менее		
N—A—XTPA—80	0,10—0,20	0,6—1,0	0,50—0,90	0,45—0,55	0,15—0,25	0,03—0,15	—	66	56	18
N—A—XTPA—110	0,10—0,20	0,6—1,0	0,50—0,90	0,45—0,55	0,15—0,25	0,03—0,15	—	87	77	18
T—1 Type A	0,12—0,21	0,6—1,0	0,15—0,36	0,40—0,65	0,15—0,25	0,03—0,15	—	80	70	16
galloy—s—90	0,10—0,20	1,1—1,5	0,15—0,30	—	0,20—0,30	—	>0,0015	80	70	16
galloy—s—110	0,10—0,20	1,1—1,5	0,15—0,30	—	0,20—0,30	—	—	87	77	18
Fortiwell—70	≤0,1	≤1	—	≤1	≤0,5	—	≤0,0030	119	80	19

В табл. 2.4 приведены некоторые марки сталей для сварных конструкций, применяемых за рубежом, их химический состав и механические свойства. В США нередко применяют стали, у которых $\sigma_т \geqslant 60$—70 *кГ/мм²*. Однако жесткость конструкций, изготовленных из этих сталей, понижается.

Углеродистые и низколегированные стали в зависимости от условий поставки разделяют на пять классов. К классу I относится сталь Ст. 3кп (кипящая), применяемая для наименее ответственных конструкций. К классу V относятся стали 15ХСНД, 10Г2С1 и др., с дополнительными гарантиями ударной вязкости при $T=-40°$ С и после механического старения.

За рубежом имеют распространение сварные конструкции из термообработанных сталей. Их сваривают автоматами под флюсом или газовой защитой высококачественными электродами при тщательно отработанном технологическом процессе. Как правило, конструкции, сваренные из термообработанных сталей, вторичной термообработке после сварки не подвергаются.

Часто для изготовления конструкций применяют алюминиевые сплавы. В табл. 2.5 приведены механические свойства этих сплавов.

Таблица 2.5

Механические свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Вид полуфабриката	Предел прочности $\sigma_в$, *кГ/мм²*	Относительное удлинение δ при $l=10\,d$, %	Предел выносливости σ_0 при $N=5\cdot10^6$ и $r=0$, *кГ/мм²*	Состояние сплава
АМцМ	Листы, трубы	10—17	16—22	5,0	Мягкое
АМцП	Листы	16—22	6	6,5	Полунагартованное
АМгМ	Листы, трубы	17—23	10—18	12,0	Мягкое
АМгП	То же	21—24	4—6	12,5	Полунагартованное
АМг6	Листы, профили	32	15	—	Мягкое
АВТ	Листы	18—20	16—20	—	Закаленное
АВТ	Профили	18	14	—	То же
АВТ	Трубы	21	14	—	»

Примечания: М — в мягком состоянии; П — в полунагартованном; Т — в термообработанном.

Алюминиевые сплавы обладают следующими физическими свойствами: модуль упругости $E=700\,000$ *кГ/см²*, $G=270\,000$ *кГ/см²*, коэффициент температурного расширения $\alpha=24\cdot10^{-6}$ *град*$^{-1}$ при $T=20\div100°$, удельный вес $\gamma=2{,}4$ *Г/см³*.

Кроме стали и алюминиевых сплавов, в машиностроении и строительных конструкциях начинают широко применять титановые и некоторые другие сплавы. Количество этих материалов увеличивается, одновременно ведется работа по улучшению их свойств и удешевлению стоимости.

Ряд изделий — некоторые детали машин (кронштейны, колеса, подшипники, рамы и т. д.), элементы строительных легких конструкций (промышленные трубопроводы, перекрытия зданий и т. п.) — изготовляют из полимеров. Эти материалы соединяются между собой с помощью сварки и склеивания.

§ 2. СОРТАМЕНТ

В сварных конструкциях применяют прокатный, литой, штампованый и кованый металлы.

Наиболее часто сварные конструкции изготовляют из прокатного металла. Его разделяют на три группы: листовой, профильно-сортовой и фасонный.

Листовой прокат. К нему относится листовая и универсальная сталь. Листовая сталь изготовляется путем прокатки между валками без бокового давления, универсальная — при боковом давлении. Сортамент на толстую листовую сталь (ГОСТ 5681 — 57) включает листы толщиной от 4 до 45 *мм*. Все большее значение в промышленности приобретает листовой прокат.

Стоимость тонны стали зависит от ее сорта и размеров. Наименьшую стоимость имеют профили типовых размеров.

Профильно-сортовой прокат. Если элемент конструкции подвергается изгибу, то рациональность профиля с позиции минимального веса при заданной несущей способности определяется отношением W/F, где W — момент сопротивления изгибу; F — площадь поперечного сечения.

Чем больше W/F, тем эффективнее используется профильный материал.

Двутавровая сталь (двутавры) поставляется в виде профильных элементов, которые имеют большие моменты инерции при относительно небольших площадях поперечных сечений. Номер двутавра указывает его высоту в сантиметрах. Начиная с № 18 и выше, двутавры прокатывают с различной площадью поперечного сечения при одной и той же высоте профиля (ГОСТ 8239 — 56).

Прокатные двутавровые балки ограничены размерами, поэтому сварные балки оказываются очень часто экономичнее и целесообразнее в техническом отношении. Экономичным является изготовление сварных балок на автоматах под слоем флюса. Двутавры применяют в различных строительных и машиностроительных конструкциях.

Уголковая сталь состоит из двух полок равной или неравной ширины. Закругления предусматриваются для облегчения проката. Сортамент уголков определяется по ГОСТ 8509—57 и 8510—57.

Уголки широко применяют в конструкциях ферм и рам.

Швеллеры используют при конструировании станин, рам, элементов ферм и других видов конструкций.

Сортамент швеллерной стали (швеллеры) определяется по ГОСТ 8240—56 и др.

Круглую сталь (ГОСТ 2590—57) широко используют в качестве арматуры железобетонных сооружений, а также в некоторых строительных конструкциях, работающих под небольшими нагрузками, например в фермах легкого типа.

Фасонный прокат. Применяют его в различных областях народного хозяйства: для изготовления рельсов железнодорожного транспорта, тавровых и зетовых элементов для строительных конструкций и др. Сортамент фасонных прокатных профилей весьма разнообразен.

Трубы в промышленности изготавливают как электросварные, так и волоченые. При проектировании следует учитывать, что стоимость 1 *т* труб выше, чем стоимость сортового проката, и что она изменяется в зависимости от диаметра труб (1 *т* труб малого диаметра дороже, большого — дешевле).

Штампованные профили (толщина $s \leqslant 5 \div 6$ *мм*) получают холодной штамповкой. Их соединяют дуговой и контактной точечной сваркой. Особенность этих элементов — значительная величина момента инерции при относительно малых площадях сечений, а следовательно, и весов деталей. Размеры штампованных элементов зависят от конструкции прессов. Имеются прессы, которые позволяют обрабатывать элементы длиной до $5 \div 6$ *м*. Штампованные элементы находят широкое применение в авиастроении, автомобилестроении, строительных конструкциях и т. п.

Гнутые профили изготовляют из горячекатаной и холоднокатаной отожженной листовой ленточной и полосовой стали по ГОСТ 380—60, из низколегированной стали — по ГОСТ 5058—65. Гнутые уголки выпускают согласно ГОСТ 8276—63.

Разработаны специальные корытообразные профили, неравнобокие, угловые, С-образные и многие другие, которые находят применение в тонкостенных конструкциях. Гнутые профили экономичны, так как при относительно малой площади поперечного сечения и малом весе они обладают повышенной жесткостью, что является существенно важным при работе элементов на изгиб, продольное сжатие, кручение и т. п. Примеры гнутых и прессованных элементов соответственно приведены на рис. 2-1, *а* и *б*.

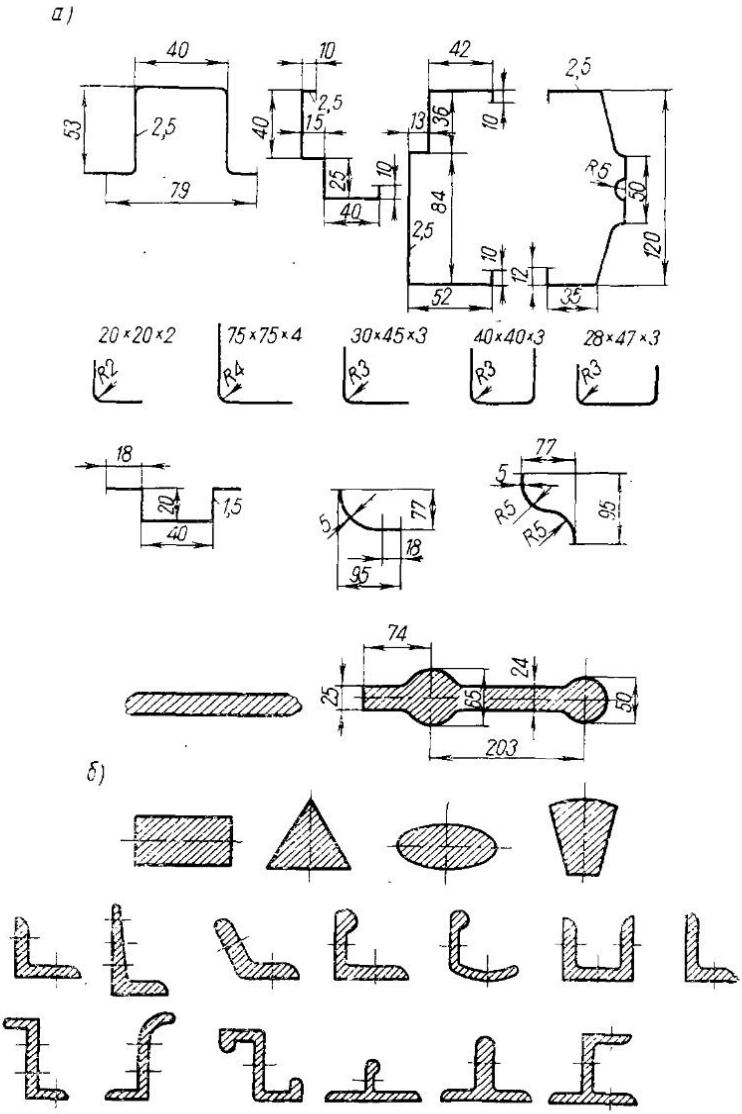


Рис. 2-1. Примеры гнутых и прессованных профилей

Прессованные профили изготовляют из алюминиевых сплавов. Такие профили сваривают точечной сваркой.

Периодический прокат (переменного сечения) целесообразно применять для арматуры железобетона. Винтообразная форма стержня увеличивает его поверхность и улучшает сцепление металла с бетоном.

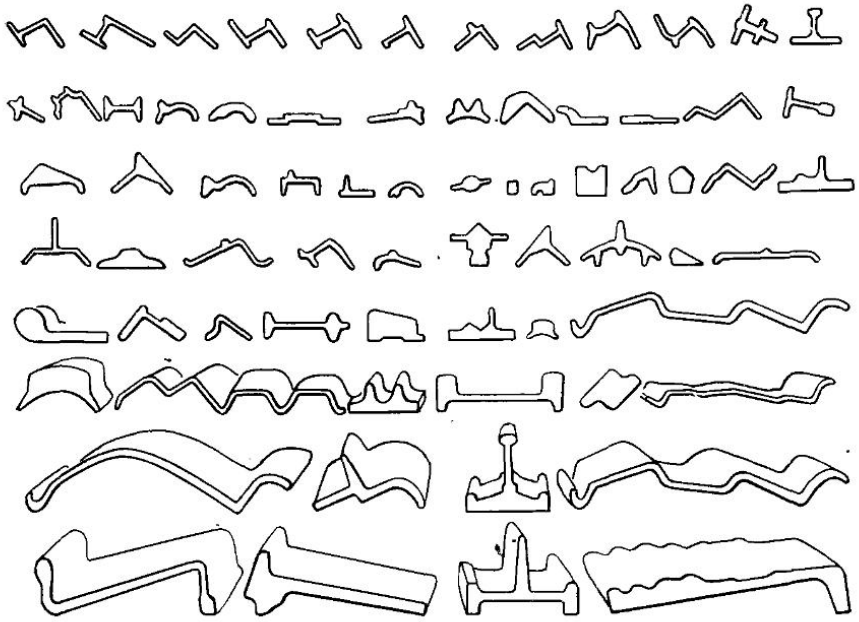


Рис. 2-2. Фасонные профили сортового металла

В результате применения периодического проката в машиностроении уменьшается вес металла в конструкциях по сравнению с конструкциями, выполненными из обычного проката, на 15%. Фасонные профили сортовой стали показаны на рис. 2-2.

Трубчатые профили различных очертаний постоянного и переменного поперечного сечения изготовляют сваркой, горячей прокаткой, прессованием, горячим и холодным волочением и раздувкой. Помимо круглого профиля, наиболее распространенного в промышленности, изготовляют также фасонные трубы (рис. 2-3 и 2-4).

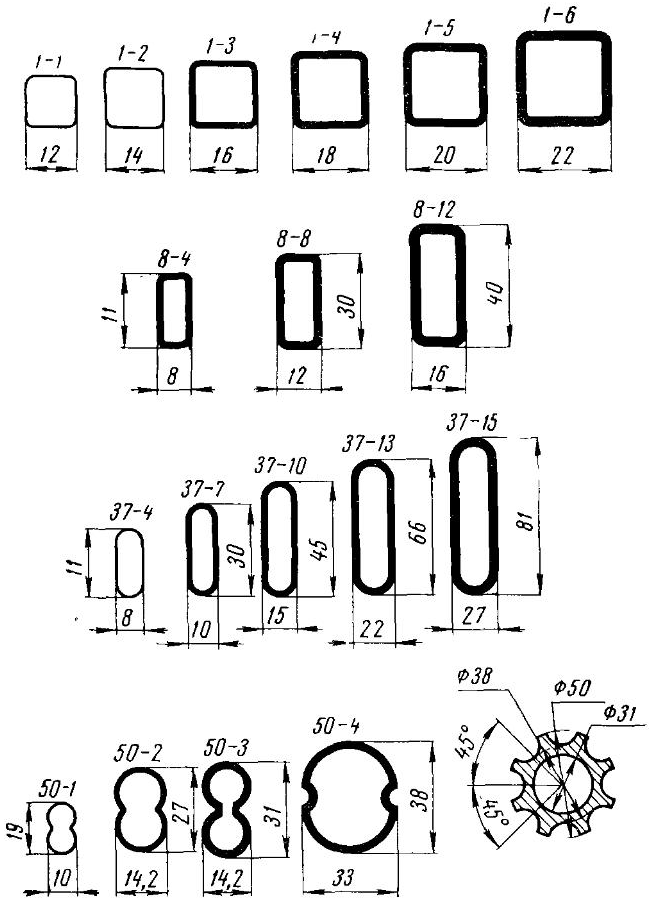


Рис. 2-3. Трубчатые профили (размеры, показанные на рисунке, даны в *мм*)

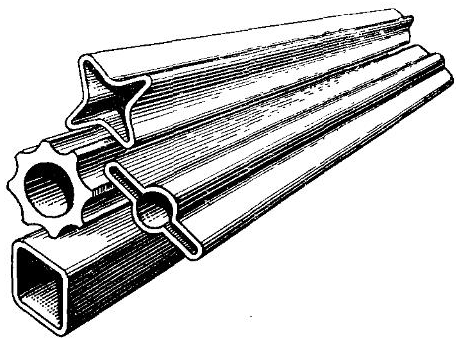


Рис. 2-4. Трубчатые фасонные профили

ГЛАВА III

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Литые, кованые и штампованные заготовки обычно поступают на сварку в виде, не требующем дополнительных операций. Технологический процесс заготовки деталей из проката может включать следующие операции: правку, разметку, резку, обработку кромок, гибку и очистку под сварку.

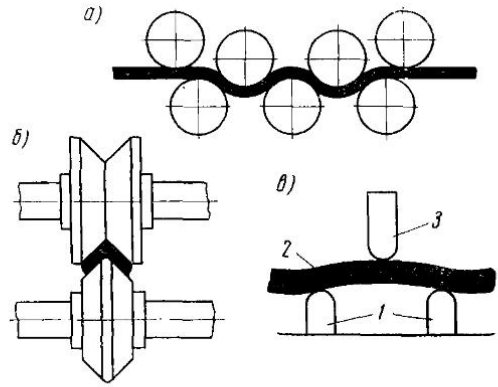


Рис. 3-1. Схемы правки листовых и профильных элементов:

а) на листоправильных вальцах; *б*) в углоправильных вальцах; *в*) на прессе

Правка осуществляется за счет создания местной пластической деформации и, как правило, производится в холодном состоянии. Для устранения волнистости листов и полос толщиной от 0,5 до 50 *мм* широко используют многовалковые машины с числом валков больше пяти. Листы толщиной более 40—50 *мм* обычно правят под прессом. Правка достигается в результате многократного изгиба при пропускании листов между верхним и нижним рядами валков, расположенных в шахматном порядке (рис. 3-1, *а*). Тонкие листы толщиной менее 0,5 *мм* правят растяжением с помощью приспособлений на прессах или на специальных растяжных машинах.

Для устранения саблевидности (искривление в плоскости) правку листовой и широкополосной стали производят на листо-

правильных вальцах с применением прокладок, выкладываемых у вогнутой кромки.

Правку мелко- и среднесортного и профильного проката производят на роликовых машинах (рис. 3-1, *б*), работающих по той же схеме, что и листоправильные. Для крупносортного проката, например двутавров и швеллеров, такой способ используется только для правки в плоскости меньшего момента сопротивления. В другой плоскости крупносортный прокат правят на правильно-гибочных прессах кулачкового типа путем изгиба (рис. 3-1, *в*). При постоянном ходе толкателя *3* величина деформации профиля *2* регулируется изменением расстояния между опорами *1*.

Холодная деформация сопровождается уменьшением пластических свойств металла. Поэтому величину относительного остаточного удлинения наиболее деформированных волокон Δ необходимо ограничивать. Например, для Ст. 3 обычно допускают Δ при холодной правке до 1% и при холодной гибке — до 2%. Исходя из этого, устанавливают предельные величины искривлений, правка которых еще допускается в холодном состоянии. Так, холодная правка саблевидности широкополосной и универсальной стали на вальцах и полос шириной до 200 *мм* на кулачковом прессе разрешается только при стреле саблевидности

$$f \leq \frac{l^2}{800\,b},$$

где f — стрела саблевидности;
l — длина полосы;
b — ширина полосы.

В случае необходимости создания более значительных деформаций правка и гибка стали должны производиться в горячем состоянии при температуре 500—1150° С для малоуглеродистой стали и 800—1150° С — для низколегированной стали. Деформирование в этом интервале температур сопровождается процессом рекристаллизации, и пластические свойства металла не снижаются. Кроме того, при горячей правке сопротивление пластическим деформациям заметно снижается.

Нередко правке или гибке в вальцах подвергают сварные заготовки из двух или нескольких листов, сваренных стыковыми швами. Для ограничения совершаемой пластической деформации зоны сварного соединения величина усиления сварного шва должна быть минимальной, иначе усиление рекомендуется удалять.

Разметка. Индивидуальная разметка трудоемка. Наметка более производительна, однако изготовление специальных наметочных шаблонов не всегда экономически целесообразно.

Оптический метод позволяет вести разметку без шаблона по чертежу, проектируемому на размечаемую поверхность.

Использование приспособлений для мерной резки проката, а также газорезательных машин с масштабной фотокопировальной системой управления или программным управлением позволяет обходиться без разметки.

Резка и обработка кромок. Резка листовых деталей с прямолинейными кромками из металла толщиной до 25 *мм*, как правило, производится на гильотинных ножницах (рис. 3-2, *а*) и пресс-ножницах (рис. 3-2, *б*). Разрезаемый лист *2*

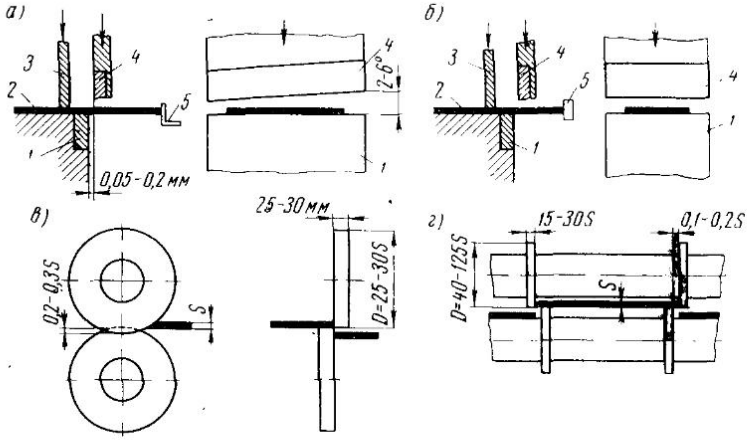


Рис. 3-2. Схема резки металла на ножницах различных типов

заводится между нижним *1* и верхним *4* ножами до упора *5* и зажимается прижимом *3*. Верхний нож, нажимая на лист, производит скалывание. Дисковыми ножницами (рис. 3-2, *в*) вырезают листовые детали с непрямолинейными кромками. Для получения параллельных кромок листа иногда дисковые ножи располагают непосредственно на валках правильных вальцов (рис. 3-2, *г*).

При резке на ножницах металл у кромки реза подвергается значительной пластической деформации. Если эта кромка в дальнейшем попадает в зону сварки и полностью переплавляется, то дополнительной обработки не требуется. Если же эта кромка в конструкции остается свободной, а конструкция работает при переменных нагрузках, то слой металла, претерпевший значительные пластические деформации, целесообразно удалить последующей механической обработкой.

Для поперечной резки фасонного проката применяют пресс-ножницы с фасонными ножами или дисковые пилы. В некоторых случаях применяют резку гладким диском, а также на анодно-механических станках (дисковых или ленточных).

Особенно широко применяют разделительную кислородную резку. Ручная и полуавтоматическая резка производится обычно по разметке, автоматическая — с помощью копирных устройств и по масштабному чертежу. Кислородная резка используется и при подготовке кромок под сварку. Если эта операция совме-

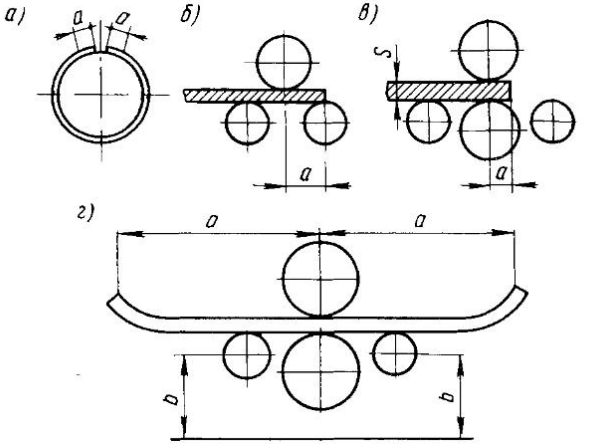


Рис. 3-3. Схемы вальцовки обечаек:

а) обечайка с необвальцованными кромками; *б* и *в*) установка листа в трех- и четырехвалковых вальцах; *г*) положение листа в начале гибки в вальцах

щается с разделительной резкой, то односторонний скос с притуплением получают, используя одновременно два резака, а двусторонний скос — при трех резаках. После вырезки детали иногда приходится править. Мелкие детали (планки, фасонки и т. п.) могут править на листоправильных и листогибочных вальцах с помощью подкладного листа.

Механическая обработка кромок на станках обычно производится: а) для обеспечения требуемой точности сборки; б) для образования фасок, имеющих сложное очертание; в) для удаления металла кромок, обрезанных ножницами или с помощью кислородной резки, когда это считается необходимым.

При обработке длинных кромок листов большого размера применяют кромкострогальные станки, для обработки торцов — торцефрезерные.

Гибка. Холодную гибку листовых элементов толщиной до 50—60 *мм* для получения цилиндрических и конических поверхностей осуществляют на листогибочных вальцах с валками длиной до 10—13 *м*. При вальцовке в холодном состоянии отношение радиуса изгиба к толщине листа ограничивают допустимой величиной создаваемой пластической деформации. Так, если для малоуглеродистых и низколегированных сталей это отношение оказывается меньшим 25, то обычно вальцовку рекомендуют производить в горячем состоянии.

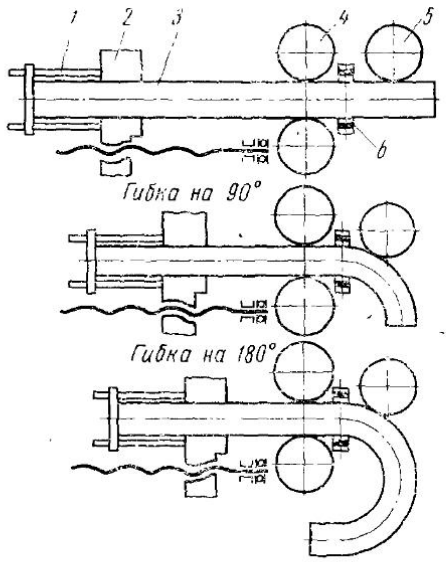


Рис. 3-4. Схема трубогибочного станка с индукционным нагревом:

1 — подвижный упор; *2* — зажим; *3* — труба; *4* — направляющие ролики; *5* — гибочный ролик; *6* — индуктор

При гибке в вальцах концевой участок листа *а* (рис. 3-3, *а*) остается почти плоским. Ширина этого участка при использовании трехвалковых вальцов определяется расстоянием между осями валков *а* (рис. 3-3, *б*) и может составлять 150—200 *мм* и более. В четырехвалковых вальцах несвальцованным остается только участок шириной 1—2 *s* (где *s* — толщина листа), зажатый между средними валками (рис. 3-3, *в*). Более правильное очертание концевого участка листа может быть получено путем предварительной подгибки кромок под прессом или на листогибочных вальцах с толстым подкладным листом, согнутым по заданному радиусу. После подгибки кромок лист устанавливается в гибочные вальцы, выверяется параллельность оси вала

и кромки листа, и гибка начинается со средней части листа (рис. 3-3, *г*).

При холодной гибке профильного проката и труб используют роликогибочные машины и трубогибочные станки. При этом иногда возникают трудности, связанные с нарушениями формы поперечного сечения. В этом случае целесообразно использование специальных гибочных станков с индукционным

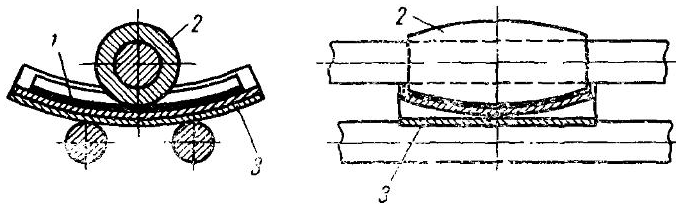


Рис. 3-5. Схема гибки листа по сферической поверхности

нагревом непрерывно перемещаемой и изгибаемой заготовки (рис. 3-4). Ограничение зоны нагрева со стороны выхода из индуктора достигается охлаждением водой. Узкий деформируемый участок (нагрев до 950—1000° С), заключенный между жесткими холодными частями заготовки, обладает малым сопротивлением пластическим деформациям и повышенной устойчивостью, что предотвращает образование гофр в зоне сжатия.

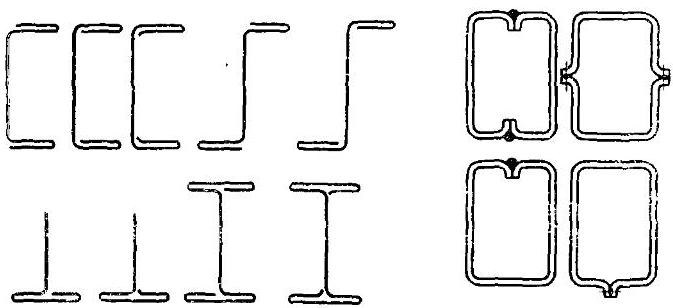


Рис. 3-6. Гнутые профили для восприятия изгибающей нагрузки

Горячая гибка толстого листового металла применяется при изготовлении барабанов котлов, сосудов высокого давления, зубчатых колес, барабанов лебедок, подшипников редукторов и т. п.

При больших толщинах гибка осуществляется обычно на прессах. Листовые элементы с поверхностью двоякой кривизны получают на специальных вальцах с валками переменного диаметра, выбивкой или штамповкой. На обычных листогибочных

вальцах такие детали *1* могут гнуться с помощью бочки *2*, надеваемой на верхний валок, и постели *3*, устанавливаемой на нижние валки (рис. 3-5).

Сечения, получаемые продольной гибкой из листа или полосы, чрезвычайно разнообразны. Для изделий крупносерийного и массового производства заготовки требуемой формы поперечного сечения целесообразно заказывать на металлургических заводах, имеющих цехи гнутых профилей с высокопроизводительным специальным оборудованием. Там, где количество одинаковых деталей недостаточно велико, холодная гибка из листа может производиться на кромкогибочных станках и прессах. Кромкогибочные прессы позволяют гнуть листы толщиной до 18 *мм* и длиной до 5000 *мм*.

Для элементов, испытывающих поперечный изгиб, целесообразны профили, где металл в полках сложен вдвое (рис. 3-6), или замкнутые сечения, получаемые из гнутых профилей с помощью дуговой или контактной сварки.

Гофрирование (рис. 3-7) повышает жесткость листов. При гофрировании гибкой поперечные кромки листов теряют плоскую форму, что затрудняет присоединение их к другим элементам конструкции. Но при гофрировании штамповкой, если выступы на поверхности листов получают вытяжкой, кромки остаются плоскими.

Очистка под сварку. Очистку производят вручную абразивными кругами или щетками, на пескоструйных установках, на дробеструйных установках, химическим путем и с помощью ультразвука. Очистка абразивными кругами и щетками мало производительна, а на пескоструйной установке более производительна и широко применяется, но обладает существенным недостатком — загрязняет воздух цеха.

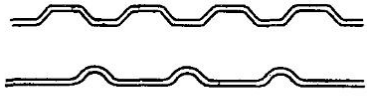


Рис. 3-7. Гофрированные листы

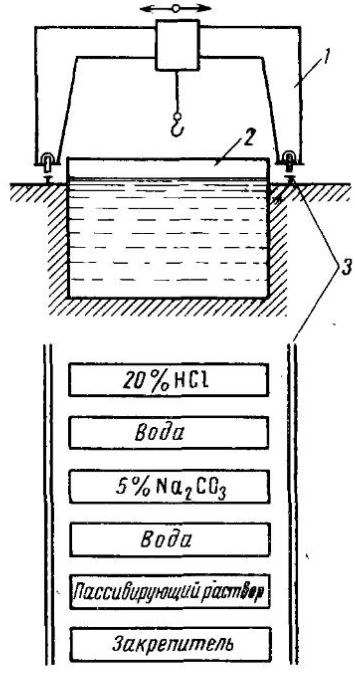


Рис. 3-8. Схема участка химической очистки с использованием ванного способа

Дробеструйные установки, использующие металлический песок из отбеленного чугуна, не менее производительны чем установки, использующие сухой кварцевый песок, и загрязняют воздух значительно меньше. При гидропескоструйной очистке, осуществляемой пульпой (смесь песка и воды), направляемой на деталь сжатым воздухом, почти не происходит загрязнения воздуха.

Химическая очистка при надлежащей организации может быть наиболее производительной. Для предохранения очищаемой поверхности от коррозии целесообразно производить пассивирование *. Различают ванный и струйный способы химической

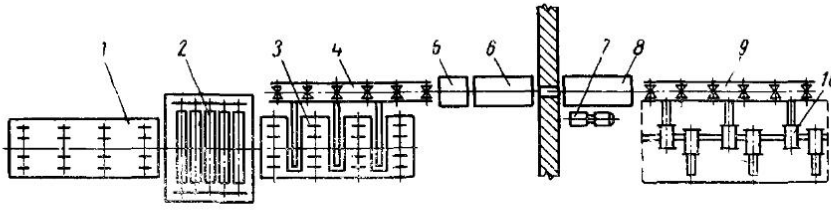


Рис. 3-9. Схема непрерывной поточной линии химической очистки струйным способом

очистки. Схема химической очистки ванным способом приведена на рис. 3-8. Этот участок расположен на открытом воздухе и обслуживается козловым краном. Контейнеры *2* располагаются вдоль рельсового пути *3*, по которому перемещается кран *1*. Они имеют обогрев для работы в зимнее время. В контейнер с 20%-ным раствором кислоты устанавливают листы или профильный прокат в вертикальном положении, выдерживают определенное время и затем переносят краном в следующий контейнер и так до полного завершения цикла.

При струйном способе обработки компоненты, входящие в состав растворов, значительно интенсивнее реагируют со ржавчиной и окалиной, чем при обработке ванным способом. Струйный способ позволяет организовать наиболее производительные и механизированные поточные линии химической очистки. Схема такой линии показана на рис. 3-9. С рольганга *1* через листоправильные вальцы *2* листы попадают на рольганг *3*, откуда листоукладчиком устанавливаются в вертикальном положении на рольганг *4* и попадают в ряд камер (*5* — подогрева, *6* — травления, *8* — промывки, нейтрализации и пассивирования). Через камеры листы перемещаются системой роликов с приводом *7* и вы-

* Пассивирование — создание защитной пленки в целях предохранения поверхности металла от окисления.

талкиваются на холостой рольганг *9*, откуда снимаются кантователем-листоукладчиком *10* и ставятся в стеллаж.

Очистка ультразвуком пока еще имеет ограниченное применение и используется в случае необходимости весьма тщательной очистки различных деталей сложного профиля.

ГЛАВА IV

СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И РАСЧЕТ ИХ ПРОЧНОСТИ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

§ 1. ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПРЕДЕЛЬНОМУ СОСТОЯНИЮ

Существует несколько предельных состояний, ограничивающих возможность нормальной эксплуатации конструкций. Первое расчетное предельное состояние определяется несущей способностью конструкции: ее прочностью, устойчивостью, выносливостью при динамических и переменных нагрузках. Второе расчетное предельное состояние обусловлено наибольшей деформацией конструкции: прогибами при статических нагрузках, колебаниями при динамических. Третье расчетное предельное состояние характеризуется максимально допустимыми местными повреждениями, например, величиной раскрытия трещин, коррозией и т. п. В большинстве случаев расчет металлических конструкций производится по первому предельному состоянию — по условию прочности, однако в отдельных случаях размеры частей конструкции устанавливают в зависимости от предельно допустимых деформаций. При этом расчет производится по условию жесткости.

Расчет по предельному состоянию (по несущей способности) принят в строительных организациях. В основу расчета по этому методу положены так называемые нормативные сопротивления. В качестве нормативного сопротивления принят предел текучести стали. С учетом неоднородности свойств стали нормативные сопротивления заменяются расчетными сопротивлениями R. Расчетное сопротивление устанавливают равным пределу текучести $\sigma_т$, умноженному на коэффициент однородности металла, который для малоуглеродистой стали равен 0,9. Таким образом, расчетное сопротивление $R = 0{,}9\sigma_т$.

Некоторые значения величин расчетных сопротивлений приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Расчетные сопротивления сталей

Род усилий	Условное обозначение	Расчетные сопротивления, $кГ/мм^2$		
		Марки свариваемых сталей		
		Ст. 3 Ст. 4	14Г2, 15ХСНД	Ст. 5
Растяжение, сжатие, изгиб	R	21	29	23
Срез	$R_{ср}$	13	17	14
Смятие торцовой поверхности	$R_{см}$	32	43	34

При расчете по этому методу находят величины допускаемых усилий в элементах. Допускаемые усилия определяют с учетом коэффициента возможной перегрузки конструкции n и коэффициента условий работы m, учитывающего специфический характер работы конкретных объектов рассматриваемой области техники. Коэффициенты перегрузки и условий работы определяют для стропильных ферм зданий, резервуаров, трубопроводов и т. п. на основе всестороннего изучения работы конструкции.

Коэффициент перегрузки обычно принимают равным от 1 до 1,2; коэффициент условий работы для балок, колонн, резервуаров — от 0,8 до 0,9.

Допускаемые усилия в элементе при продольной силе определяют по формуле

$$N_{доп} \leqslant R \frac{m}{n} F, \tag{4.1}$$

где F — площадь сечения элемента.

Расчетное усилие N должно быть $\leqslant N_{доп}$.

Аналогичным путем находят допускаемый момент при изгибе

$$M_{доп} \leqslant R \frac{m}{n} W. \tag{4.2}$$

Легко видеть, что произведение $R\frac{m}{n}$ представляет собой по существу величину допускаемого напряжения. Коэффициенты m и n неодинаковы не только для разных изделий, но в некоторых случаях и для элементов конструкции. Таким образом, по этому способу для разных конструкций расчет производится по различным допускаемым напряжениям.

Как было указано выше, в некоторых случаях расчет конструкций производят по предельному допускаемому прогибу или по предельным допускаемым амплитудам колебаний при динамических нагрузках.

§ 2. ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ДОПУСКАЕМЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

В машиностроении расчет прочности производят по допускаемым напряжениям, которые устанавливаются в зависимости от следующих основных факторов:

1. от свойств материалов; при улучшении механических свойств допускаемое напряжение повышается;

2. от степени точности расчета прочности, чем точнее производится расчет прочности и полнее учитываются нагрузки, действующие на конструкцию, тем меньше принимаемый коэффициент запаса прочности, а следовательно, выше допускаемое напряжение;

3. от рода усилий (растяжения, сжатия, изгиба и среза);

4) от качества технологического процесса; это обстоятельство имеет особенно большое значение при установлении допускаемых напряжений в сварных соединениях;

5. от характера нагрузок; при переменных нагрузках допускаемое напряжение понижается по сравнению со статическими.

Допускаемые напряжения рассматриваются как фактор технико-экономический. С развитием техники они непрерывно повышаются. Их определяют как частное от деления напряжения, условно принимаемого в качестве разрушающего, на коэффициент запаса прочности.

Допускаемое напряжение при растяжении $[\sigma]_р$ обычно называют *основным*. Допускаемые напряжения при других видах усилий определяются как производные от $[\sigma]_р$.

При сжатии коротких элементов, в которых продольный изгиб не может иметь места, допускаемое напряжение $[\sigma]_{сж}$ принимается равным $[\sigma]_р$. При сжатии длинных элементов $[\sigma]_{сж}$ принимается равным $[\sigma]_р\varphi$, где φ — коэффициент продольного изгиба, зависящий от гибкости сжатого элемента (см. гл. XVI «Стойки»).

При изгибе стальных конструкций допускаемые напряжения на изгиб принимаются равными $[\sigma]_р$.

При срезе допускаемое напряжение принимается в зависимости от теории прочности, положенной в расчет. Обычно допускаемое напряжение на срез $[\tau]=0{,}5\div0{,}6\,[\sigma]_р$.

Как правило, при статических нагрузках допускаемое напряжение $[\sigma]_р=\frac{\sigma_т}{K}$, где K — коэффициент запаса прочности, принимаемый обычно равным 1,4÷ 1,6. При динамических переменных

нагрузках вместо $\sigma_т$ принимают величину предела выносливости. При этом учитывают также величину эффективных коэффициентов концентрации (см. гл. X).

§ 3. РАСЧЕТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

При проектировании сварных соединений в металлических конструкциях применяют два способа.

Первый способ. Расчетные сопротивления в сварных швах заданы цифровыми значениями. Этот способ применяют при расчете прочности сварных соединений строительных конструкций.

Значения расчетных сопротивлений сварных швов, выполненных автоматической, полуавтоматической и ручной сварками, приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Расчетные сопротивления сварных швов

Сварное соединение	Род усилий	Условное обозначение	Расчетные сопротивления, $кГ/мм^2$		
			Марки свариваемых сталей		
			Ст. 3	14Г2 15ХСНД	10ХСНД
Встык	Сжатие	$R_с^{св}$	21	29	34
То же	Растяжение при: сварке автоматической	$R_р^{св}$			
	полуавтоматической ручной с повышенным способом контроля *		21	29	34
	сварке полуавтоматической и ручной с обычным контролем		18	25	29
»	Срез	$R'_{св}$	13	17	20
Угловое	Сжатие, растяжение, срез	$R_у^{св}$	15	20	24

*К повышенным способам контроля относятся: просвечивание гамма-лучами, контроль ультразвуком и т. п.

Второй способ. Допускаемые напряжения в сварных швах определяются в процентах от допускаемых напряжений

в основном металле. Такой прием определения допускаемых напряжений применяют в различных областях машиностроения. Удобство этого приема состоит в следующем: во-первых, можно конструировать сварные соединения равнопрочными целому элементу, не производя определения величины усилий, действующих в них; во-вторых, при конструировании соединений нет необходимости учитывать многие переменные величины, влияющие на выбор коэффициентов запаса прочности разрабатываемой конструкции (степень точности расчета и т. п.).

С технологической стороны такой способ установления допускаемых напряжений в сварных соединениях вполне оправдан, так как при сварке автоматом под флюсом, в среде защитных газов, контактным способом и в других случаях механические свойства швов зависят в значительной степени от механических свойств основного металла.

Наиболее существенными факторами, влияющими на механические свойства швов, а следовательно, и на величины допускаемых напряжений в них являются качество выполнения и вид технологического процесса сварки.

Сварные соединения углеродистых сталей, выполненные дуговой сваркой, по определению допускаемых напряжений целесообразно разделить на две группы.

К первой группе относятся соединения, сваренные автоматами и полуавтоматами под слоем флюса, в среде защитного газа, а также вручную электродами типа Э42А и Э50А. *Ко второй группе* относятся соединения, сваренные электродами обычного качества, например Э42 и Э50.

В табл. 4.3 приведены допускаемые напряжения в швах. Этими данными пользуются при определении допускаемых напряжений в швах соединений деталей из мало- и среднеуглеродистых конструкционных сталей и некоторых низколегированных конструкционных сталей, например, 14ХГС, 15ГС, 15ХСНД, 09Г2, 19Г и др.

Таблица 4.3

Допускаемые напряжения для сварных швов

Группа соединений	Допускаемые напряжения в швах при		
	растяжении	сжатии	срезе
Первая	$[\sigma]_р$	$[\sigma]_р$	$0{,}65\,[\sigma]_р$
Вторая	$0{,}9\,[\sigma]_р$	$[\sigma]_р$	$0.6\,[\sigma]_р$

При сварке малоуглеродистой стали марки Ст. 3, для которой допускаемое напряжение $[\sigma]_р = 16$ *кГ/мм*^{2}, допускаемые напряжения в швах, выполненных автоматической сваркой

и электродами Э42А, будут следующие: $[\sigma']_р = 16$ *кГ/мм*^{2}; $[\sigma']_{сж} = 16$ *кГ/мм*^{2}; $[\tau'] = 10$ *кГ/мм*^{2}; с электродами Э42 — $[\sigma'] = 14{,}4$ *кГ/мм*^{2}; $[\sigma']_{сж} = 16$ *кГ/мм*^{2}; $[\tau'] = 9{,}6$ *кГ/мм*^{2}; где $[\tau']$ — допускаемое напряжение в шве при срезе.

При стыковой контактной сварке, а также при стыковой сварке трением и холодным способом, а в некоторых случаях при газопрессовой могут быть приняты те же допускаемые напряжения, что и в стыковых соединениях при сварке дуговым методом, при условии, если технологический процесс отработан и позволяет получить стабильные высокие механические свойства.

Для соединений, выполняемых контактной точечной и роликовой сваркой, допускаемые напряжения при срезе в точке устанавливаются в зависимости от свойств металла и отработки технологического процесса. В точках и швах допускаемые напряжения при срезе для малоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей могут быть приняты $\leqslant 0{,}5$ от допускаемых напряжений $[\sigma]_р$ в основном металле. Расчет на переменные нагрузки см. гл. X.

§ 4. ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Величины расчетных сопротивлений для основного металла алюминиевых конструкций, применяемых в строительной промышленности, приведены в табл. 4.4, а для сварных соединений — в табл. 4.5. Допускаемые напряжения определяют умножением цифр табл. 4.4 и 4.5 на коэффициент условий работы m и делят на коэффициент перегрузки n.

Таблица 4.4

Расчетные сопротивления алюминиевых сплавов

Марка сплава	Род усилий	Расчетные сопротивления (основного металла) R, *кГ/мм*^{2}
АМцМ	Растяжение, сжатие, изгиб	4
АМцП	То же	10
АМгМ	»	6÷7
АМгП	»	11÷14
АМг-6М	»	14
АВТ-1 (термообработан)		16÷17,5
В-92Т (то же)		19÷26
Д-16Т »		22÷27

Таблица 4.5

Расчетные сопротивления швов алюминиевых сплавов

Тип шва	Род усилия	Расчетные сопротивления в $кГ/мм^2$ для швов сплавов марок				
		АМц	АМг	АМг-6	АВТ-1	В-92Т
Встык	Сжатие и растяжение R'	4	7	14	11,9	17,15
То же	Срез $R'_{ср}$	4	7	13	7	12
Угловой	Срез $R'_{ср}$	4	5	7	5	9

Примечание. Цифры, указанные в числителе, относятся к сварке плавящимся электродом, в знаменателе — вольфрамовым.

За рубежом при нахождении допускаемых напряжений в сварных соединениях алюминиевых конструкций пользуются коэффициентами запаса относительно предела прочности, равными 2,2 ÷ 2,5, а относительно предела текучести — около 1,85. В гнутых элементах допускаемые напряжения ниже, чем в прокатных.

В СССР допускаемые напряжения в некоторых областях техники принимаются с учетом предела текучести $\sigma_т$ и коэффициент запаса равен 1,4÷1,7. В сварных соединениях допускаемые напряжения при сварке в среде инертных газов и под флюсом назначаются с теми же коэффициентами запаса, что и в основном металле.

При контактной точечной и роликовой сварках допускаемые напряжения в конструкциях могут быть приняты: на срез $[\tau'] \leqslant 0{,}4 \div 0{,}5$ от $[\sigma]_р$, на отрыв $\leqslant 0{,}25 \div 0{,}3\,[\sigma]_р$. Эти цифры условны. Для установления допускаемых напряжений в этих случаях следует пользоваться данными специально проведенных экспериментов.

В листовом прокате принимаются более низкие цифры, в профильном — более высокие. В случае соединения элементов из термообработанных алюминиевых сплавов угловыми швами указанные в табл. 4.4 значения уменьшаются умножением на коэффициент K_0, который принимают равным при дуговой сварке в среде защитных газов плавящимся электродом около 0,85 и вольфрамовым — около 0,70.

Расчетное сопротивление на срез $R'_{ср}$ при точечном соединении, выполненном контактной сваркой на машинах с импульсом постоянного тока, можно определять в зависимости от толщины

основного металла и рода алюминиевого сплава, пользуясь табл. 4.6.

Таблица 4.6

Расчетное сопротивление на срез при точечном соединении

Толщина наиболее тонкого металла в соединениях, *мм*	Значения $R_{ср}$ *кГ* на точку			
	АМцМ	АМгМ АВТ	АМг6М АВТ-1	В-92Т Д-16Т
1,0	90	100	120	140
1,5	140	170	210	250
2,0	190	240	290	350
2,5	250	320	390	460
3,0	310	400	500	600
4,0	400	700	900	1100

§ 5. ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Сварные соединения должны быть по возможности равнопрочными с основным металлом элементов конструкций при всех температурах во время эксплуатации, а также при всех видах нагрузок (статических, ударных и вибрационных).

Слабыми участками в сварных соединениях могут быть швы, зоны термического влияния и сплавления. *Зоной термического влияния* называют участок основного металла, прилегающий к швам, который в результате сварки изменяет механические свойства. Последнее обстоятельство особенно имеет место при сварке термически обработанных, а также наклепанных сталей и сплавов.

Улучшение механических свойств сварных соединений достигается: 1) выбором рациональной конструктивной формы соединения; 2) применением рациональных методов сварки; 3) термической и механической обработкой сварных конструкций после сварки.

Конструкции с равнопрочными сварными соединениями отвечают требованиям экономичности. Значительное усиление сварного соединения, по сравнению с целым элементом, удорожает конструкцию и не улучшает условий ее эксплуатации. Недостаточная прочность сварного соединения снижает несущую способность всей конструкции и не позволяет полностью использовать рабочие сечения ее элементов.

Если элемент работает при продольной растягивающей силе, то расчетным усилием для его соединения является

$$P = [\sigma]_p F. \qquad (4.3)$$

Если же элемент работает при продольной сжимающей силе, расчетное усилие равно

$$P = [\sigma]_{сж} F. \tag{4.4}$$

При изгибе элемента расчетный момент равен

$$M = [\sigma]_{р} W. \tag{4.5}$$

В конструкциях со сварными соединениями в металле швов могут возникать напряжения двух родов — *рабочие* и *связующие*. Чтобы установить различие между рабочими и связующими напряжениями, рассмотрим несколько примеров.

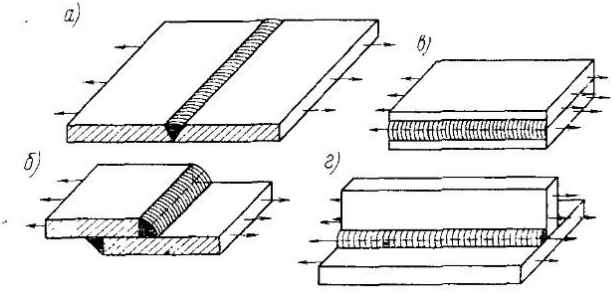


Рис. 4-1. Примеры рабочих (*а*, *б*) и связующих (*в*, *г*) швов

На рис. 4-1, *а* изображены две полосы, соединенные стыковым швом. Полосы подвергаются растяжению. Очевидно, что сварной шов в этой конструкции необходим, так как при разрушении шва разрушится и вся конструкция. То же самое произойдет и в соединении, изображенном на рис. 4-1, *б*. Сварной шов в этом соединении также необходим.

Сварные соединения, разрушение которых влечет за собой выход из строя конструкции, будем называть *рабочими*, а напряжения, действующие в этих соединениях,— *рабочими напряжениями.*

Совершенно иначе работает наплавленный металл в шве, соединяющем две полосы, показанные на рис. 4-1, *в*. Наплавленный металл, соединяющий полосы, деформируется вместе с основным металлом; при этом в нем возникают напряжения. Так как модуль упругости наплавленного металла незначительно отличается от модуля упругости основного, то в швах при их работе в пределах упругих деформаций образуются напряжения приблизительно той же величины, что и в растягиваемых полосах. Эти *напряжения,* возникающие в наплавках, вследствие их

совместной работы с основным металлом во многих случаях не опасны для прочности конструкции и называются *связующими*. Пример связующих швов показан на рис. 4-1, *г*.

При расчете прочности сварных соединений необходимо помнить, что определяются только рабочие напряжения. Связующие напряжения, значительные по величине, равны напряжению в основном металле.

Исследования, как правило, подтверждают, что при анализе прочности сварных конструкций можно не учитывать связующие напряжения.

Основными типами сварных соединений являются соединения *встык, внахлестку, втавр, проплавные*. Наиболее распространены в сварных конструкциях стыковые соединения.

СОЕДИНЕНИЯ ВСТЫК

Соединения при автоматической и полуавтоматической сварках под слоем флюса. Разработанная Институтом электросварки им. Е. О. Патона совместно с другими НИИ и заводами автоматическая сварка под флюсом находит широкое применение на заводах машиностроительной и строительной промышленности при изготовлении балочных и рамных конструкций, ферм, а также листовых конструкций (резервуаров, баков, цистерн и т. п.) индустриальным путем, на поточно-механизированных линиях, а во многих случаях на монтажных работах, например, при сварке кольцевых стыков труб. Автоматическая сварка под флюсом применяется для соединений толстостенных котлов, различных сосудов и аппаратов химической аппаратуры, корпусов судов и всевозможных деталей машин: барабанов, редукторов, маховиков и др.

Автоматической сваркой под флюсом в нижнем положении соединяются углеродистые и низколегированные стали, многие стали аустенитного класса, алюминиевые, титановые и другие сплавы. Эта сварка наиболее целесообразна при укладке длинных прямолинейных и кольцевых швов, а также коротких швов в серийном и массовом производствах. При сварке коротких и разбросанных по конструкции швов рациональнее применение полуавтоматической сварки под флюсом шланговыми полуавтоматами.

Автоматической сваркой под флюсом сваривают изделия с широким диапазоном изменения толщин, как правило, от 1 до 50 *мм*, иногда и более.

Подготовка кромок для сварки зависит от толщины соединяемых элементов и технологического процесса.

В табл. 4.7 приведены примеры подготовок кромок соединений при сварке под флюсом.

Формирование шва при автоматической сварке под слоем флюса при малых и средних толщинах производится преимущественно за счет основного металла, при больших — преимущественно за счет наплавленного металла.

Соединения при ручной дуговой сварке. Ручная дуговая сварка является универсальным технологическим процессом. Этим способом сваривают конструкции во всех пространственных положениях из разных марок сталей, цветных сплавов, в случаях, когда применение автоматических и полуавтоматических методов не представляется возможным, например, при отсутствии требуемого оборудования, недостаточного освоения технологического процесса.

Способы подготовки кромок соединений для сварки вручную в зависимости от толщины элементов и технологического процесса сварки приведены в табл. 4.8.

При сварке листов неравных толщин должны быть сделаны скосы: при одностороннем превышении кромок более толстого листа на длине $5(s_1—s_2)$ и при двустороннем превышении на длине $2{,}5(s_1—s_2)$.

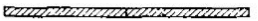
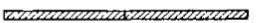
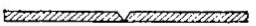
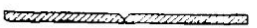
Соединения при сварке в среде защитных газов. Применение автоматической и полуавтоматической сварки в среде защитного углекислого газа, разработанной ЦНИИТМаш, Институтом электросварки им. Е. О. Патона, МВТУ и другими организациями, непрерывно расширяется. Этим способом производится укладка швов во всех пространственных положениях, хорошо свариваются конструкции из углеродистых, низколегированных сталей и некоторых высоколегированных, в частности аустенитных, свариваются конструкции малых, средних и больших толщин в несколько десятков миллиметров. Установлено, что сварка в среде углекислого газа в некоторых случаях уступает сварке под флюсом по производительности, но значительно превосходит ее по экономичности вследствие меньшей стоимости применяемых материалов.

Конструкции из аустенитных, мартенситных и ферритных сталей, жаропрочных, теплоустойчивых, многих алюминиевых, титановых, медных, магниевых и других сплавов успешно свариваются в защите нейтральных газов. Вольфрамовым электродом, как правило, сваривают изделия малых толщин (от долей миллиметра до нескольких миллиметров), плавящимся — изделия средних и больших толщин. Соединения при сварке в среде защитных газов при малой толщине выполняют как без присадки, так и с присадкой металла (рис. 4-2).

При больших толщинах свариваемых элементов придают V-образную и X-образную форму кромкам аналогично соединениям, применяемым при ручной дуговой сварке. Как правило, стыковые швы делают прямыми, т. е. направленными перпендикулярно действующим усилиям.

Таблица 4.7

Подготовка кромок соединений для сварки под флюсом

Тип шва		Толщина свариваемого металла, *мм*	Эскиз соединения	Примечание
по форме подготовки кромок	по характеру выполнения шва			
—	Односторонний	1,5—3,0		Без подкладки
	Двусторонний	2—20		
Без скоса кромок	Односторонний	2—5		То же
	То же	2—10		С подкладкой
Со скосом двух кромок	Двусторонний	16—24		Без подкладки
	Односторонний	14—30		С подкладкой
	То же	8—24		То же

Продолжение

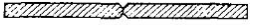
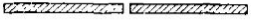
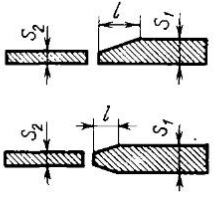
Тип шва		Толщина свариваемого металла, *мм*	Эскиз соединения	Примечания
по форме подготовки кромок	по характеру выполнения шва			
U-образный	Двусторонний	30—130		Без подкладки
Х-образный с симметричным скосом двух кромок	То же	24—60		То же
То же, с несимметричным скосом	»	20—60		С подкладкой

Таблица 4.8

Подготовка кромок соединений для ручной сварки

Тип шва		Толщина свариваемого металла, *мм*	Эскиз соединения	Примечание
по форме подготовки кромок	по характеру выполнения шва			
С отбортовкой	Односторонний	1—3		—
Без скоса кромок	Двусторонний	3—8		Без подкладки
	Односторонний	1—6		То же
	То же	1—6		С подкладкой
V-образный со скосом двух кромок	Двусторонний	3—26		Без подкладки
	Односторонний	3—26		То же
	То же	3—26		С подкладкой

Продолжение

Тип шва		Толщина свариваемого металла, *мм*	Эскиз соединения	Примечание
по форме подготовки кромок	по характеру выполнения шва			
U-образный с криволинейным скосом двух кромок	Двусторонний	20—60		Без подкладки
Х-образный со скосом двух кромок	То же	12—60		То же
Х-образный с криволинейным скосом двух кромок	»	30—60		»

Если элемент работает на растяжение, то допускаемое усилие в сварном стыковом соединении равно

$$P = [\sigma']_р \, sl; \tag{4.6}$$

при сжатии допускаемое усилие составляет

$$P = [\sigma']_{сж} \, sl, \tag{4.7}$$

где s — толщина основного металла, так как усиление шва не учитывается;

l — длина шва.

Если $[\sigma]_р = [\sigma']_р$, то сварной шов равнопрочен основному металлу.

При работе элементов на усталость наиболее слабым участком в сварном соединении оказывается не металл шва, а прилежащая к нему зона, которая в результате термического действия дуги или образования концентраторов напряжений может оказаться разупрочненной. В таких случаях необходимо заменить расчет прочности швов расчетом прочности соединений в ослабленных зонах с учетом особенностей механических свойств металла, его термической обработки и других факторов, зависящих от конкретных условий. Если шов направлен под углом α к усилию (как правило, $\alpha = 45°$), то проверка его прочности условно производится по формуле

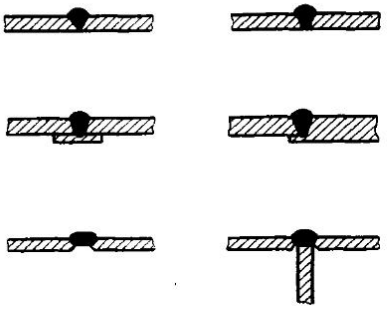


Рис. 4-2. Соединения при сварке в среде защитных газов

$$P = [\tau'] \, sl. \tag{4.8}$$

СОЕДИНЕНИЯ ВНАХЛЕСТКУ

В соединениях внахлестку швы имеют форму валиков и называются *валиковыми* или *угловыми*.

Соединения угловыми швами при сварке на автоматах и полуавтоматах под слоем флюса и в среде газов. Сварку на автоматах под слоем флюса производят при вертикальном и наклонном положениях электрода. При сварке вертикальным электродом свариваемые детали устанавливают в положение, называемое «в лодочку» (рис. 4-3, *а*). При сварке наклонным электродом сварочный процесс выполняется, как показано на рис. 4-3, *б*.

Угловые швы при сварке под слоем флюса получаются с более глубоким проплавлением, чем при ручной сварке. Их очертания показаны на рис. 4-3, *в*. Параметрами, определяющими размеры угловых швов, являются катет шва $к$ и длина l.

Обычно при автоматической сварке под слоем флюса катет шва $к=s$, где s — толщина свариваемого металла.

Соединения угловыми швами при сварке ручным способом. При сварке вручную угловые швы имеют различные очертания: нормальные, условно принимаемые очерченными в форме равнобедренного треугольника, выпуклые, вогнутые (рис. 4-4, *а, б, в*).

Выпуклые швы нецелесообразны ни с технической, ни с экономической стороны. Они требуют больше наплавленного металла, вызывают концентрацию напряжений.

Целесообразны швы, имеющие очертания неравнобедренных треугольников, с отношением основания шва к высоте 1,5 : 1; 2 : 1; 3 : 1 (рис. 4-4, *г, д*). В швах этого типа удобно производить механическую обработку концов, чтобы обеспечить плавное сопряжение наплавленного металла с основным (рис. 4-4, *е*). Подобного рода швы, как будет показано ниже, целесообразно применять в конструкциях, работающих на усталостные нагрузки.

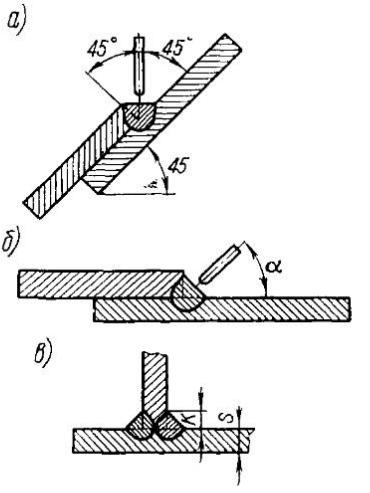


Рис. 4-3. Угловые швы при сварке под флюсом:

а) при укладке «в лодочку»; *б*) при укладке наклонным электродом; *в*) с глубоким проплавлением

Вогнутость может достигаться обычно механической обработкой с помощью фрезы или других инструментов. Подобного рода швы применяют в конструкциях относительно редко.

В широкой практике конструирования распространено применение угловых швов с нормальными очертаниями. Размер катета углового шва нормального очертания называют *толщиной* шва и обозначают буквой $к$. Длина перпендикуляра, опущенного из вершины прямого угла на гипотенузу, носит название *расчетной толщины* шва. В швах с формой равнобедренного треугольника расчетная толщина равна $к \cdot \sin 45° = 0{,}7к$. В большинстве случаев катет шва $к$ равен толщине s детали, но он может быть и меньше s.

Наименьшая толщина рабочих швов в машиностроительных конструкциях 3 *мм*. Исключение составляют конструкции,

в которых толщина самого металла меньше 3 *мм*. Верхний предел толщины швов не ограничен, но применение швов, у которых $к > 20$ *мм*, встречается редко. В местах зажигания и обрыва дуги механические свойства швов ухудшаются, поэтому минимальную длину рабочих швов целесообразно ограничивать и принимать равной 30 *мм*. Швы меньших размеров применяют лишь в качестве нерабочих соединений.

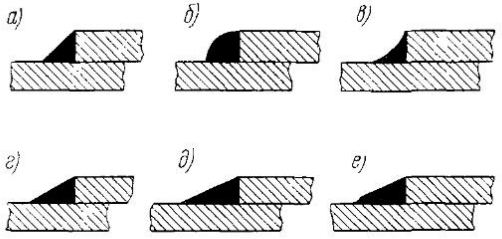


Рис. 4-4. Очертания угловых швов:
а) нормальное; *б*) выпуклое; *в*) вогнутое; *г*) с отношением катетов 1:1,5; *д*) с отношением катетов 1:2; *е*) то же, с обработкой конца шва

Расчет прочности соединений внахлестку. В зависимости от направления угловых швов по отношению к действующему усилию их разделяют на лобовые, косые, фланговые, комбинированные.

Лобовые швы направлены перпендикулярно усилию.

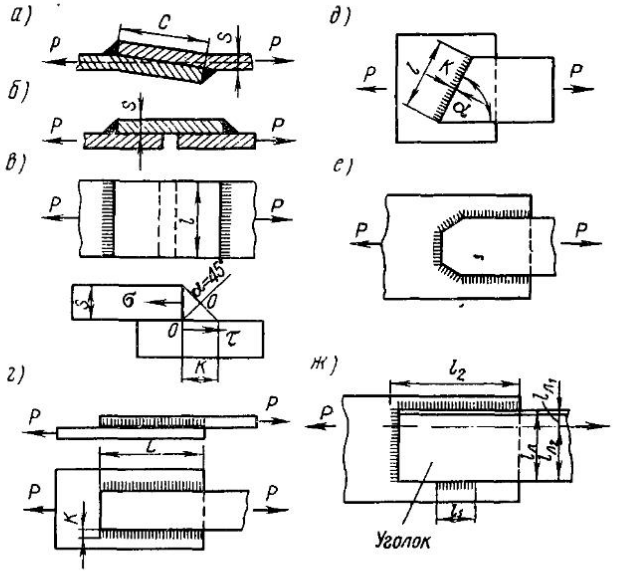


Рис. 4-5. Соединения с лобовыми и фланговыми швами:
а) с двумя расчетными лобовыми швами; *б*) с одним расчетным лобовым швом; *в*) схема усилия в лобовом шве; *г*) фланговые швы; *д*) косой шов; *е*) комбинированное соединение; *ж*) прикрепление уголка

В соединении, показанном на рис. 4-5, *а, б,* усилие передается двумя лобовыми швами. Вследствие эксцентриситета элементы несколько искривляются. Расстояние между лобовыми швами следует принимать $C \geqslant 4s$. На рис. 4-5, *б* усилие P передается через один лобовой шов на накладку; далее это же усилие переходит с накладки на второй лист. Таким образом, в соединении этого рода имеется лишь один расчетный шов.

Рассмотрим расчет прочности угловых швов, сваренных вручную.

В лобовом шве возникает несколько составляющих напряжений (рис. 4-5, *в*): нормальные напряжения σ на вертикальной плоскости, касательные τ и др., определяемые с помощью точных методов расчета прочности.

По методу, принятому в инженерной практике, расчет прочности лобовых швов производится на срез. Этот метод является условным и приближенным. Экспериментальные исследования показывают, что при статических нагрузках и треугольном очертании шва разрушение наступает обычно по наименьшему сечению, совпадающему с биссектрисой $O—O$ прямого угла. По этой плоскости проверяют прочность лобового шва; напряжение при этом не должно превышать $[\tau']$.

Формула определения допускаемого усилия для соединения, состоящего из одного расчетного лобового шва (рис. 4-5, *б*), имеет следующий вид:

$$P = [\tau'] \cdot 0{,}7\ \kappa l, \tag{4.9}$$

где l — длина шва;

κ — катет шва (обычно $\kappa = s$),

а для соединения, приведенного на рис. 4-5, *а*,

$$P = 2\,[\tau'] \cdot 0{,}7\ \kappa l. \tag{4.10}$$

Фланговые швы направлены параллельно усилию (рис. 4-5, *г*). В них возникают два рода напряжений. В результате совместной деформации основного и наплавленного металла во фланговых швах образуются связующие напряжения. Как было указано выше, их не учитывают при определении прочности соединения. По плоскостям соприкосновения валика флангового шва с каждым из листов, а также в самом валике возникают напряжения среза, которые являются рабочими напряжениями соединения.

Расчет прочности швов производится по опасной плоскости среза, совпадающей с биссектрисой прямого угла. Расчетная формула прочности составлена в предположении, что напряжения вдоль флангового шва распределены равномерно.

Для конструкции, приведенной на рис. 4-5, *г*, формула прочности имеет вид

$$P = 2\,[\tau']\,0{,}7\;\kappa l. \qquad (4.11)$$

С учетом концентрации напряжений (см. гл. V) расчетная длина фланговых швов $l \leqslant 50\kappa$.

Косые угловые швы направлены к усилию под некоторым углом α (рис. 4-5, *д*). Их часто применяют в сочетании с лобовыми и фланговыми.

Расчет прочности косых швов производится аналогично описанному выше. Формула прочности имеет вид

$$P = [\tau'] \cdot 0{,}7\;\kappa l. \qquad (4.12)$$

Пример *комбинированных швов* приведен на рис. 4-5, *е*.

Распределение усилий в отдельных швах, составляющих комбинированное соединение, неодинаково. Однако расчет прочности комбинированных соединений производится согласно хорошо известному из курса «Сопротивление материалов» принципу независимости действия сил. В соединении с лобовыми и фланговыми швами формула прочности следующая:

$$P = P_л + P_{фл}, \qquad (4.13)$$

где P — допускаемое усилие для комбинированного соединения;

$P_л$ — допускаемое усилие для лобового шва;

$P_{фл}$ — допускаемое усилие для фланговых швов.

С учетом формул (4.9) и (4.11) формула (4.13) примет вид

$$P = [\tau']\;(0{,}7\;\kappa l_л + 2 \cdot 0{,}7\;l\kappa_{фл}). \qquad (4.14)$$

Если катеты всех швов, входящих в состав комбинированного соединения, равны между собой, то

$$P = [\tau'] \cdot 0{,}7\,\kappa L, \qquad (4.15)$$

где L — длина периметра швов. Этим соотношением пользуются при расчете соединения, показанного на рис. 4-5, *е*.

Некоторую особенность представляет расчет прочности швов, прикрепляющих уголок, работающий под действием продольной силы. Принимаем, что усилие P в уголке действует в плоскости прикрепленной полки (рис. 4-5, *ж*).

Усилие, воспринимаемое лобовым швом,

$$P_л = [\tau'] \cdot 0{,}7\;\kappa l_л, \qquad (4.16)$$

где $[\tau']$ — срезывающее допускаемое напряжение в лобовом шве;

$l_л$ — его длина.

Эксцентриситет приложения силы в расчете не учитывается. Усилие, передаваемое на фланговые швы,

$$P_{фл} = P - P_{л}. \tag{4.17}$$

Величина этого усилия распределяется между швами обратно пропорционально расстоянию от оси уголка до обеих кромок. Таким образом, усилие в шве *1* будет

$$P_1 = P_{фл} \frac{l_{л_1}}{l_л}, \tag{4.18}$$

усилие в шве *2*

$$P_2 = P_{фл} \frac{l_{л_2}}{l_л}. \tag{4.19}$$

При расчете прочности прикреплений равнобоких уголков приближенно можно принять

$$P_1 = 0{,}3\,P_{фл}, \quad P_2 = 0{,}7P_{фл}. \tag{4.20}$$

Касательные напряжения в швах равны

$$\tau_1 = \frac{P_1}{0{,}7\,\kappa l_1}, \quad \tau_2 = \frac{P_2}{0{,}7\,\kappa l_2}. \tag{4.21}$$

Напряжение в каждом из фланговых швов не должно превышать допускаемого $[\tau']$.

Конструктивно можно увеличить длину l_1 относительно размеров, требуемых по расчету прочности, до величины l_2.

При сварке автоматами под слоем флюса угловыми швами основной металл расплавляется на значительную глубину, и соединение принимает вид, приведенный на рис. 4-3, *в*.

Плоскости среза имеют бóльшую величину, чем в швах с такими же размерами κ, но сваренными без глубокого проплавления. Некоторые авторы считают возможным при расчете швов с глубоким проплавлением не учитывать коэффициент 0,7. Тогда расчетная формула будет следующей:

$$P = [\tau']\ \kappa L, \tag{4.22}$$

где L — длина периметра всех угловых швов, входящих в соединение (лобовых, фланговых и косых).

В настоящее время этой формулой не пользуются, и в запас прочности вводят коэффициент 0,7.

СОЕДИНЕНИЯ ВТАВР

Втавр соединяют элементы, расположенные во взаимно перпендикулярных плоскостях. При ручной дуговой сварке соединения втавр выполняют, как правило, без подготовки кромок (рис. 4-6, *а*).

В большинстве случаев швы делают непрерывными, так как при этом они успешно накладываются автоматами.

Эти соединения применяют преимущественно в элементах, работающих на изгиб.

На рис. 4-6, *б* показаны соединения втавр с односторонней подготовкой кромок и подваром при толщине листов от 4 до 26 *мм*, а на рис. 4-6, *в* — с двусторонней подготовкой кромок для элементов толщиной 12÷60 *мм*.

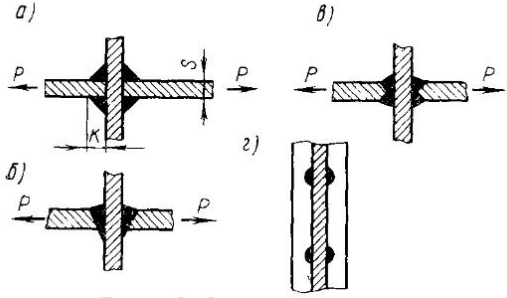


Рис. 4-6. Соединения втавр:
а) без подготовки кромок; *б*) с односторонней подготовкой и подваром; *в*) с двусторонней подготовкой; *г*) точечные дуговые швы

Соединения втавр при автоматической и полуавтоматической сварках существенно не отличаются от соединений, выполняемых вручную.

При работе соединений на растяжение расчетная формула прочности имеет вид:

для соединения, приведенного на рис. 4-6, *а*,

$$P = 2\,[\tau']\cdot 0{,}7\ \kappa l; \qquad (4.23)$$

для соединения, приведенного на рис. 4-6, *б*, *в*,

$$P = [\sigma']_p\, sl, \qquad (4.24)$$

где s — толщина меньшего из соединяемых элементов;
$[\tau']$ — допускаемое напряжение в шве при срезе;
$[\sigma']_p$ — допускаемое напряжение в шве при растяжении.

При работе на сжатие конструкции, изображенной на рис. 4-6, *а*, усилие P в действительности частично передается с горизонтального листа на вертикальный через плоскость соприкосновения листов.

Проверка прочности швов этого соединения производится, исходя из условного предположения, что усилие передается через швы. При этом $[\tau']$ повышается до величины $[\sigma']_{сж}$.

При сварке шланговыми полуавтоматами соединения втавр могут выполняться угловыми точечными швами (рис. 4-6, *г*).

Применение точечных швов целесообразно главным образом в конструкциях с толщиной листов $s = 4 \div 5$ *мм*.

УГЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Угловые соединения, выполняемые дуговой сваркой вручную, показаны на рис. 4-7, *б*.



Рис. 4-7. Угловые соединения

При автоматической и полуавтоматической сварках соединения имеют вид, приведенный на рис. 4-7, *а* ($s=6 \div 14$ *мм*) и на рис. 4-7, *в* ($s=10 \div 40$ *мм*).

Угловые соединения в основном применяют в связующих элементах и расчету на прочность не подлежат.

СОЕДИНЕНИЯ ПРОПЛАВНЫМИ ЭЛЕКТРОЗАКЛЕПКАМИ

Электрозаклепки ставят при соединении листов внахлестку, проплавляя верхний более тонкий лист, в результате чего образуются круглые проплавные сварные соединения (рис. 4-8).

Наложение шва в виде электрозаклепок производится с помощью полуавтомата.

Проплавные электрозаклепки можно получить также сваркой пистолетами в струе аргона.

Соединения электрозаклепками рациональны при толщине верхнего листа не более 5 *мм*.

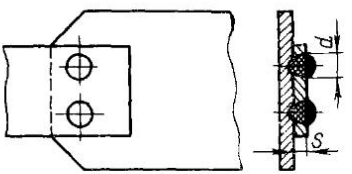


Рис. 4-8. Соединения электрозаклепками

При применении усовершенствованного оборудования с принудительной подачей электродной проволоки в зону дуги можно сваривать проплавными электрозаклепками элементы толщиной 10, 12 *мм* и более.

Проплавление электрозаклепки заменяют просверливанием отверстия в одном из соединяемых листов и заполнением его наплавленным металлом. При этом диаметр отверстия может достигать 40 *мм* и более. Заполнение наплавленным металлом отверстия может производиться не только одной, но и несколькими дугами в среде углекислого газа, под флюсом. Полуавтоматическая установка для постановки электрозаклепок обладает бо́льшей производительностью.

Разработаны установки для сварки электрозаклепками в защитной среде CO_2 различных марок сталей.

Ввиду простоты оборудования и высокой производительности процесса соединения проплавными электрозаклепками весьма экономичны. Их применяют при изготовлении конструкции сельскохозяйственных машин и др.

В значительном большинстве случаев соединения электрозаклепками являются связующими и рабочих усилий не передают. Расчет прочности электрозаклепок, участвующих в передаче усилий, производится аналогично расчету прочности точечных соединений при контактной сварке.

СВАРНЫЕ ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Дуговой электросваркой свариваются практически все алюминиевые сплавы, но свариваемость их различна (табл. 4.9).

Сварные соединения алюминиевых сплавов обладают повышенной чувствительностью к концентраторам напряжений по сравнению с рядом сталей, применяемых в конструкциях. Поэтому к соединениям из алюминиевых сплавов предъявляют ряд требований, обязательных для выполнения. На рис. 4-9 приведены рациональные виды сварных соединений при сварке алюминиевых сплавов.

На рис. 4-10, *а, б* приведены примеры соединений деталей из алюминиевых сплавов разных толщин, сваренных встык при отсутствии эксцентриситета, а на рис. 4-10, *в, г* — при наличии эксцентриситета. Предусмотрены варианты плавных сопряжений швов с основным металлом. Это сделано в целях устранения концентраторов напряжений, могущих оказать вредное влияние на понижение предела прочности соединений.

Соединение, показанное на рис. 4-11, *б,* рационально, так как сварной шов удален от зоны наибольших напряжений, и соединение, приведенное на рис. 4-11, *в,* также целесообразно, так как при этом обеспечена деформируемость конструкции, и это свойство смягчает вредное влияние концентраторов напряжений. Соединение, показанное на рис. 4-11, *а,* менее рационально вследствие малой деформируемости. При изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов рекомендуется применять стыковые соединения, а также соединения, в которых сварные швы расположены в зонах пониженных рабочих напряжений. Целесообразны конструкции повышенной гибкости (деформируемости).

На рис. 4-12 приведены многочисленные примеры рациональных и нерациональных сварных соединений из алюминиевых сплавов. Соединения на рис. 4-12, *а, б, г, ж, з, и, н, о, п, с, т* рациональны, так как сварные швы удалены от зоны резкого изме-

Таблица 4.9

Характеристики свойств некоторых алюминиевых сплавов

Система алюминиевого сплава	Коррозионная стойкость	Технологичность	Свариваемость	Марка сплава
Al (технический)	Высокая	Высокая	Высокая	АД-1
Al — Mn	То же	То же	То же	АМц
Al — Mg	Средне-высокая	Средне-высокая	»	АМг (2,5% Mg)
То же	То же	То же	»	АМг5 (5% Mg)
»	»	»	»	АМг6 (6% Mg)
»	»	»	»	АМг61 (6% Mg)
Al — Mg — Si	»	»	Средняя	АД31
То же	»	»	То же	АД33
»	»	»	»	АД35
»	»	»	»	АВ
Al — Mg — Zn	Средняя	Средняя	Средне-высокая	В92
Al — Cu — Mg	Низкая	То же	Низкая	Д1
То же	То же	»	То же	Д16
Al — Zn — Mg — Cu	»	»	»	В95

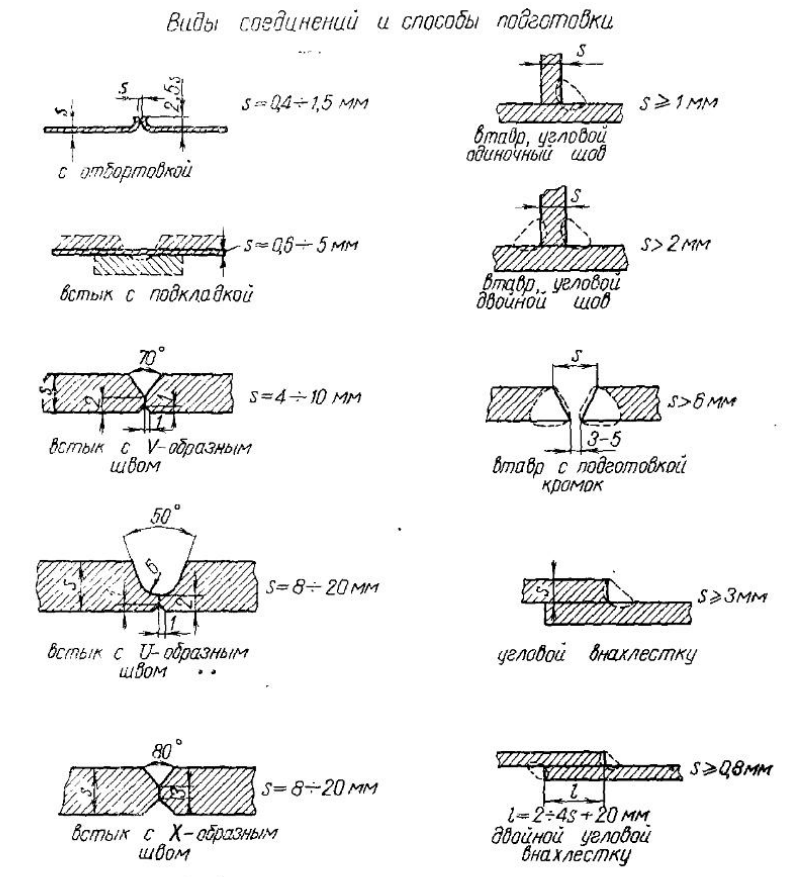


Рис. 4-9. Сварные соединения из алюминиевых сплавов

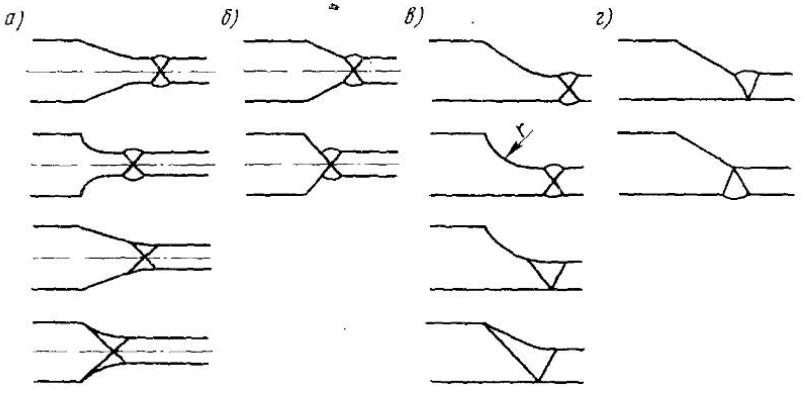


Рис. 4-10. Стыковые соединения алюминиевых сплавов:
а, в) более рациональные; *б, г)* менее рациональные

нения сечений; соединения на рис. 4-12, *в, д, к, р, у* имеют значительную угловую жесткость и находятся в зоне концентрации; в соединениях, показанных на рис. 4-12, *е, ж, л, м*, обеспечена

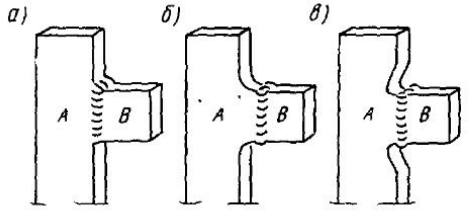


Рис. 4-11. Примеры менее рациональных (*а*) и более рациональных (*б, в*) соединений алюминиевых сплавов

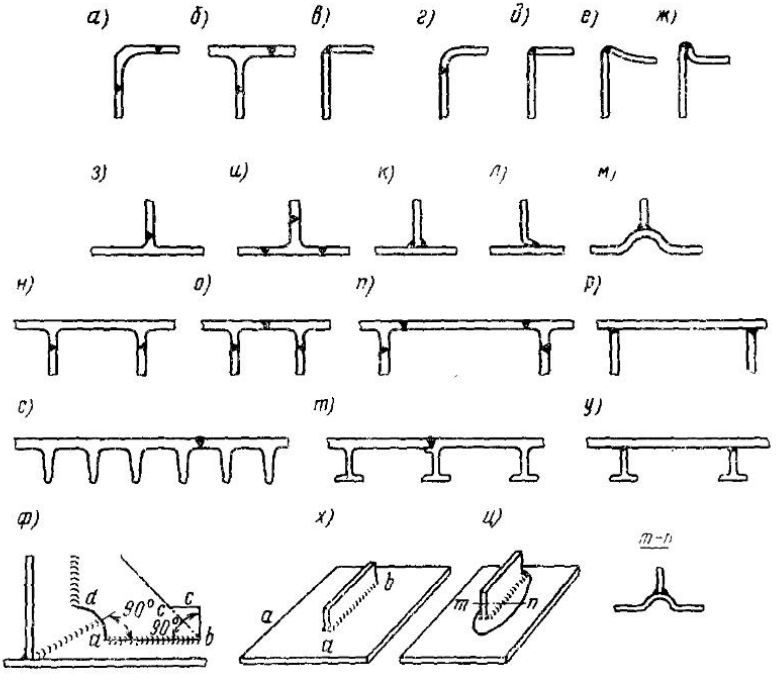


Рис. 4-12. Виды элементов алюминиевых конструкций

повышенная деформируемость. Рациональны соединения с повышенной деформируемостью (рис. 4-12, *ф, ц*), а менее рациональные показаны на рис. 4-12, *х, у*.

§ 6. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ КОНТАКТНОЙ СВАРКОЙ

СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

Контактная стыковая сварка имеет огромное распространение в различных конструкциях. Особенно эффективно ее применение при сварке изделий в массовом производстве, например, арматуры железобетона, типизированных конструкций рам, продольных стыков труб и т. п. Хорошо свариваются конструкции из малоуглеродистых, углеродистых, низколегированных и некоторых высоколегированных сталей с поперечными сечениями малых, средних и больших размеров до нескольких сот квадратных сантиметров.

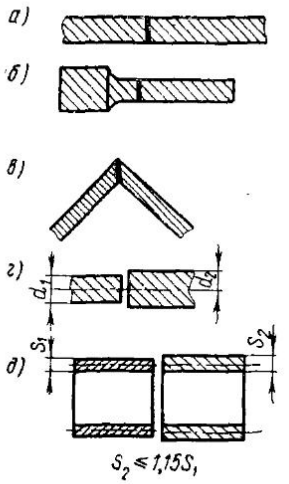


Рис. 4-13. Соединения при стыковой контактной сварке:

а, б) плоскости стыков перпендикулярны осям; *в)* под углом к оси; *г, д)* соединения при разных размерах поперечных сечений

Контактным способом соединяют встык элементы с круглыми, квадратными, прямоугольными, трубчатыми, профильными (уголки, тавры, рельсы и т. д.) сечениями. С увеличением периметра детали и уменьшением ее толщины процесс сварки усложняется. Наиболее хорошо соединяются элементы одинакового поперечного сечения (рис. 4-13, *а, б, в*). Диаметры соединяемых элементов круглого сечения d_1 и d_2 (рис. 4-13, *г*), а также толщины труб s_1 и s_2 (рис. 4-13, *д*) по возможности не должны отличаться друг от друга более чем на 15%.

Контактная стыковая сварка конструкций производится методами сопротивления и оплавления. Для соединений массивных профилей рельсов, толстостенных труб, валов и т. п. Институтом электросварки имени Е. О. Патона разработан автоматизированный способ сварки непрерывным оплавлением. На установках, имеющих относительно малый вес и небольшую мощность источника питания, сваривают элементы больших сечений в течение малого времени.

При контактной стыковой сварке площади поперечного сечения и моменты сопротивления сварного стыка и элемента примерно равны между собой. Предельные величины площади поперечного сечения свариваемых элементов зависят от мощности машин. Специальный расчет прочности стыков, сваренных контактным способом и работающих под статической нагрузкой, не

производится. Прочность стыка обеспечивается прочностью самого элемента. Стыковой контактной сваркой сваривают различные сорта сталей и цветных сплавов.

СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

Электрическую контактную точечную сварку применяют в соединениях конструкций вагонов, тепловозов, электровозов, в сельскохозяйственных машинах (комбайнах, сеялках, косилках, тракторах и т. п.), авиационных конструкциях, арматуре из железобетона, в приборостроении.

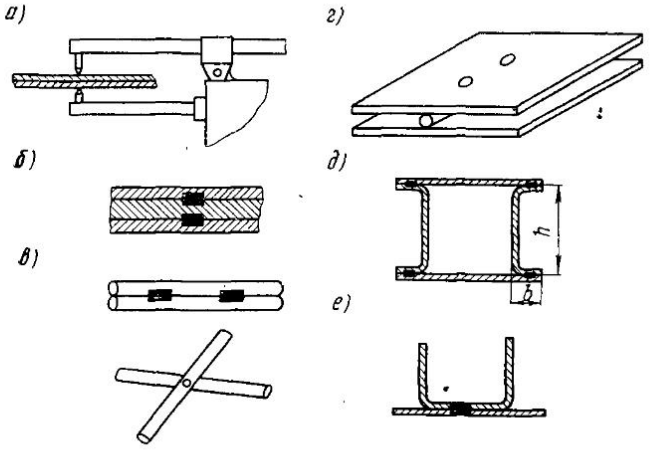


Рис. 4-14. Примеры соединений при точечной сварке:
а, б) плоские заготовки; *в, г)* цилиндрические заготовки; *д)* рациональное соединение; *е)* нерациональное соединение

В большинстве случаев точечной сваркой сваривают изделия при условии расположения электродов с двух сторон относительно свариваемых частей. Это предъявляет определенные требования к габариту конструкций. Разработаны установки, позволяющие производить точечную сварку при одностороннем расположении обоих электродов.

Точечная сварка хорошо соединяет между собой две детали из тонкого листового металла (рис. 4-14, *а*). Не рекомендуется допускать точечных соединений элементов, у которых отношение бóльшей толщины к меньшей $\geqslant 3$. Точечной сваркой можно сваривать также три детали и более. При трех деталях следует элемент бóльшей толщины укладывать между двумя с меньшей толщиной (рис. 4-14, *б*).

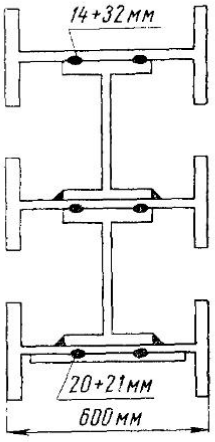


Рис. 4-15. Поперечное сечение колонны, сваренной точечной сваркой

Контактной точечной сваркой наиболее часто соединяют элементы, имеющие малые толщины от долей до нескольких миллиметров. Хорошо свариваются прочные и высокопрочные углеродистые стали, различные сплавы, в частности, алюминиевые, титановые и др.

Современные точечные машины позволяют соединять элементы различных машин. В табл. 4.10 приведены примеры точечных соединений элементов разных толщин в зависимости от диаметра электрода машин.

Таблица 4.10

Примеры точечных соединений элементов разных толщин

Толщины s соединяемых элементов, *мм*		Диаметр электрода машины, *мм*
два элемента	три элемента	
3÷3	От 3+3+3 до 3+6+3	12
6÷6	От 6+6+6 до 6+12+6	18
10÷10	От 10+10+10 до 10+20+10	24
15÷15	От 15+15+15 до 15+30+15	30
20÷20	20+20+20	30

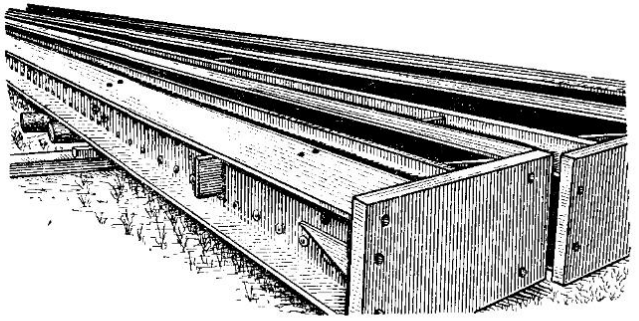


Рис. 4-16. Стойка, сваренная точечной сваркой

На рис. 4-15 изображено поперечное сечение колонны, соединенной точечной сваркой, на рис. 4-16 показана мощная колонна, а на рис. 4-17 — крупные металлоконструкции.

Точечной сваркой сваривают фюзеляж самолета «Каравелла»; всего в самолете около 150 тысяч сварных точек. Материал — алюминиевый плакированный сплав. Пример сварных соединений арматуры приведен на рис. 4-18.

Сварными точками соединяют между собой не только плоские, но и цилиндрические детали (см. рис. 4-14, *в*), стержни круглого сечения с пластинами и т. п. (см. рис. 4-14, *г*). Весьма целесообразны для сварки точками заготовки, имеющие открытые профили или с отбортовкой (см. рис. 4-14, *д*). На рис. 4-14, *е* приведена заготовка, менее рациональная для точечной сварки,

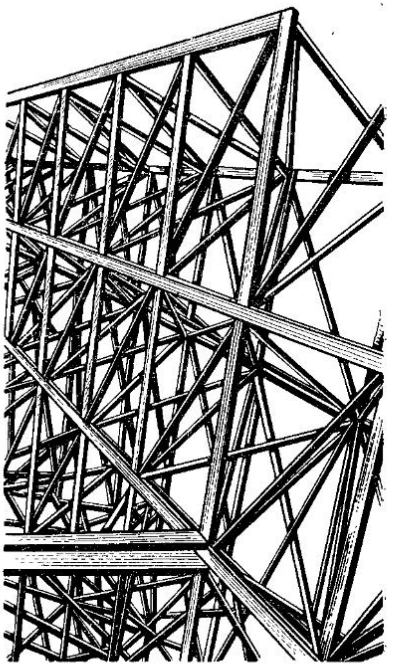


Рис. 4-17. Фермы, сваренные точечной сваркой

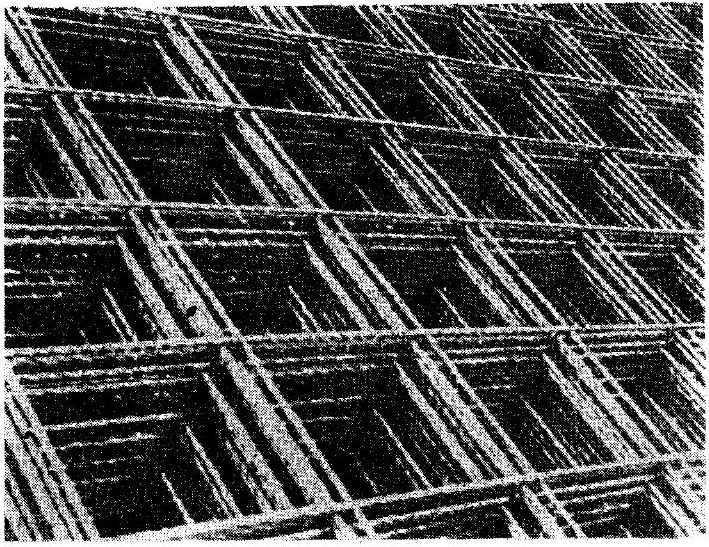


Рис. 4-18. Арматура железобетона, сваренная точками

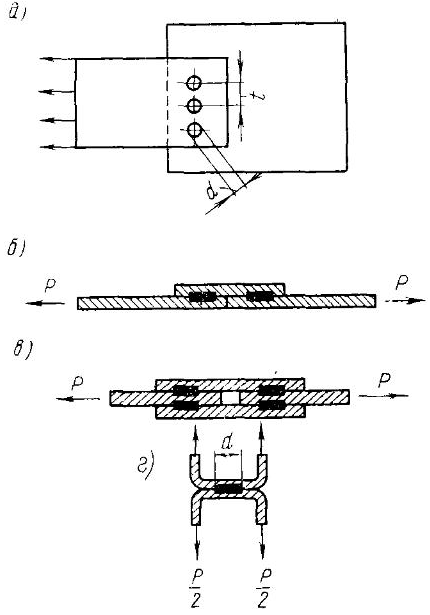


Рис. 4-19. Точечное соединение, работающее на срез и отрыв:

а) расположение точек; *б*) односрезные точки; *в*) двусрезные точки; *г*) работа на отрыв

так как большая масса металла вводится в контур вторичной цепи, вследствие чего увеличивается индуктивное сопротивление машины.

Расстояние между центрами точек в соединении, называемое *шагом* t (рис. 4-19, *а*), должно быть не меньше некоторой предельной величины, которая ограничивается явлением шунтирования тока. *Шунтированием тока* при точечной сварке называют прохождение части тока при сварке заданного соединения через ранее сваренную точку. Чем больше расстояние между сварными точками, тем меньше шунтирование тока, а следовательно, стабильнее и лучше результаты сварки. Диаметр d точки назначается в зависимости от толщины соединяемых элементов с учетом обеспечения высококачественного технологического процесса. Диаметр электрода $d_э$ контактной машины подбирается в функции d. Как правило, $d=(0{,}8\div 1)d_э$.

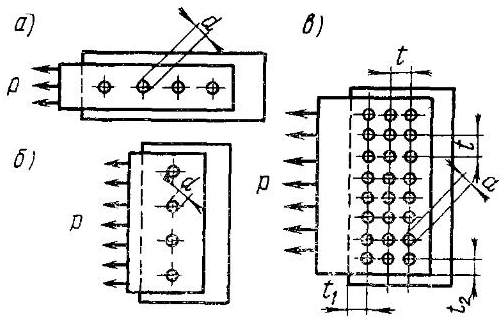


Рис. 4-20. Соединения с несколькими точками: *а*) продольное расположение; *б*) поперечное; *в*) смешанное

Для стальных свариваемых деталей диаметр сварной точки рекомендуется

$$d = 1{,}2\,s + 4 \text{ мм при } s \leqslant 1{,}5 \div 3 \text{ мм},$$

$$d = 1{,}5\,s + 5 \text{ мм при } s \geqslant 3 \text{ мм},$$

где s — наименьшая толщина свариваемых частей.

В некоторых случаях строительные конструкции имеют диаметр точек около $3{,}5s$ и более. Сварка таких точек производится на низкочастотных машинах.

В сварном точечном соединении приняты следующие обозначения (рис. 4-20): t — шаг точек; t_1 — расстояние от центра сварной точки до края детали в направлении действия силы; t_2 — расстояние от центра сварной точки до свободной кромки в направлении, перпендикулярном действию силы; t_1 и t_2 нормируются с учетом технологических и силовых факторов.

Нередко при конструировании принимают размеры диаметра точки, нахлестки, отбортовки, шага, указанные в табл. 4.11 и 4.12. Можно руководствоваться следующими рекомендациями и принимать: $t=3d$; $t_1=2d$; $t_2=1{,}5d$.

Таблица 4.11

Рекомендуемые размеры диаметра точек

Толщина s наиболее тонкой детали пакета, *мм*	*Минимальный диаметр ядра точки d, мм*		
	Малоуглеродистые и низколегированные стали	Нержавеющие и жаропрочные стали, титан	Легкие сплавы
0,3	2,0	2,5	—
0,5	2,5	2,5	3,0
0,6	2,5	3,0	—
0,8	3,0	3,5	3,5
1,0	3,5	4,0	4,0
1,2	4,0	4,5	5,0
1,5	5,0	5,5	6,0
2,0	6,0	6,5	7,0
2,5	6,5	7,0	8,0
3,0	7,0	8,0	9,0
4,0	9,0	10,0	12,0

В практике иногда применяют следующее соотношение между t, s и d:

$$d = 1{,}4\ (\sqrt{0{,}01\,t^2 + ts} - 0{,}1\,t). \qquad (4.25)$$

Таблица 4.12

Рекомендуемые параметры сварных точечных соединений малоуглеродистых и легированных сталей, *мм*

Толщина наиболее тонкой детали пакета	Минимальная ширина нахлестки или отбортовки		Рекомендуемое расстояние		Минимальное расстояние от центра сварной точки до кромки нахлестки
	при однорядном шве	при двурядном шве	между рядами сварных точек	между сварными точками (шаг)	
0,5	10	16	6	15	5
0,8	10	18	8	18	5
1,0	12	20	8	20	6
1,2	14	22	8	22	7
1,5	16	24	8	25	8
2,0	18	28	10	30	9
3,0	20	37	16	40	10
1,0	24	42	18	50	12

Для улучшения качества соединений точечную сварку иногда заменяют рельефной, при этом более точно фиксируется зона пропускания тока, уменьшается эффект шунтирования. На рис. 4-21, *а* изображены примеры рельефов деталей, на рис. 4-21, *б* — процесс формирования точки при рельефной сварке. Размер точки определяется рельефами и применяемыми режимами сварки. Допускаемые усилия в точках при рельефной сварке определяются опытным путем.

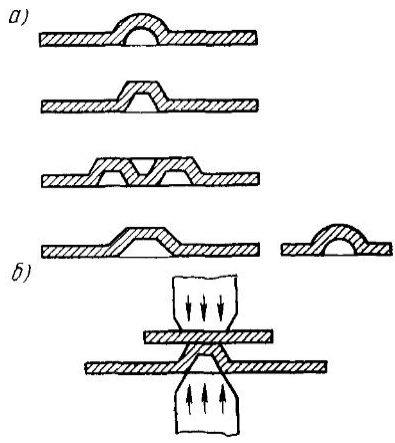


Рис. 4-21. Соединения при рельефной сварке:

а) виды соединений; *б*) процесс формирования точек

Точки в сварном соединении следует располагать таким образом, чтобы они воспринимали преимущественно усилия среза, а не отрыва.

На рис. 4-22, *а* изображена конструкция, свариваемая изогнутым электродом, трудно выполнимая для сварки на точечной машине, а на рис. 4-22, *б* изображен рациональный узел.

На рис. 4-23 конструкция левая нерациональная, точки в ней работают на отрыв; правая рациональная — точки работают на срез.

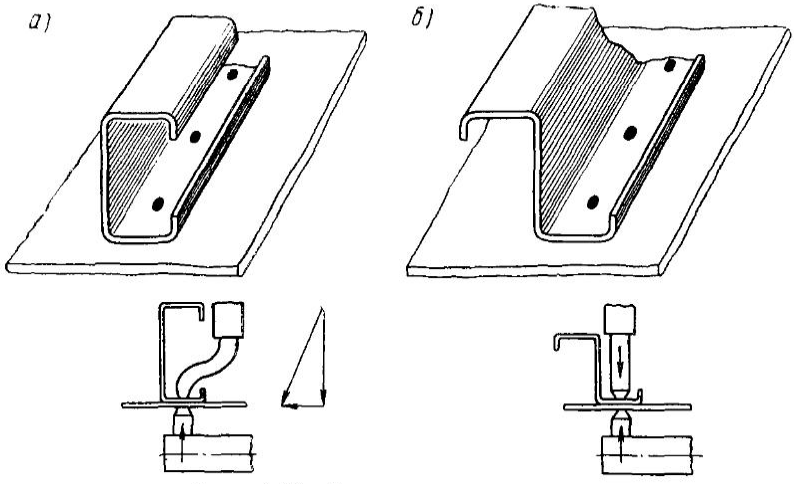


Рис. 4-22. Узлы, сваренные точками:

а) нерациональная конструкция; *б*) рациональная конструкция

Рекомендуется использовать штампованные детали и уменьшать объем сварочных работ.

В соединении, изображенном на рис. 4-19, расчет прочности точки производится на срез. Сварные точки могут быть односрезными (рис. 4-19, *б*) и двусрезными (рис. 4-19, *в*).

Расчетное напряжение:

в односрезной точке

$$\tau = \frac{4P}{\pi d^2} \leqslant [\tau']; \tag{4.26}$$

в двусрезной точке

$$\tau = \frac{2P}{\pi d^2} \leqslant [\tau'], \tag{4.27}$$

где $[\tau']$ — допускаемое напряжение в точке при срезе;

d — диаметр точки;

P — усилие, передаваемое на одну точку.

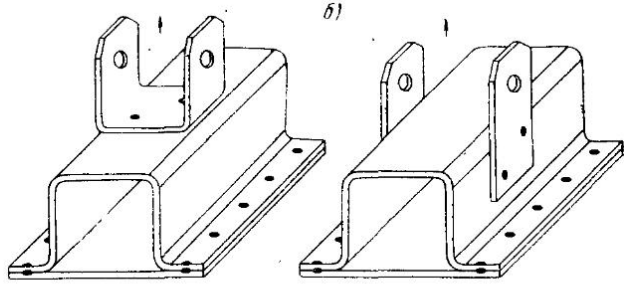


Рис. 4-23. Детали, сваренные точечной сваркой:

а) нерациональные конструкции; *б*) рациональные конструкции

В действительности, в точечном соединении могут иметь место две формы разрушения: срез точек и разрыв основного металла в зоне соединения. Увеличение диаметра точки повышает ее сопротивление срезу; увеличение толщины детали повышает сопротивление основного металла разрыву. Соотношения между диаметром точки и толщиной металла подбираются из условия, чтобы точечное соединение было равнопрочно срезу и отрыву. При назначении диаметра согласно табл. 4.11 и формуле (4.25) расчет прочности точек можно производить только на срез. При работе сварной точки на отрыв, например, в конструкции, изображенной на рис. 4.19, *г*, расчетное напряжение будет

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2} \leqslant \sigma_0', \tag{4.28}$$

где σ_0' — допускаемое напряжение в точке при отрыве.

Допускаемое напряжение в точке (см. стр. 37) при отрыве следует принимать еще более низким, нежели $[\tau']$. При этом целесообразно пользоваться данными экспериментов.

Для легированных сталей и цветных сплавов допускаемое напряжение в точечных соединениях принимается на основе результатов экспериментов с учетом условий загружений и других факторов.

Расчет прочности точечных соединений, приведенный выше, условный. Разрушающее усилие на точку не всегда является квадратной функцией от ее диаметра, как это следует из расчета, а зависит от ее физико-механических свойств.

Точечные соединения, как правило, имеют несколько сварных точек. Их располагают в различных направлениях по отношению к усилию. Расположение, указанное на рис. 4-20, *а*, называют *продольным,* а на рис. 4-20, *б* — *поперечным.*

Практически наиболее часто соединения конструируются смешанными, так как один поперечный ряд неравнопрочен с соединяемым элементом (см. рис. 4-20, *в*).

Напряжение в точке соединения, изображенного на рис. 4-20, *в*, определяется в условном предположении, что все точки работают равномерно,

$$\tau = \frac{4P}{i\pi d^2} \leqslant [\tau'], \qquad (4.29)$$

где i — число односрезных сварных точек в соединении.

Если точки двусрезные, то i — общее число плоскостей среза в соединении. С учетом неравномерного распределения усилий между точками допускаемое напряжение $[\tau']$ в сложном соединении целесообразно снизить на 10÷20%.

Очень часто в конструкциях сварные точки являются связующими и рабочих напряжений не передают. Например, при формировании профилей элементов конструкций, которые воспринимают продольное усилие, точки служат для связи между отдельными частями. Соединения обшивок с каркасом также часто осуществляют точками, которые не воспринимают рабочих усилий. Указанные точки при статических нагрузках в большинстве случаев не оказывают существенного влияния на прочность. Примеры сварки профильных элементов точками приведены на рис. 4-24.

На рис. 4-24 в первом вертикальном ряду даны точечные соединения, особенно удобные для сварки, во втором ряду — удобные, в третьем — не вполне удобные, в четвертом — трудные.

СОЕДИНЕНИЯ ПРИ РОЛИКОВОЙ СВАРКЕ

Роликовая контактная сварка допускает возможность соединений элементов малых толщин от долей миллиметра до $\Sigma s = 6—7$ *мм* деталей из стальных и цветных сплавов,

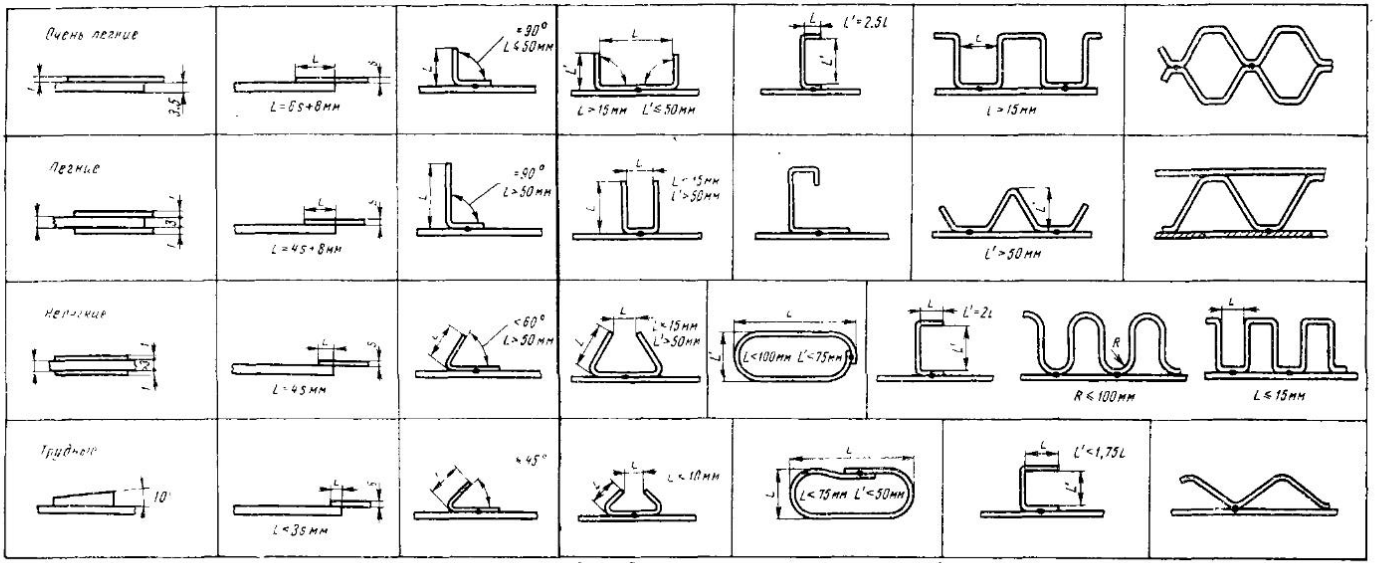


Рис. 4-24. Примеры соединений при точечной сварке:

верхний ряд — очень удобные соединения для сварки; средний верхний — удобные; средний нижний — недостаточно удобные; нижний — неудобные

применяемых главным образом в приборостроении. Роликовой сваркой, как правило, соединяют изделия при возможности подведения роликов с обеих сторон соединяемых частей, но можно производить сварку и при одностороннем их расположении.

При роликовой сварке между соединяемыми элементами образуется шов путем постановки ряда точек, перекрывающих друг друга. Типы соединений при роликовой сварке изображены на рис. 4-25.

Нахлесточные соединения образуют в соединениях эксцентриситеты, в результате которых возникают, помимо основных продольных сил, изгибающие моменты. При этом прямолинейные элементы (рис. 4-25, *г*) несколько искривляются (рис. 4-25, *д*).

Элементы, свариваемые роликовой сваркой, имеют малые толщины ($s \leqslant 2 \div 3$ *мм*), поэтому влияние изгибающего момента незначительно и его не учитывают при расчете прочности.

Напряжения в швах при роликовой сварке определяют по усилию среза

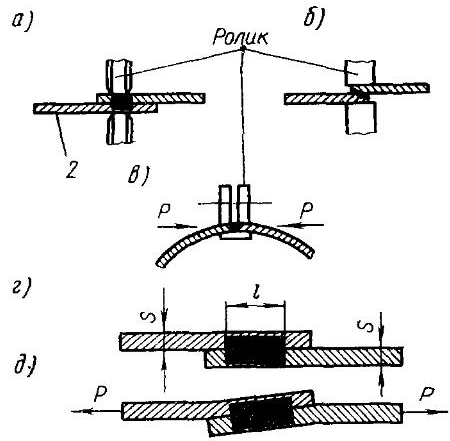


Рис. 4-25. Соединения при роликовой сварке:

а) внахлестку без скоса кромок; *б*) внахлестку со скосом кромок (редко применяемые); *в*) встык без подготовки кромок (редко применяемые); *г*) после сварки; *д*) после приложения растягивающей силы

$$\tau = \frac{P}{la}, \qquad (4.30)$$

где P — действующая в соединении сила;

l — ширина шва;

a — длина шва.

§ 7. СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТОДАХ СВАРКИ

СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ

Электрошлаковая сварка является одним из прогрессивных бездуговых процессов сварки. Она обеспечила создание комбинированных прокатно-лито-ковано-штампованных изделий, соединяемых в единый агрегат. Этот метод позволяет осуществ-

лять соединения при отсутствии подготовки кромок и при предельно экономном расходовании флюсов и присадочного металла. Укладка швов производится в вертикальном положении. Этим способом хорошо свариваются конструкции рам, барабанов, крупных машиностроительных узлов, изделий металлургического комплекса и т. п. из углеродистых сталей.

При электрошлаковой сварке соединения выполняют встык, в угол и втавр. Нередко эти соединения являются связующими, но их применяют и в качестве рабочих. Электрошлаковой сваркой соединяют в основном элементы, имеющие толщины от 30 до 1000 *мм* и более, но в некоторых случаях этим же способом сваривают и меньшие толщины.

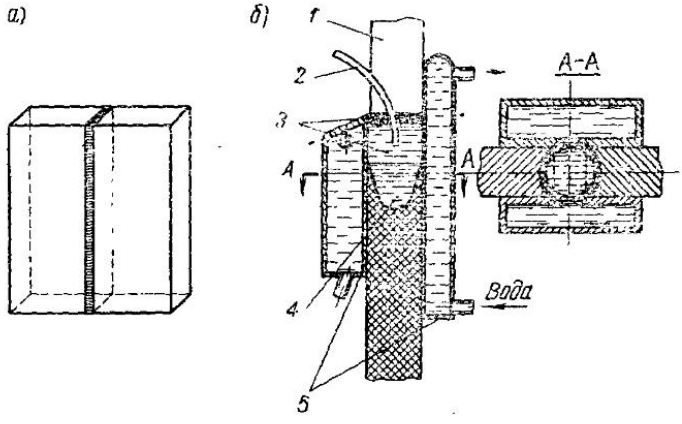


Рис. 4-26. Соединения при электрошлаковой сварке:

а) пример шва; *б*) схема формирования; *1* — изделие; *2* — электрод, *3* — флюс, *4* — металл шва, *5* — формы

Этим методом соединяют между собой листы, плиты, тела круглого сечения, толстостенные трубы (например, пустотелые валы) и т. п.

Электрошлаковой сваркой можно соединять различные марки сталей: малоуглеродистые, углеродистые, низколегированные и др. Она не требует скоса кромок, очень производительна и экономична (мало расходуется присадочной проволоки и флюсов). Однако конструкции, сваренные электрошлаковой сваркой, при большой толщине стенок, часто приходится подвергать термической обработке: отпуску и нормализации для снятия остаточных напряжений и улучшения структуры. Это несколько удорожает производство.

Освоена электрошлаковая сварка элементов большой толщины из кремнемарганцовистой и высокохромистой, а также дру-

гих легированных сталей. Пластические свойства сварных соединений в конструкциях, отпущенных при $T=600°$ С, соответствуют пластическим свойствам основного металла.

Хорошо соединяются электрошлаковой сваркой детали из титановых сплавов ВТ5-1 и др. Металл шва и околошовная зона имеют $a'_н=5{,}5—5{,}7$ *кГ·м/см²*. Отжиг существенным образом не меняет механических характеристик.

Электрошлаковой сваркой соединяют алюминиевые сплавы марок АД, АМг6, АцМ и др.; электродами при этом служат пла-

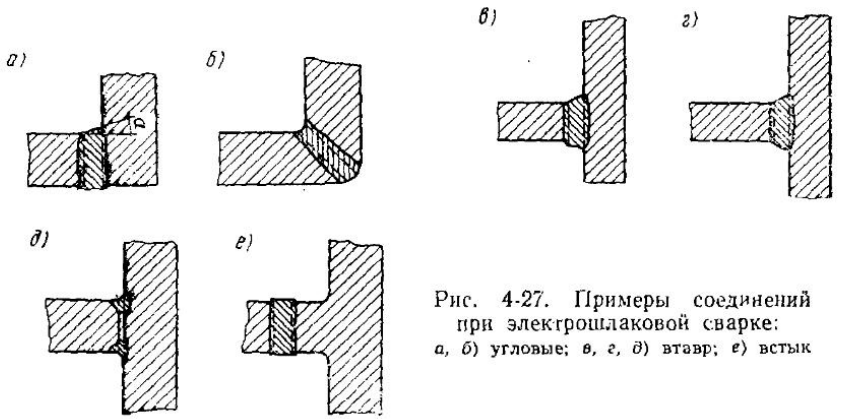


Рис. 4-27. Примеры соединений при электрошлаковой сварке:
а, б) угловые; *в, г, д)* тавр; *е)* встык

стины толщиной 8—20 *мм*. Этим способом успешно сваривают элементы толщиной свыше 100 *мм*; $\sigma_в$ основного сплава АМг6 составляет 30 *кГ/мм²*, прочность же сварного соединения $\sigma_в$ — около 90% $\sigma_в$.

На рис. 4-26 приведен пример соединения, выполненного электрошлаковой сваркой.

В большинстве случаев расчет швов при электрошлаковой сварке не отличается от проверки напряжений в основном элементе конструкции, так как площадь шва бывает при этом эквивалентной площади основного металла. Приходится лишь в некоторых случаях в месте стыков понижать допускаемое напряжение. Примеры соединений (угловых и тавровых), полученных электрошлаковой сваркой, приведены на рис. 4-27.

СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ

Некоторые изделия сваривают методом трения. Метод эффективен, так как при этом расходуется малое количество энергии. Зона разогрева имеет небольшую протяженность,

а соединения — достаточно высокую прочность. Этим методом сваривают инструменты, например, при приварке режущей части к державке из поделочной стали, при изготовлении закладных частей арматуры железобетона, при сварке некоторых трубных изделий и т. п.

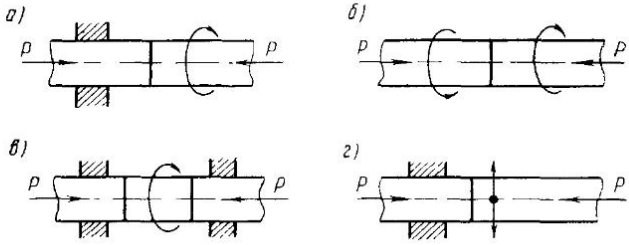


Рис. 4-28. Схема сварки трением:

а) при вращении одной детали; *б)* при вращении обеих деталей; *в)* сварка во вращающихся подставках; *г)* при поступательно-возвратном движении

Сварка трением производится согласно одной из схем, изображенных на рис. 4-28. В процессе относительного вращения деталей торцы соединяемых элементов разогреваются. При достижении нужной температуры они сдавливаются. Эта сварка может применяться для соединений различных металлов. Хорошо соединяются между собой не только однородные, но и разнородные металлы, например: сталь+медь+алюминий и т. п.; трубы из алюминиевого сплава АМц с трубой из нержавеющей стали 1Х18Н9Т. Предел прочности соединений этого вида $\sigma_в = 12$ *кГ/мм*^{2}, угол изгиба $\alpha' = 180°$.

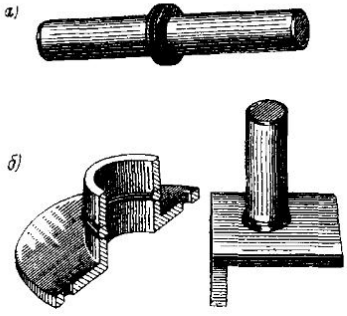


Рис. 4-29. Примеры сварки трением:

а) встык; *б)* втавр

При сварке трением обеспечивается получение соединений, сваренных встык и втавр (рис. 4-29), с высокими механическими свойствами. Расчетные напряжения в сварном соединении при этом оказываются эквивалентными напряжениям в основном металле. Допускаемые напряжения устанавливаются на основе специальных опытов.

СОЕДИНЕНИЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКЕ

Сварка ультразвуком металлов имеет некоторое применение в приборостроении. Наиболее хорошо свариваются ультразвуком алюминиевые сплавы. При сварке ультразвуком изделий точками и роликовым швом сварные соединения получаются достаточно удовлетворительными. При ультразвуковой сварке соединяются поверхностные слои металла, освобожденные от окисных пленок и адсорбированных газов (рис. 4-30).

Способность ультразвуковых колебаний разрушать поверхностные пленки создает возможность сварки металлов с защитными покрытиями. Ультразвуком соединяются пластичные металлы: алюминий, медь, аустенитная сталь, тантал и др. Возможно сваривание неметаллических материалов, например керамики.

Ультразвуком сваривают элементы малых толщин, как правило, не свыше 1÷2 *мм* и особенно хорошо соединяются очень тонкие элементы. Возможна приварка тонкого элемента к толстому.

При ультразвуковой сварке применяют точечные и роликовые соединения, аналогичные контактной сварке. Расчет прочности производят на срез так же, как и расчет соединений, выполненных контактной сваркой. Допускаемые напряжения определяют на основе специальных экспериментов.

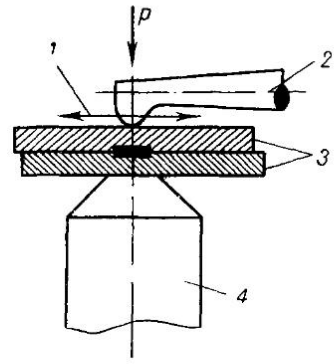


Рис. 4-30. Схема ультразвуковой сварки металлов:

1 — колебания; *2* — волновод; *3* — детали; *4* — опора (колебания волновода параллельны стыкуемым плоскостям)

Механические свойства соединений, полученных ультразвуковой сваркой, зависят от технологического процесса: времени пропускания ультразвука, обжатия при заданной толщине соединяемых частей и свойств материала. На рис. 4-31 приведена зависимость прочности сварных соединений алюминия от усилия *P* и длительности процесса.

СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ

Диффузионная сварка позволяет соединять различные металлы, неметаллические материалы и металлы с неметаллическими материалами. Сварка производится в вакуумных камерах при сжатии соединяемых металлов и их нагреве, который не достигает температуры плавления металлов. Поэтому в таких сварных

соединениях не наблюдается существенных изменений физико-механических свойств по сравнению с металлами. Очень большое влияние на механические свойства соединений оказывает температура нагрева, удельное давление на контактных поверхностях, величина вакуума в камере, способ подготовки поверхностей, продолжительность процесса и т. п.

Способ диффузионной сварки позволяет осуществить многообразные формы соединений: по плоскости (например, при сварке резцов), конической поверхности (корпуса радиоламп),

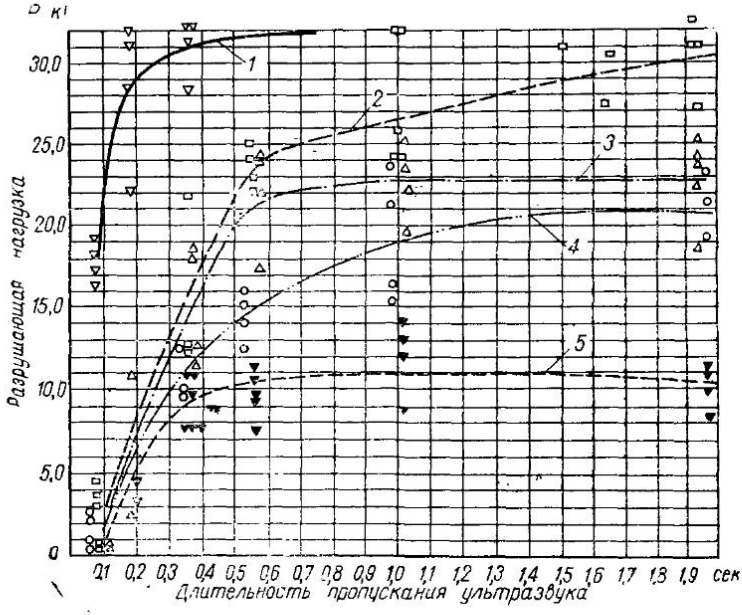


Рис. 4-31. Зависимость прочности сварных точек алюминия от длительности пропускания ультразвука при разных P:

1 — P=100 кГ; 2 — P=40 кГ; 3 — P=20 кГ; 4 — P=10 кГ; 5 — P=5 кГ

цилиндрической поверхности (подпятники). Пуансон создает необходимое удельное давление на контактных поверхностях. Возможны также соединения по поверхностям (облицовка труб), по сложным рельефным поверхностям и т. п.

Определение расчетных напряжений в соединениях при этом способе сварки производится так же, как и в элементах основной конструкции. Допускаемые напряжения должны быть назначены согласно проведенным специальным экспериментам.

СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ СВАРКЕ

Холодной сваркой называют процесс соединения металлов в пластическом состоянии без нагрева путем осадки. Наилучшим образом соединяются холодной сваркой металлы с кубической гранецентрированной структурой, обладающие хорошими пластическими свойствами: алюминий, медь и их сплавы, аустенитная сталь и т. д. Вакуум значительно улучшает условия холодной сварки. Чтобы осуществить холодную сварку, необходимо удалить слой металла на поверхности и привести в соприкосновение слои, лежащие под поверхностными.

Процесс холодной сварки происходит следующим образом: сначала под большим давлением в металле образуются пластические деформации, сопровождающиеся разрушением поверхностного слоя и выделением газов, окислов, загрязнений; далее зерна сращиваются. В этой зоне повышается предел прочности, текучести, снижается пластичность. Процесс осуществляется в течение очень малого промежутка времени.

Стыковой сваркой соединяют элементы малых, средних и больших сечений площадью до 100 $см^2$ и выше. Для удаления вредных жировых загрязнений применяют нагрев до 400—450° в течение нескольких десятков минут и зачистку, например, проволочной щеткой. Количество потребляемой энергии при холодной сварке в десятки раз меньше, чем при контактной.

При холодной сварке соединения выполняют встык и внахлестку.

Соединения встык при холодном способе сварки осуществляют следующим образом. Элементы, подлежащие стыкованию, например, стержни круглого сечения, проволоку и т. п. закрепляют в специальных приспособлениях. Их торцы предварительно очищают от загрязнений и масла, а затем элементы сдавливают (рис. 4-32, *а*). Соединение происходит при значительных пластических деформациях. Так как в зоне стыка имеет место наклеп, то при рационально выбранных режиме и технологии очистки получаются соединения, по прочности эквивалентные целым элементам.

Разновидностью стыковой сварки является сварка сдвигом. Детали обжимаются при небольших давлениях и подвергаются воздействию касательных усилий. Под влиянием касательных усилий происходит развитие пластических деформаций, способствующих сращиванию.

Схема точечной холодной сварки изображена на рис. 4-32, *б, в, г*: *1* — свариваемые листы, *2* — пуансоны. При углублении пуансона *2* начинается пластическая деформация. Под пуансоном металл растекается, при этом площадь соприкосновения растет. Форма сварной точки бывает различной, ее площадь больше площади пуансона. Так как при постановке точки металл

уплотняется, в ее зоне образуются вмятины двусторонние или односторонние. Иногда применяют многоточечные штампы, которые ставят группу точек за один ход пресса.

Если заменить точечные пуансоны роликовыми, то можно получить холодной сваркой шовное соединение, применяемое в производстве труб.

Соединения холодной сварки могут быть рабочими и связующими. Точечная и роликовая холодные сварки чаще применяют в связующих или слабо напряженных соединениях, так как вдавливание вызывает концентрацию напряжений.

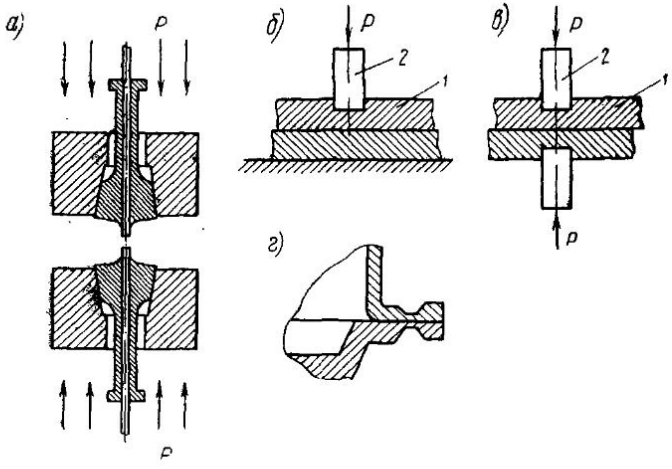


Рис. 4-32. Соединения при холодной сварке:
а) встык проволоки; *б, в, г*) внахлестку плоских элементов

Несущая способность точечной и роликовой холодных сварок устанавливается экспериментально с учетом свойств металлов и технологии производства работ.

Холодная сварка встык часто позволяет получить соединения, равнопрочные металлу.

Расчет прочности соединений, сваренных холодным способом встык, может не производиться вовсе, так как их свойства часто не отличаются от основных элементов.

Расчет прочности сварных точек в соединениях внахлестку производится на срез, аналогично электрозаклепкам. Работа на отрыв таких точек недостаточно удовлетворительна. Наиболее целесообразно применять точки в связующих или рабочих соединениях при действии статических нагрузок. Допускаемые напряжения назначаются по опытным данным.

Холодная сварка начинает получать распространение в электровакуумном машиностроении, электротехнике, а также в строительстве: при декоративных отделках, изготовлении оконных рам и т. п.

СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

Электронно-лучевая сварка производится почти всегда в вакууме в специальных камерах. Поэтому ее применяют лишь в тех случаях, когда необходимо обеспечить весьма хорошую защиту сварочной ванны от попадания в нее азота, кислорода и т. д. Эту сварку применяют для тугоплавких и активных металлов, например: тантала, циркония, молибдена и др. С расширением применения электронно-лучевой сварки на заводах может оказаться целесообразным и использование ее для некоторых марок титановых и алюминиевых сплавов, а также для соединений разнородных металлов.

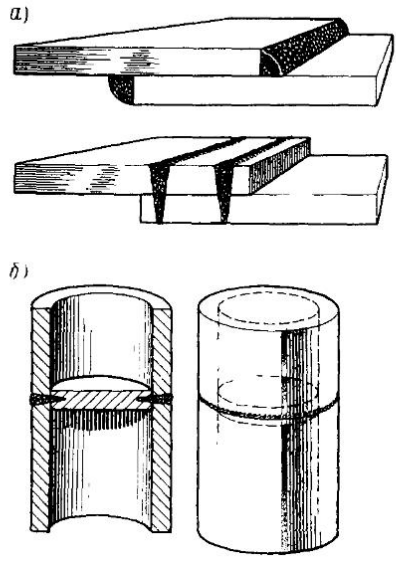


Рис. 4-33. Соединения при электронно лучевой сварке:
а) внахлестку, *б*) встык

При электронно-лучевой сварке источник тепла имеет концентрированный характер, поэтому зона проплавления приобретает весьма малую ширину. На рис. 4-33 показаны примеры проплавления металла при укладке шва электронно-лучевой сваркой. Благодаря относительно высокой степени вакуумирования камеры ($10^{-3} \div 10^{-4}$ *мм рт. ст.*) механические свойства сварных соединений при этом способе сварки оказываются высокими. Этой сваркой элементы сваривают встык и внахлестку. Кроме того, оказывается возможным укладывать швы в замкнутых объемах.

Зоны влияния при электронно-лучевой сварке имеют очень малую ширину. Укладка швов может производиться при разных их положениях в пространстве. Процесс укладки автоматизирован.

Расчет прочности соединений при электронно-лучевой сварке во многих случаях сводится лишь к расчету прочности основной детали, так как соединения могут быть приняты равнопрочными целому элементу. Нередко правильная оценка прочности соединений, особенно разнородных металлов, производится на основе специально проведенных экспериментов.

СВАРКА ВЗРЫВОМ

Сварка взрывом является одним из наиболее новых процессов соединения однородных и разнородных металлов. Перспективно использование эффекта взрыва для получения двуслойных элементов, производства наплавок. Сварка взрывом очень производительна. При правильном технологическом процессе механические свойства соединений оказываются стабильными и высокими.

СПОСОБЫ СВАРКИ МИКРОДЕТАЛЕЙ

Для сварки микродеталей в радиотехнической промышленности применяют разные способы. Лазером соединяют различные тончайшие детали, в частности драгоценные; конденсаторной роликовой и точечной сваркой, термокомпрессионным способом, крутильными колебаниями, восстановлением солей и т. п. сваривают платы и другие микроминиатюрные детали.

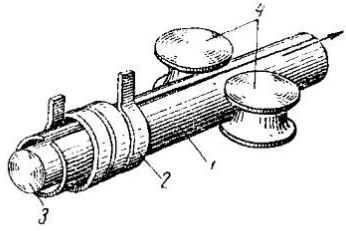


Рис. 4-34. Схема радиочастотной сварки с индукционным подводом тока

РАДИОЧАСТОТНАЯ СВАРКА

Схема радиочастотной сварки изображена на рис. 4-34. Свариваемая конструкция *1* (как правило, тонкостенная труба) нагревается охватывающим ее высокочастотным индуктором *2*, во внутреннюю часть трубы вводится ферритовый сердечник *3*. Индуцируемый на кромках стыкуемых труб, ток высокой частоты расплавляет металл кромок и обжимные ролики *4* соединяют кромки. Радиочастотная сварка весьма производительна, ее скорость при $s=5$ *мм* достигает 50 *м/мин* и более. Она может быть применена для связующих соединений профильных элементов. Количество потребляемой энергии и температурное влияние ее на основной металл весьма незначительны.

Ток протекает главным образом по торцовым поверхностям трубы, которая нагревается до температуры плавления. Глубина проникновения тока определяется формулой

$$\Delta = \frac{k}{\sqrt{f}},$$

где f — частота тока;

k — коэффициент, зависящий от магнитной проницаемости и удельного сопротивления металла.

Например, для технического титана, у которого $k = 390$ *мм·сек*$^{-\frac{1}{2}}$ при $T = 20°$ и 670 *мм·сек*$^{-\frac{1}{2}}$ при $T = 1500°$, часто́та f может быть принята равной 440 тыс. *гц*. При этом Δ составляет 0,6—1,0 *мм*.

Радиочастотной сваркой соединяют не только стальные трубы, но и трубы из цветных металлов, в частности из латуни. Швы образуются так же, как и при обычной стыковой контактной сварке, но при большой скорости процесса, предупреждающей расплавление и испарение цинка в поверхностном слое.

§ 8. СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ПЛАСТМАСС

Термопластики — высокомолекулярные материалы, которые при нагреве до некоторой температуры переходят в вязкотекучее состояние, а при последующем охлаждении возвращаются в исходное. Эти материалы хорошо соединяются сваркой. К хорошо свариваемым материалам относятся полиэтилен, плексиглас, поливинилхлорид и многие другие. В сварных конструкциях целесообразно применять винипласт, который обладает относительно высокой прочностью, легко обрабатывается и сваривается, но обладает несколько повышенной чувствительностью к надрезу.

Полимеры сваривают различными способами.

Сварка горячим воздухом. При сварке воздух, нагретый в специальной горелке до 250÷300°, в зоне сварки несколько охлаждается. Сварка осуществляется присадочным прутком, подающимся в разделку шва вручную или полуавтоматом.

Сварка нагревательным элементом позволяет сваривать угловые и тавровые соединения, трубы и т. п.

Одним из способов этой сварки является электроимпульсная сварка очень тонких пленок толщиной в сотые доли миллиметра. При этом узкая металлическая лента прижимается к соединяемым внахлестку пленкам, нагревается током и быстро охлаждается. Соединения обладают достаточной прочностью.

Сварка токами высокой частоты. Этим способом сваривают не все термопластичные полимеры, а некоторые, например, винипласт, поливинилхлорид, полиамид и др. Разогрев соединяемых деталей производится роликами, через которые пропускается ток от ламповых генераторов.

Сварка трением. Трением производят соединения встык преимущественно тел вращения: стержней круглого сечения, труб. Сварка может производиться на токарном станке с приспособлениями, обеспечивающими соосность в расположении свариваемых деталей.

Сварка ультразвуком полимеров является одним из прогрессивных способов их соединения. Она производится по схеме, приведенной на рис. 4-35. Колебания волновода направлены перпендикулярно плоскостям стыкуемых элементов.

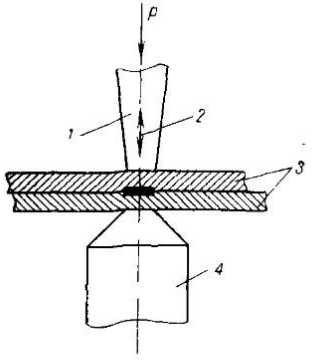


Рис. 4-35. Схема ультразвуковой сварки пластмасс:

1 — волновод; *2* — колебания; *3* — детали; *4* — опора

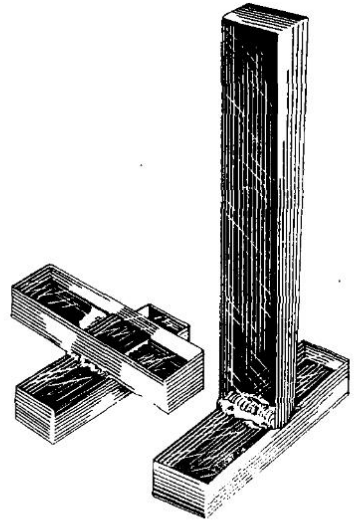


Рис. 4-36. Сварные детали из винипласта

Сваркой ультразвуком можно соединять тонкие пленки, а также детали толщиной в несколько миллиметров из различных термопластичных материалов: полистирола, поливинилхлорида, винипласта и т. п. При ультразвуковой сварке получают соединения внахлестку и втавр. Примеры деталей из винипласта, соединенные ультразвуковой сваркой, приведены на рис. 4-36. На рис. 4-37, *а* дан пример приварки стержня к поверхности в трудно доступном месте. Сварка ультразвуком производится односторонним способом. Поэтому вторая деталь, поддерживаемая опорой, может иметь неограниченную толщину.

Соединения при сварке ультразвуком могут быть точечными и шовными. Для постановки точек применяют различные системы волноводов, которые ставят сварные точки как по линии, так и по сложному контуру. При этом особенно хорошие результаты получаются при сварке контурными волноводами,

имеющими в поперечном сечении круглый кольцевой профиль. Качество соединений, сваренных ультразвуком, определяется продолжительностью процесса, величиной амплитуды колебаний волновода, величиной усилия сдавливания. Ультразвуком можно сваривать от двух до нескольких пластин, образующих пакет.

Соединения полимеров, сваренные ультразвуком, имеют хорошие механические свойства при правильно подобранном режиме, обеспечивают герметичность и стабильность; эксперименты показывают, что полимеры, сваренные ультразвуком, при правильно назначенном технологическом режиме, хорошо сохраняют свои свойства в течение длительного периода эксплуатации.

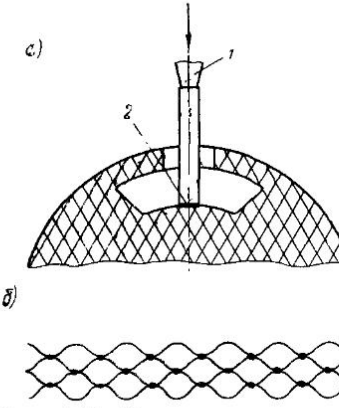


Рис. 4-37. Примеры сварки полимеров:

а) в труднодоступных местах; *б*) сварка фильтра; *1* — волновод; *2* — сварная точка

Ультразвуком можно осуществлять сварку не только в месте соприкосновения волновода с деталью, но и на некотором расстоянии. Телеэффект зависит от свойств полимера и конфигурации конструкции, подлежащей сварке. Сварка ультразвуком внедрена в ряд областей пищевой и рыбной промышленности, главным образом при изготовлении всевозможных упаковочных изделий, при производстве игрушек и для соединения технических тканей.

§ 9. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Рассмотрим примеры расчета угловых швов, очерченных по равнобедренному треугольнику.

Пример 1 (рис. 4-38, *а*). Швеллер № 12 прикреплен к листу лобовым и фланговыми швами. Определить напряжения в швах при $P=18{,}0$ *Т*. Площадь сечения лобового шва, имеющего катет шва $k=5$ *мм*, равна

$$F_л = 12 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 = 4{,}2 \ см^2.$$

Площадь сечения двух фланговых швов при $k=8$ *мм*

$$F_{фл} = 2 \cdot 20 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}8 = 22{,}4 \ см^2.$$

Площадь сечения всех угловых швов прикрепления составляет

$$F = 4{,}2 + 22{,}4 = 26{,}6 \ см^2.$$

Срезывающее напряжение в швах будет равно

$$\tau = \frac{18\,000}{26{,}6} = 677 \ кГ/см^2.$$

Пример 2 (рис. 4-38, *б*). Уголок 90×90 *мм* имеет площадь сечения $F = 15{,}6$ *см*². Допускаемое напряжение в металле уголка

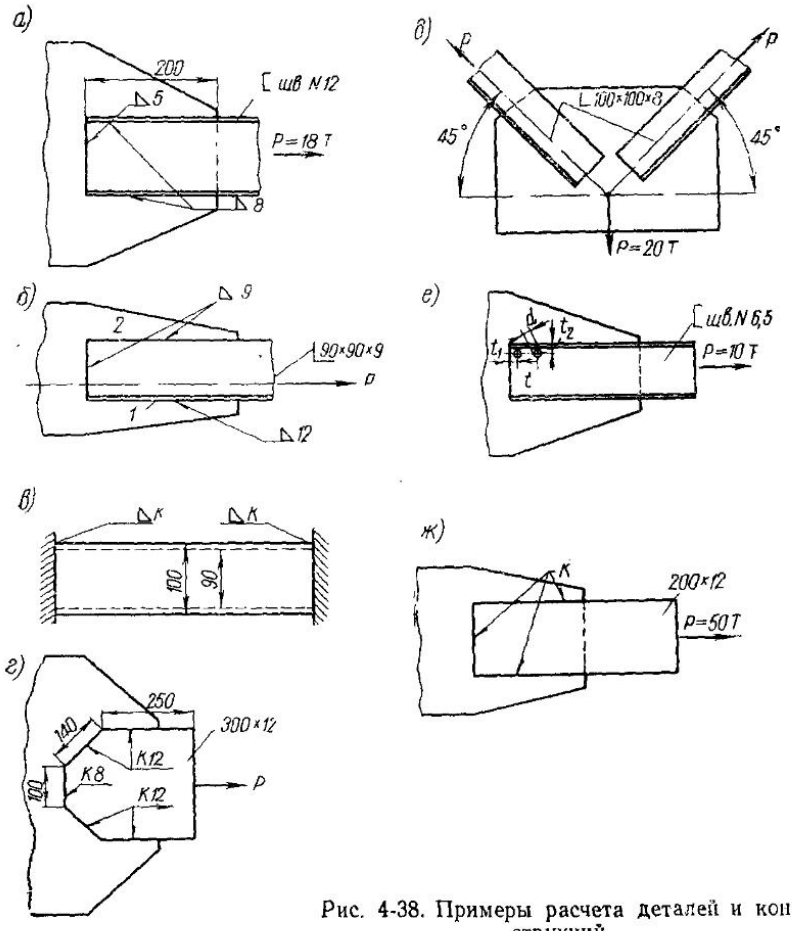


Рис. 4-38. Примеры расчета деталей и конструкций

$[\sigma]_р = 20 \ кГ/мм^2 = 2000 \ кГ/см^2$, допускаемое срезывающее усилие в шве $[\tau'] = 12 \ кГ/мм^2$. Спроектируем сварное соединение, равнопрочное уголку.

Допускаемое растягивающее усилие в уголке равно

$$P = 2000 \cdot 15{,}6 = 31\,200 \ кГ.$$

Проектируем лобовой шов с катетом $к=9$ *мм*.

Усилие, допускаемое на лобовой шов, равно

$$P_л = 1200 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}9 \cdot 9{,}0 = 6800 \text{ кГ}.$$

Остальная часть усилия должна быть передана на фланговые швы

$$P_{фл} = 31\,200 - 6800 = 24\,400 \text{ кГ}.$$

Усилие, передаваемое на шов *1*,

$$P_1 = 0{,}7 \cdot 24\,400 = 17\,080 \text{ кГ}.$$

Катет шва *1* принимаем $к=12$ *мм*, тогда требуемая длина шва равна

$$l = \frac{17\,080}{0{,}7 \cdot 1{,}2 \cdot 1200} = 17{,}0 \text{ см};$$

принимаем $l_1=17{,}0$ *см*.

Усилие, передаваемое на шов *2*,

$$P_2 = 0{,}3 \cdot 24\,400 = 7320 \text{ кГ}.$$

Катет шва *2* принимаем $к=9$ *мм*, тогда требуемая длина шва равна

$$l_2 = \frac{7320}{0{,}7 \cdot 0{,}9 \cdot 1200} = 9{,}7 \text{ см};$$

принимаем $l_2=10{,}0$ *см*.

Пример 3 (рис. 4-38, *в*). Стальная трубка длиной l приварена по концам к жестким днищам и подвергается охлаждению на $T=50°$ С. Трубка имеет внешний диаметр, равный 100 *мм*, внутренний — 90 *мм*, коэффициент температурного расширения $\alpha=12{,}5 \cdot 10^{-6}$ 1/*град*; площадь сечения $F=14{,}9$ *см*^{2}.

Следует определить требуемую величину катета углового шва, обеспечивающего прочное прикрепление, если $[\tau']=9$ *кГ/мм*^{2}. Модуль упругости $E=2{,}1 \cdot 10^6$ *кГ/см*^{2}.

Температурная деформация трубки, закрепленной одним концом, составляет

$$\delta l_т = \alpha \Delta T l.$$

Упругая деформация, вызванная реакцией в закрепленном конце,

$$\delta l = \frac{Pl}{EF}.$$

Вследствие равенства абсолютных величин указанных деформаций имеем

$$\alpha \Delta T l = \frac{Pl}{EF},$$

откуда

$$P = \alpha \Delta T E F = 12{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 2{,}1 \cdot 10^{6} \cdot 14{,}9 = 19\,560\ кГ.$$

Площадь сечения кольцевого шва с катетом $к$

$$F = 0{,}7\, к\, \pi 10 = 22\, к\ см^2.$$

Усилие на шов

$$P = 22\, к \cdot 900 = к \cdot 19\,800\ кГ,$$

откуда $к = 0{,}99$ *см*; принимаем $к = 10$ *мм*.

Пример 4. Требуется сконструировать и рассчитать точечное сварное соединение, равнопрочное целому элементу сечением 300×3 *мм*. Допускаемое напряжение $[\sigma]_р = 16$ *кГ/мм*^{2}; допускаемое напряжение в сварной точке $[\tau'] = 8$ *кГ/мм*^{2}; допускаемое усилие в листе при растяжении $P = 1600 \cdot 30 \cdot 0{,}3 = 14\,400$ *кГ*; диаметр точки $d = 1{,}4s + 4 = 1{,}4 \cdot 3 + 4 = 8$ *мм*.

Допускаемое усилие в точке

$$P_0 = [\tau'] \frac{\pi d^2}{4} = 800 \frac{\pi \cdot 0{,}8^2}{4} = 402\ кГ.$$

Необходимое число точек в соединении

$$i = \frac{P}{P_0} = \frac{14\,400}{402} = 35{,}8.$$

Принимаем: $i = 36$ точкам; величина шага $t = 3 \cdot 8 = 24$ *мм*; величина $t_2 = 1{,}5 \cdot 8 = 12$ *мм*; величина $t_1 = 16$ *мм*. Рабочая ширина листа, на котором устанавливаются точки, $300 - 16 \cdot 2 = 268$ *мм*; число точек $\frac{268}{24} + 1 = 12$; принимаем 12 точек, которые ставим в 3 ряда по 8 точек в каждом. Подобного рода условные расчеты могут быть применены лишь для конструкций с точечными соединениями, работающими под статическими нагрузками.

Пример 5 (рис. 4-38, *г*). Полоса сечением 300×12 *мм* прикреплена к листу фланговыми и косыми швами с $к = 12$ *мм* и лобовым швом с $к = 8$ *мм*. Определить допускаемое усилие, если $[\tau'] = 12$ *кГ/мм*^{2}.

Пример 6 (рис. 4-38, *д*). Определить требуемые длины фланговых швов для прикрепления двух тяг уголкового профиля $100 \times 100 \times 8$ *мм*. Площадь сечения каждой тяги $F = 15{,}6$ *см*^{2}. Поддерживаемый груз $P = 20{,}0$ *Т*.

Пример 7 (рис. 4-38, *е*). Определить число сварных точек для прикрепления к листу швеллера № 6, 5 площадью сечения $F=8{,}28$ *см*^{2} и толщиной стенки 4,5 *мм* при усилии $P=10$ *Т* с допускаемым напряжением на срез точки $[\tau']=9$ *кГ/мм*^{2} и произвести их расстановку с учетом t, t_1 и t_2.

Пример 8 (рис. 4-38, *ж*). Полоса сечением 200×12 *мм* приваривается к листу. Усилие $P=50{,}0$ *Т*, допускаемое напряжение шва $[\tau']=13$ *кГ/мм*^{2}. Определить количество наплавленного металла при швах в форме равнобедренного треугольника с катетами *к*, равными 8 и 12 *мм*.

§ 10. КОМБИНИРОВАННЫЕ КЛЕПАНО-СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Конструкцию называют комбинированной клепано-сварной, если в ней применены сварные и клепаные соединения (рис. 4-39, *а*). Такие конструкции встречаются в железнодорож-

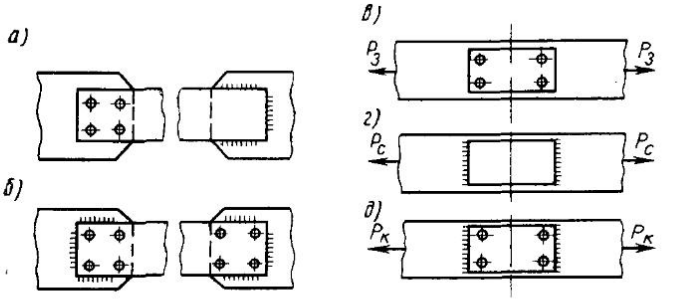


Рис. 4-39. Комбинированные клепано-сварные соединения:
а) комбинированная конструкция; *б*) комбинированное соединение; *в*) клепаное; *г*) сварное; *д*) соединение заклепками и швами

ных мостах. В них работы, производимые на заводе, выполняют сваркой, а на сборке — клепкой. Это допускается, если применение таких соединений в комбинированной конструкции оправдано соображениями экономического характера.

Клепано-сварным комбинированным соединением называется такое, в котором одна часть усилий воспринимается заклепками, а другая — сварными швами (рис. 4-39, *б*). Клепано-сварные комбинированные соединения встречаются при усилении старых клепаных мостовых ферм, стропильных ферм, крановых ферм, колонн и т. п.

Основным недостатком комбинированного клепано-сварного соединения является то, что усилия в нем между заклепками и швами распределяются неравномерно.

Обозначим усилие, разрушающее заклепочное соединение, $P_з$ (рис. 4-39, *в*), разрушающее сварное соединение — $P_с$ (рис. 4-39, *г*), комбинированное (состоящее из швов и заклепок) — $P_к$ (рис. 4-39, *д*).

В случае оптимального распределения усилий между заклепками и швами

$$P_к = P_з + P_с. \qquad (4.31)$$

Эксперименты, проведенные советскими учеными, показали, что

$$P_к < P_з + P_с. \qquad (4.32)$$

Так происходит потому, что в комбинированном соединении распределение усилий между заклепками и швами неравномерно: после образования сдвигов в заклепках сварные швы представляют более жесткое соединение, чем заклепки. Поэтому бóльшая часть усилия воспринимается швами, мéньшая — заклепками.

Лучше работает комбинированное соединение, состоящее из заклепок и фланговых швов, хуже — из заклепок и лобовых швов.

Проектирование новых конструкций с клепано-сварными соединениями, как правило, не допускается. Тем не менее, в инженерной практике нередки случаи, когда усиливают сваркой давно эксплуатируемые объекты. Усиление клепаных конструкций, находящихся в эксплуатации, сварными швами разрешается.

При проверке прочности комбинированных клепано-сварных соединений поступают следующим образом: усилие P_2, возникающее в соединении после его усиления сваркой, считается передающимся на швы; усилия P_1, действующие в соединении до его усиления, и $0{,}5\,P_2$ считаются передающимися на заклепки. Таким образом, расчет комбинированного соединения производится в запас прочности на величину нагрузки $P_2+P_1+0{,}5\,P_2$.

В настоящее время в металлоконструкциях для соединений применяют высокопрочные болты, изготовленные из закаленной стали с пределом текучести 120 *кГ/мм*^{2} и более. Расчет указанных болтов производят с учетом сил трения, вызываемых их затяжкой. Применение высокопрочных болтов более целесообразно, нежели обычных, так как их несущая способность много выше. Высокопрочные болты, как показали предварительные исследования, могут ставиться в соединениях в комбинации со сварными швами. Распределение усилий в комбинированном соединении — высокопрочные болты и сварные соединения — происходит более равномерно, чем в сварном соединении с заклепками.

§ 11. КЛЕЕНО-СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Клеено-сварные соединения применяют в конструкциях из алюминиевых сплавов. Клеевая прослойка повышает сопротивляемость конструкции коррозии. С другой стороны, она способствует улучшению механических свойств. Клеевые соединения разгружают конструкцию, воспринимая на себя часть усилия. Кроме того, при клеевых соединениях устраняются раскрытия швов внахлестку. При этом смягчаются концентраторы напряжений, снижающие работоспособность конструкций.

Клеено-сварные соединения очень чувствительны к повышенным температурам. Прочность клееной конструкции из дюралюминия на сдвиг при $T=20°$ С составляет 1,50 $кГ/мм^2$, на равно-

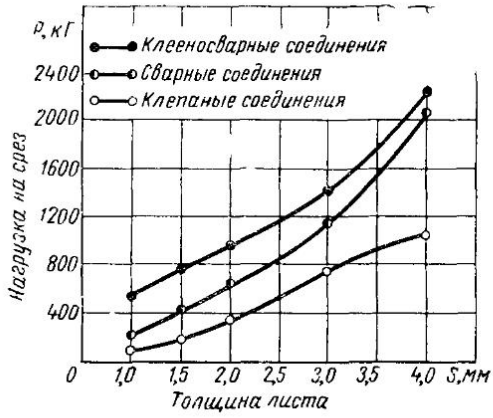


Рис. 4-40. Прочность клеено-сварных соединений

мерный отрыв — 7,40 $кГ/мм^2$, а при $T=150°$ С прочность на сдвиг составляет 0,90 $кГ/мм^2$, на равномерный отрыв — 2,00 $кГ/мм^2$.

Прочность клеено-сварных соединений из алюминиевых сплавов в большой мере зависит от технологии производства и конструкции: от состава клея, величины зазора, толщины деталей. На рис. 4-40 приведены характеристики прочности при статическом срезе в зависимости от жесткости соединений: внахлестку полос малой толщины, тонкой полосы с более толстой, двух утолщенных, с двумя жесткими накладками, телескопического соединения. Эффективность склеивания повышается с уменьшением толщины элементов и с увеличением жесткости соединения. В настоящее время разрабатываются клеено-сварные стальные конструкции.

§ 12. ПАЯНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Паяные соединения, кроме общих свойств со сварными, имеют и ряд существенных отличий. Пайка осуществляется присадочным металлом, называемым *припоем*, имеющим температуру плавления, более низкую, нежели металл соединяемых частей.

Пайкой соединяют различные однородные и разнородные металлы. Процесс пайки очень универсален. Ее применяют в станко-инструментальном производстве, автотракторостроении, самолетостроении, радиотехнической промышленности и других областях. Пайкой соединяют между собой не только металлы, но и металл с графитом, керамикой и другими неметаллическими материалами.

Пайка является производительным процессом, который позволяет в один прием паять значительное количество заготовок.

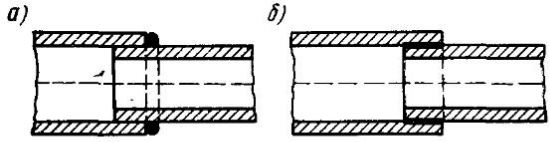


Рис. 4-41. Паяные трубчатые соединения:
а) перед пайкой; *б*) после пайки

Наибольшее распространение имеет капиллярная пайка. Припой, доведенный до расплавления, заполняет зазор между соединяемыми частями, составляющий доли миллиметра. Благодаря действию капиллярных сил капиллярную пайку можно производить в горизонтальном и вертикальном положениях. Наиболее часто пайка производится в горизонтальном положении.

Капиллярной пайкой выполняют соединения внахлестку. Особенно целесообразны телескопические трубчатые паяные соединения. На рис. 4-41 изображена схема образования шва при этом способе пайки. На рис. 4-41, *а* показано положение деталей перед пайкой, на рис. 4-41, *б* — после пайки, которая происходит в результате затекания расплавленного припоя в зазор величиной в несколько десятых долей миллиметра.

На рис. 4-42 изображены соединения труб с плоскими и штампованными элементами. Внутреннее расположение припоя, как правило, гарантирует бо́льшую надежность соединений. Надлежащая прочность паяного соединения обеспечивается нахлесткой достаточно большой протяженности.

Расчет прочности указанных паяных соединений производится в зависимости от характера действующих сил. Если на детали, указанные на рис. 4-43, *а, б,* действуют продольные растяги-

вающие или сжимающие усилия, то паяные соединения работают на срез.

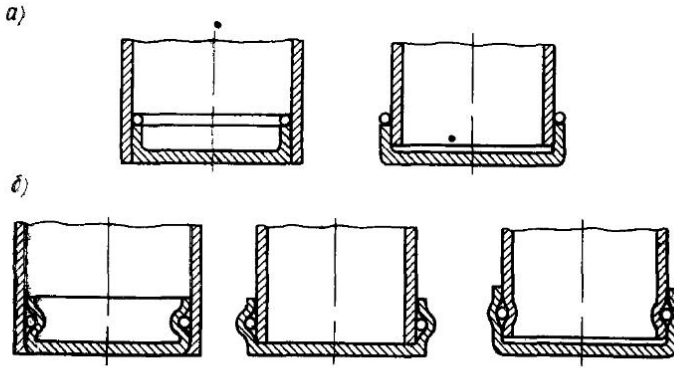


Рис. 4-42. Паяные соединения в трубах с плоскими и штампованными элементами:

а) внешнее расположение припоя; *б)* внутреннее расположение припоя (более рациональное)

Напряжение по плоскости среза равно

$$\tau = \frac{P}{ca} \leqslant [\tau'], \qquad (4.33)$$

где P — величина расчетного усилия, действующего на соединение;

c — ширина зоны спая;

a — ее длина;

$[\tau']$ — допускаемое напряжение паяного шва на срез.

На рис. 4-43, *в, г, д* приведены примеры паяных соединений встык. Паяные прямые швы (рис. 4-43, *в*) не всегда могут быть рекомендованы для рабочих конструкций. Косые паяные (рис. 4-43, *г*) швы обладают более высокой несущей способностью, особенно при угле скоса 45°. Зигзагообразные соединения (рис. 4-43, *д*) не могут быть признаны целесообразными. Они сложны в оформлении, а разрушение наступает

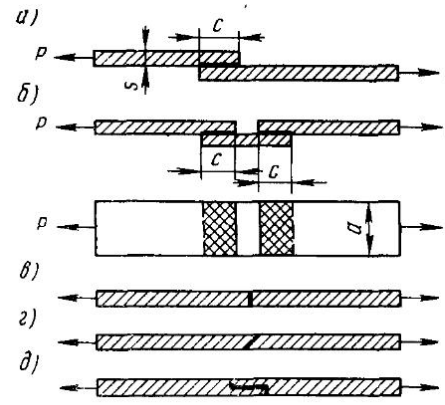


Рис. 4-43. Паяные соединения внахлестку (*а, б*) и встык (*в, г, д*)

по сечению, совпадающему с вертикальной плоскостью спая.

Паяные соединения втавр изображены на рис. 4-44, *а, б, в*. Их применяют главным образом в качестве связующих или малонапряженных швов в элементах, работающих на изгиб. Бо́ль-

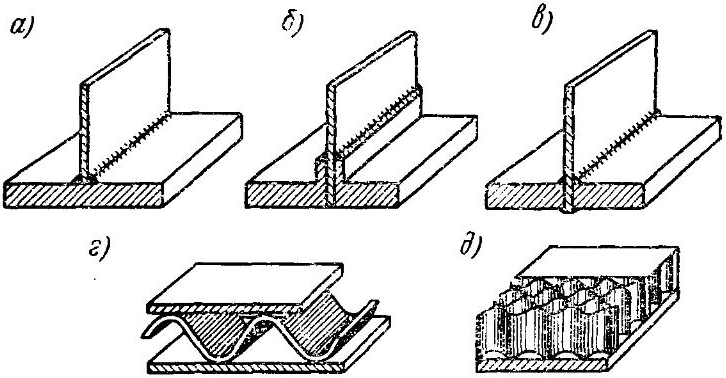


Рис. 4-44. Паяные соединения втавр:

а) менее прочные; *б, в*) более прочные; *г, д*) хорошо сопротивляющиеся изгибу и кручению

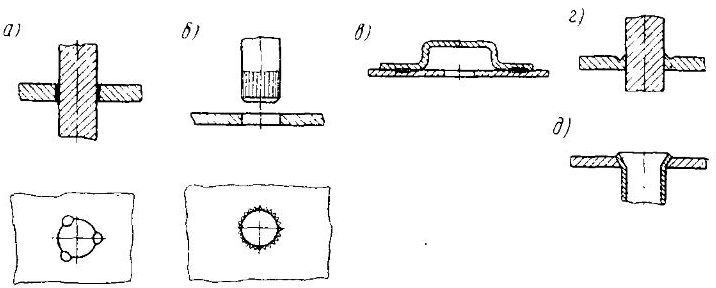


Рис. 4-45. Способы закреплений изделий при пайке:

а) керпением тремя точками; *б*) накаткой; *в*) постановкой трех сварных точек; *г*) керпением по контуру; *д*) с развальцовкой

шей прочностью обладают соединения втавр, изображенные на рис. 4-44, *б, в*.

Паяные соединения открывают возможность создания жестких и экономичных элементов, хорошо работающих на изгиб и кручение. Примеры таких соединений изображены на рис. 4-44, *г, д*. Соединительные элементы впаиваются между двумя плоскостями.

При конструировании паяных соединений следует учитывать условия технологического процесса. Отдельные части этих соединений перед пайкой закрепляют следующими способами: с помощью кернения тремя точками (рис. 4-45, *а*); накаткой (рис. 4-45, *б*); постановкой сварных точек (рис. 4-45, *в*); кернением по контуру (рис. 4-45, *г*); развальцовкой (рис. 4-45, *д*) и др.

Высокое качество соединений и высокая производительность достигаются при пайке в термических печах, нагреваемых специальными нагревателями до $T=1200—1300°$. Основной металл и припой защищаются от проникновения в них газов флюсами, инертной атмосферой или вакуумом. При пайке в вакууме паяные детали закладываются в контейнеры, последние под атмосферным давлением обжимают изделие и улучшают качество соединений. При пайке в инертной атмосфере в качестве защитных газов применяют азот, инертные газы и т. п.

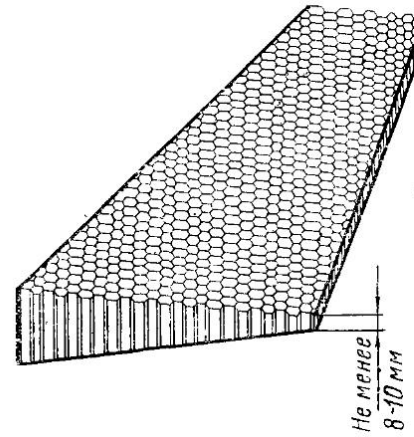


Рис. 4-46. Паяная сотовая конструкция

Экономичной является пайка в печах-ваннах, где находятся расплавы солей при $T=950°$ или расплавленный припой. В эти ванны погружают детали для пайки. При этом нагрев деталей производится вследствие непосредственного контакта с расплавом, что рациональнее, чем нагрев излучением от газовой атмосферы и пода.

В ряде случаев паяные соединения хорошо выполняются с помощью газовой горелки или индуктором. Эти способы пайки маневренны и удобны при разбросанных по конструкции соединениях.

На рис. 4-46 дан пример паяной сотовой конструкции, обладающей жесткостью, экономным весом, компактностью.

§ 13. СОЕДИНЕНИЯ, РАБОТАЮЩИЕ НА ИЗГИБ И СЛОЖНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Примеры соединений, работающих на изгиб, показаны на рис. 4-47, *а*. Если шов сделан с подготовкой кромок, то его размеры не отличаются от размеров привариваемой полосы. Поэтому напряжения в шве определяются по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W} \leqslant [\sigma']_{\text{р}}, \tag{4.34}$$

где $W = sh^2/6$;

s — толщина полосы;

h — ее высота.

При действии M и продольной силы $N = P$ (рис. 4-47, *б*)

$$\sigma = \pm \frac{M}{W} + \frac{N}{F} \leqslant [\sigma']_{\text{р}}. \tag{4.35}$$

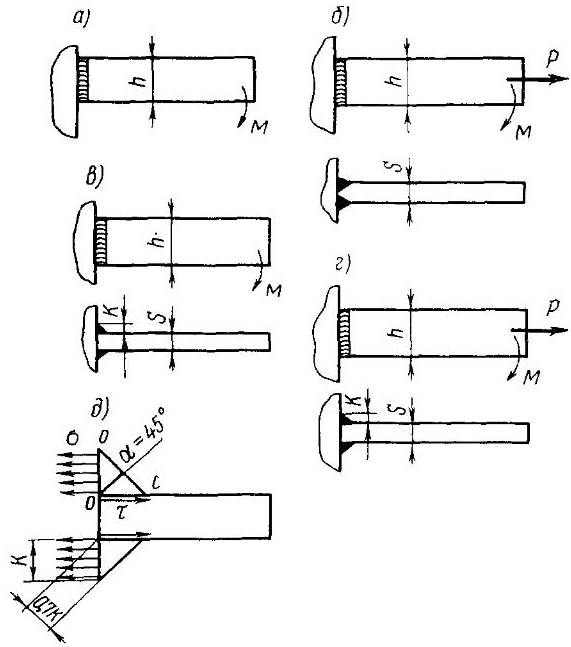


Рис. 4-47. Схема соединений:

а, б) швы, работающие на изгиб; *в, г*) швы, работающие на сложное сопротивление; *д*) с угловым швом

Если полоса приварена двумя вертикальными угловыми швами (рис. 4-47, *в*), то напряжение в плоскости прикрепления будет

$$\sigma = \frac{M}{W_{\text{с}}}, \tag{4.36}$$

где $W_{\text{с}}$ — момент сопротивления угловых швов.

В плоскости $O—O$ (рис. 4-47, $д$) момент сопротивления двух сварных швов высотой h и катетом $к$ равен

$$W_o = \frac{2\,кh^2}{6}.$$

При этом следует иметь в виду два обстоятельства.

Во-первых, разрушение угловых швов обычно происходит не по плоскости $O—O$, а по меньшей плоскости в шве, совпадающей с биссектрисой прямого угла. Если шов имеет очертания равнобедренного треугольника, то расчетный момент сопротивления швов для соединения (рис. 4-47, $д$) будет равен

$$W_c = \frac{2 \cdot 0{,}7\,кh^2}{6}.$$

Во-вторых, расчет прочности швов следует производить не по допускаемым нормальным напряжениям (плоскости $O—O$), а по напряжениям на косой плоскости. Величину этих напряжений ограничивают допускаемым напряжением на срез $[\tau']$. Таким образом, расчетное напряжение в швах (рис. 4-47, $в$) от момента определяют по формуле

$$\tau = \frac{M}{2 \cdot 0{,}7\,кh^2/6}. \qquad (4.37)$$

При действии в этом соединении момента M и продольной силы $N=P$ расчетное касательное напряжение в угловых швах (рис. 4-47, $г$) равно

$$\tau = \frac{M}{W_c} + \frac{N}{F_c} \leqslant [\tau'], \qquad (4.38)$$

где $[\tau']$ — допускаемое напряжение в шве при срезе.

В швах, сваренных в форме равнобедренного треугольника, $F_c = 2 \cdot 0{,}7\ кh$.

Рассмотрим расчет прочности швов, лежащих в плоскости изгибающего момента (рис. 4-48).

Расчет прочности по способу расчленения соединения на составляющие. Принимаем, что момент M уравновешивается моментом пары сил в горизонтальных швах $M_г$ и моментом защемления вертикального шва $M_в$ (рис. 4-48, $а$), т. е.

$$M = M_г + M_в. \qquad (4.39)$$

Допустим, что швы имеют форму равнобедренного треугольника. В горизонтальных швах образуется пара сил. Ее момент равен

$$M_г = \tau 0{,}7\,кa\,(h + к). \qquad (4.40)$$

Момент в вертикальном шве вычисляем по формуле

$$M_в = \tau \frac{0{,}7\,\kappa h^2}{6}, \tag{4.41}$$

поэтому

$$M = \tau 0{,}7\,\kappa a\,(h+\kappa) + \tau \frac{0{,}7\,\kappa h^2}{6}. \tag{4.42}$$

Откуда касательное напряжение равно

$$\tau = \frac{M}{0{,}7\,\kappa a\,(h+\kappa) + 0{,}7\,\kappa h^2/6} \leqslant [\tau']. \tag{4.43}$$

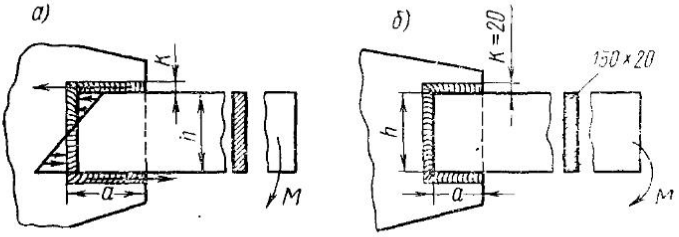


Рис. 4-48. Сварные соединения в плоскости M:
а) схема расчета швов; *б*) пример расчета швов по способу расчленения соединения

Пользуясь уравнением (4.43) при конструировании соединения, легко определить требуемую длину швов a или длину их катетов κ.

Пример расчета. Сконструировать прикрепление полосы сечением 150×20 *мм* вертикальными и горизонтальными швами, равнопрочное целому элементу при изгибе (рис. 4-48, *б*); материал — Ст. 3, допускаемое напряжение — $[\sigma]_р$; электроды — Э42.

Момент сопротивления полосы равен

$$W = \frac{15^2 \cdot 2}{6} = 75\ см^3.$$

Момент, допускаемый в полосе, равен

$$M = 0{,}9\,[\sigma]_р \cdot 75 = 67{,}5\,[\sigma]_р.$$

Момент, допускаемый в вертикальном шве при $\kappa = 20$ *мм* и $\tau' = 0{,}6[\sigma]_р$, равен

$$M_в = 0{,}6 \cdot 1{,}0\ [\sigma]_р \frac{0{,}7 \cdot 2 \cdot 15^2}{6} = 31{,}5\,[\sigma]_р.$$

Момент, допускаемый в горизонтальных швах, вычисляется по формуле

$$M_г = M - M_в = 67{,}5\,[\sigma]_р - 31{,}5\,[\sigma]_р = 36{,}0\,[\sigma]_р.$$

Усилие на один горизонтальный шов равно

$$P_г = \frac{M_г}{h + \kappa} = \frac{36{,}0\,[\sigma]_р}{15 + 2} = 2{,}12\,[\sigma]_р.$$

Требуемая длина горизонтального шва при $\kappa = 20$ *мм* определяется по формуле

$$a = \frac{P_г}{[\tau']\,0{,}7\,\kappa} = \frac{2{,}12\,[\sigma]_р}{0{,}6\,[\sigma]_р\,0{,}7 \cdot 2} = 2{,}53\ см.$$

Принимаем $a = 5$ *см*.

Расчет прочности по способу полярного момента инерции. В ряде случаев, в особенности, когда соединения имеют сложную форму, как, например, на рис. 4-49, *а*,

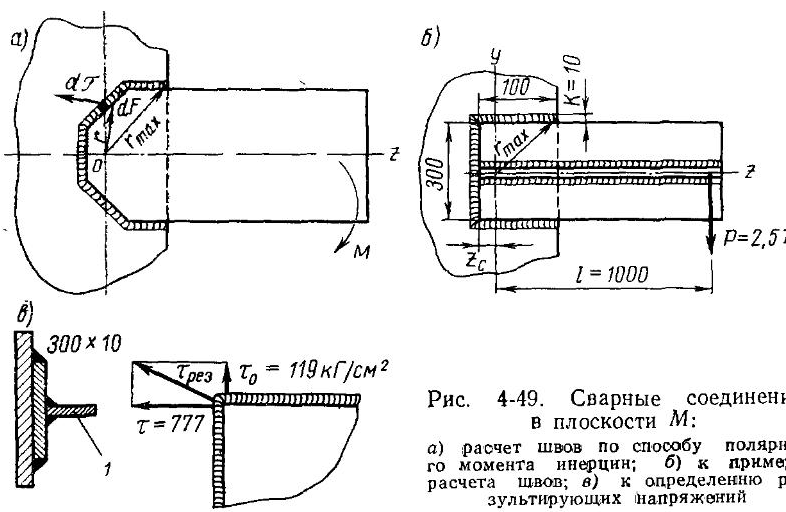


Рис. 4-49. Сварные соединения в плоскости M:

а) расчет швов по способу полярного момента инерции; *б*) к примеру расчета швов; *в*) к определению результирующих напряжений

и расчленение их на составляющие затруднительно, расчет прочности целесообразно производить по способу полярного момента инерции. Примем в качестве рабочей гипотезы, что под действием момента соединение стремится повернуться относительно своего центра тяжести O. В элементе dF шва образуется реактивная сила

$$dT = \tau dF.$$

Момент реактивного усилия относительно точки O равен $dM=\tau dFr$. Для всего соединения

$$M=\int_F \tau dFr. \tag{4.44}$$

Так как величина перемещения точек шва пропорциональна расстояниям r до центра вращения, то и напряжения τ определяются, как линейные функции от r.

Из соотношения $\tau/\tau_1=r/1$ находим $\tau=\tau_1 r$, где τ_1 — напряжение на условном расстоянии от центра, равном единице. Так как τ_1 есть величина, не зависящая от r, то она может быть вынесена за знак интеграла

$$M=\tau_1 \int_F r^2 dF. \tag{4.45}$$

Интеграл представляет собой величину полярного момента инерции сварных швов относительно точки O

$$\int_F r^2 dF = J_p. \tag{4.46}$$

Полярный момент инерции равен сумме двух осевых

$$J_p = J_z + J_y.$$

Находим напряжение

$$\tau_1 = \frac{M}{J_p}.$$

Наибольшее напряжение равно

$$\tau_{max} = \frac{M}{J_p} r_{max}. \tag{4.47}$$

Пример расчета. Определить напряжение в конструкции соединения, приведенного на рис. 4-49, *б*.

Определяем координаты центра тяжести швов соединения тавра с листом. Абсцисса центра тяжести периметра швов относительно вертикальной кромки полосы равна

$$z_c = \frac{2 \cdot 10 \cdot 5 - 30 \cdot 1 \cdot 0{,}5}{2 \cdot 10 + 30 \cdot 1} = 1{,}7 \ см.$$

Момент инерции швов относительно оси z

$$J_z = \frac{30^3 \cdot 1}{12} + 2\left(\frac{10 \cdot 1^3}{12} + 10 \cdot 1 \cdot 15{,}5^2\right) = 7056 \ см^4.$$

Момент инерции относительно оси y

$$J_y = 2\ \frac{10^3 \cdot 1}{12} + 10 \cdot 1\ (5 - 1{,}7)^2 + \frac{30 \cdot 1^3}{12} +$$

$$+ 30\ (1{,}7 + 0{,}5)^2 = 532\ см^4.$$

Полярный момент инерции периметра швов равен

$$7056 + 532 = 7588\ см^4.$$

Расчетный полярный момент инерции швов (с учетом разрушения по плоскости, совпадающей с биссектрисой прямого угла)

$$J_p = 0{,}7 \cdot 7588 = 5311\ см^4.$$

Изгибающий момент

$$M = 2500 \cdot 100 = 250000\ кГ \cdot см.$$

Наибольшее расстояние r_{max} показано на рис. 4-49, *б*.

Наибольшее напряжение от момента в точке с абсциссой $100-17=83$ *мм* и ординатой $150+10=160$ *мм* равно

$$\tau_{max} = \frac{250\,000}{5311}\ \sqrt{16^2 + 8{,}3^2} = 847 кГ/см^2.$$

Среднее напряжение в вертикальном шве от $Q=P=2{,}5$ *Т* равно

$$\tau_0 = \frac{2500}{30 \cdot 0{,}7 \cdot 1} = 119\ кГ/см^2.$$

Причем принимаем условно, что Q воспринимается только вертикальными швами.

Так как в зоне τ_{max} напряжение $\tau_0=0$, то проверки результирующих напряжений не требуется.

Определим напряжения в том же соединении методом расчленения на два горизонтальных шва и один вертикальный по формуле (4.43)

$$\tau = \frac{250000}{0{,}7 \cdot 1 \cdot 10\,(30 + 1) + \dfrac{0{,}7 \cdot 1 \cdot 30^2}{6}} = 776\ кГ/см^2.$$

По этому способу расчета τ постоянно по длине горизонтальных швов.

Расчетное результирующее напряжение в пересечении горизонтального и вертикального швов (рис. 4-49, *в*) равно

$$\tau_{рез} = \sqrt{776^2 + 119^2} = 785\ кГ/см^2.$$

Расчет прочности по способу полярного момента инерции дает бо́льшее значение напряжения, поэтому вычисление напряжения по этому способу обеспечивает бо́льший запас прочности.

Расчет соединения по способу осевого момента инерции. В основе этого способа лежит допущение, что напряжения в швах пропорциональны деформациям в основном металле (рис. 4-50) и, следовательно, возрастают в линейной зависимости от расстояния точки до нейтральной оси элемента. Реактивное усилие в элементе равно

$$dT = \tau dF.$$

Реактивный момент в элементе определяется по формуле

$$dM = dTy. \tag{4.48}$$

Полный момент внутренних сил

$$M = \int_F dTy = \int_F \tau dFy. \tag{4.49}$$

Принимаем, что напряжения представляют собой линейную функцию расстояния до оси. При этом

$$\tau/\tau_1 = y\ 1$$

где τ_1 — напряжение на расстоянии, равном единице от оси z.

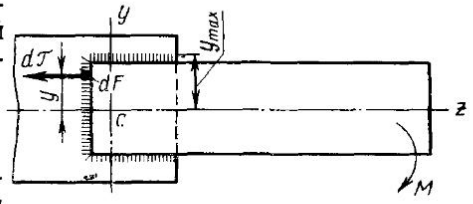


Рис. 4-50. Сварные соединения в плоскости M. Расчет швов по способу осевого момента инерции

Тогда

$$M = \tau_1 \int_F y^2 dF. \tag{4.50}$$

Интеграл выражает величину момента инерции швов относительно оси z.

Наибольшее напряжение

$$\tau_{max} = \frac{M}{J_z}\ y \leqslant [\tau']. \tag{4.51}$$

Расчет прочности по способу осевого момента незначительно отличается от первого способа расчленения соединения на составляющие.

Наиболее часто все же применяют первый способ, особенно при конструировании соединений с учетом заданных усилий. Второй способ используют для определения расчетных напряжений в заданных конструкциях соединений. Третий способ подобен первому; его используют в тех случаях, когда расчленение соединений затруднительно.

При рассмотрении прочности прикреплений элементов, работающих на изгиб, будем предполагать, что угловые швы имеют форму равнобедренного треугольника. Расчет прочности производится на срез по плоскости, совпадающей с биссектрисой прямого угла и равной $0{,}7\kappa a$ (κ — катет шва, a — его длина).

Определим напряжения в сварном соединении, прикрепляющем балку прямоугольного поперечного сечения, работающую на изгиб (рис. 4-51, *а*).

Соединение сконструировано с угловыми швами, обваривающими профиль по периметру. Такое соединение удобно при возможности поворота конструкции в процессе изготовления и при наложении швов в нижнем и вертикальном положениях. Нормальные напряжения в балке вызывают касательные напряжения τ в швах, равные

$$\tau = \frac{M}{W_c} \leqslant [\tau']. \quad (4.52)$$

Момент сопротивления

$$W_c = J_c / y_{max},$$

где J_c — расчетный момент инерции периметра швов. Он определяется умножением момента инерции сечения швов на 0,7 с учетом возможного разрушения по наименьшему сечению

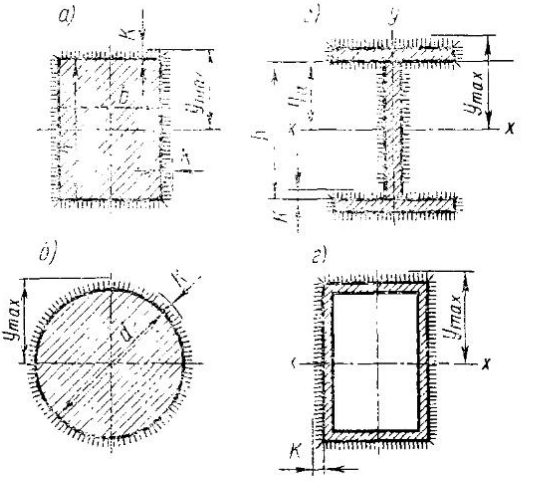


Рис. 4-51. Сварные соединения элементов, обваренных по периметрам угловыми швами:

а) сечение прямоугольное; *б*) сечение круглое; *в*) сечение двутавровое; *г*) сечение коробчатое

$$J_c = 0{,}7\left[\kappa b\left(\frac{h+\kappa}{2}\right)^2 2 + \frac{\kappa^3 b}{12} 2 + \frac{(h+2\kappa)^3 \kappa 2}{12}\right], \quad (4.53)$$

$$y_{max} = \frac{h}{2} + \kappa.$$

Здесь h и κ указаны на рис. 4-51, *а*.

Для круглого поперечного сечения (рис. 4-51, *б*)

$$J_c = 0{,}7\left[\frac{\pi(d+2\kappa)^4}{64} - \frac{\pi d^4}{64}\right], \quad (4.54)$$

$$y_{max} = \frac{d}{2} + \kappa.$$

Если элемент работает при сложном сопротивлении — изгибающем моменте M и продольной силе N, то суммарное напряжение в соединении равно

$$\tau = \pm \frac{M}{J_c} y_{max} + \frac{N}{F_c}, \quad (4.55)$$

где F_c — расчетная площадь швов, определяемая с учетом возможного разрушения по наименьшему сечению умножением площади поперечного сечения на 0,7

$$F_c = 0{,}7\ kL \quad (4.56)$$

(L — длина периметра швов).

Расчет прочности прикрепления произвольных профилей двутавровых, коробчатых (рис. 4-51, *в*, *г*), тавровых и других с помощью швов производится так же, как в случаях, рассмотренных выше, на основе формулы

$$\tau = \frac{M}{J_c} y_{max} < [\tau'], \quad (4.57)$$

где J_c — расчетный момент инерции периметра швов, который определяют умножением величины момента инерции сечения контура шириной κ на 0,7.

Если элементы нагружены поперечными нагрузками, то в них возникают изгибающие моменты M и поперечные силы Q. Напряжения в сварных швах от Q определяют при следующих допущениях: поперечная сила воспринимается только вертикальными швами, распределение напряжений по длине вертикальных швов равномерно. Таким образом, среднее напряжение в шве от поперечной силы равно

$$\tau_0 = Q/F_в, \quad (4.58)$$

где $F_в$ — расчетная площадь вертикальных швов.

На уровне верхней кромки вертикального листа в швах следует проверить результирующие напряжения от M и Q.

Напряжение от момента

$$\tau_1 = \frac{M}{J_c} y_a, \quad (4.59)$$

где y_a — расстояние от оси, проходящей через центр тяжести сечения, до горизонтальной верхней кромки (рис. 4-51, *в*).

В рассматриваемом случае

$$\tau_0 = Q/2 \cdot 0{,}7\ \kappa h. \quad (4.60)$$

Результирующее напряжение

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_0^2} < [\tau']. \quad (4.61)$$

Практика расчетов показывает, что проверка прочности по формуле (4.57) является решающей.

Пример расчета. Консольная балка двутаврового профиля (рис. 4-52) прикреплена сваркой по периметру угловыми швами с катетом $к=6$ *мм*; продольная сила $N=P=5\,T$; поперечная сила $Q=2{,}5\ T$.

Момент инерции периметра угловых швов равен

$$J=\frac{24{,}0^3\cdot 0{,}6}{12}+2\left(\frac{19\cdot 0{,}6^3}{12}+19\cdot 0{,}6\cdot 12{,}9^2\right)+$$

$$+2\left(\frac{2\cdot 8{,}6\cdot 0{,}6^3}{12}+2\cdot 8{,}6\cdot 0{,}6\cdot 11{,}7^2\right)=8000\ см^4.$$

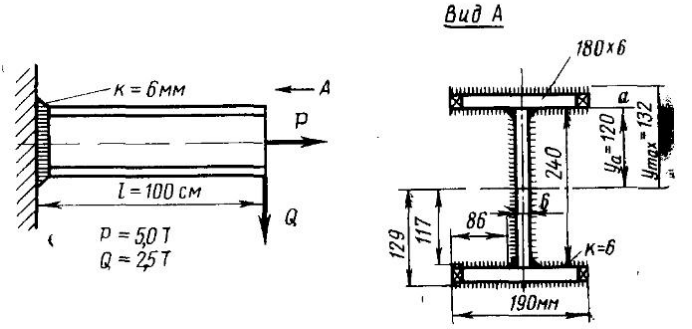


Рис. 4-52. Расчет швов соединений при сложном сопротивлении при действии M и N

Расчетный момент инерции угловых швов с учетом разрушения по опасной плоскости

$$J_c=0{,}7\cdot 8000=5600\ см^4.$$

Ордината $y_a=12{,}0$ *см*. Площадь всего периметра угловых швов составляет

$$F=2\cdot 24\cdot 0{,}6+2\cdot 19\cdot 0{,}6+4\cdot 8{,}6\cdot 0{,}6=72{,}2\ см^2.$$

Их расчетная площадь с учетом разрушения по опасной плоскости равна

$$F_c=0{,}7\cdot 72{,}2=50{,}5\ см^2.$$

Расчетная площадь вертикальных швов с учетом разрушения по опасной плоскости будет

$$F_c'=2\cdot 0{,}7\cdot 0{,}6\cdot 24=20{,}2\,см^2.$$

Напряжения от изгиба на крайней кромке вертикального листа равны

$$\tau = \frac{2500 \cdot 100}{5600} \cdot 12 = 536 \ кГ/см^2.$$

Напряжение от продольной силы в угловых швах соединения

$$\tau_N = \frac{N}{F_c} = \frac{5000}{50{,}5} = 99 \ кГ/см^2.$$

Суммарное напряжение

$$536 + 99 = 635 \ кГ/см^2.$$

Среднее касательное напряжение в вертикальных швах

$$\tau_0 = \frac{2500}{20{,}2} = 124 \ кГ/см^2.$$

Результирующее напряжение при $y_a = 12$ *см*

$$\tau_{рез} = \sqrt{635^2 + 124^2} = 647 \ кГ/см^2.$$

Напряжение от изгиба при $y_{max} = 13{,}2$ *см*

$$\tau = \frac{M}{J_c} \cdot y_{max} = \frac{250000}{5600} \cdot 13{,}2 = 588 \ кГ/см^2.$$

Суммарное напряжение от M и N при $y_{max} = 13{,}2$ *см*

$$\tau_{сумм} = 588 + 99 = 687 \ кГ/см^2.$$

§ 14. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО РЕКОМЕНДАЦИИ МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ (МИС)

МИС рекомендует некоторые методы расчета прочности сварных соединений и конструкций. Расчеты составлены на основе экспериментов, проведенных главным образом голландскими учеными по изучению механических свойств швов под действием нормальных и касательных напряжений. Построены диаграммы, характеризующие прочностные свойства при нормальных сжимающих, срезывающих и нормальных растягивающих напряжениях. Особое внимание при этом уделено расчету угловых швов.

В угловых швах (рис. 4-53), согласно рекомендациям МИС, учитываются следующие составляющие напряжений:

m — напряжение на косой плоскости (рис. 4-53 и 4-54, *г*), которое разлагается на составляющие;

$\sigma_\perp$ — нормальное напряжение, действующее в критической площади поперечного сечения углового шва a. В швах, имеющих очертания равнобедренных треугольников, критическая площадь совпадает с биссектрисой прямого угла, при этом $a=0{,}7\kappa$, где κ — катет шва;

$\tau_\perp$ — касательное напряжение, действующее на той же плоскости в направлении, перпендикулярном шву;

$\tau_\parallel$ — касательное напряжение вдоль шва, которое также может возникать в угловых соединениях.

Для расчета прочности угловых швов рекомендуется вычислять эквивалентные напряжения по формуле

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_\perp^2 + 1{,}8\,(\tau_\perp^2 + \tau_\parallel^2)}. \qquad (4.62)$$

Эквивалентное напряжение σ_c должно быть $\leqslant [\tau']$.

При расчете фланговых швов (рис. 4-54, a) напряжения $\sigma_\perp$ и $\tau_\perp$ равны 0.

Так как эквивалентные напряжения принимаются равными допускаемому при срезе $[\tau']$, то при расчете фланговых швов из формулы (4.62) следует, что

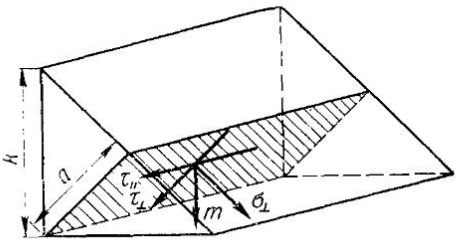


Рис. 4-53. Напряжения в угловых швах (составляющие m : $\sigma_\perp$, $\tau_\perp$, τ)

$$\tau_\parallel = 0{,}75\,\sigma_c. \qquad (4.63)$$

Несущая способность двух фланговых швов (рис. 4-54, a) равна $2 \cdot 0{,}75\sigma_c a l$, где a — ширина наименьшей плоскости шва; l — его длина.

В нормальных швах $a=0{,}7\kappa$.

При расчете прочности двух лобовых швов с неравнобедренным очертанием (рис. 4-54, $б$) результирующее напряжение m на косой плоскости (рис. 4-54, $в$) разлагается на составляющие:

$$\sigma_\perp = \frac{P}{2la}\sin\beta, \qquad (4.64)$$

$$\tau_\perp = \frac{P}{2la}\cos\beta. \qquad (4.65)$$

При $\beta = 45^\circ$ (рис. 4-54, $г$)

$$\sigma_\perp = \tau_\perp = \frac{P}{2la\sqrt{2}}. \qquad (4.66)$$

При этом эквивалентное напряжение

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_\perp^2 + 1{,}8\tau_\perp^2} = 1{,}67\sigma_\perp \leqslant [\tau'[. \qquad (4.67)$$

Подставляя значение $\sigma_\perp$ из формул (4.66), находим, что несущая способность двух лобовых швов

$$P = 2la\ 0{,}85\ [\tau']. \qquad (4.68)$$

В косых швах (рис. 4-54, *в*)

$$P = 2la\nu\ [\tau']. \qquad (4.69)$$

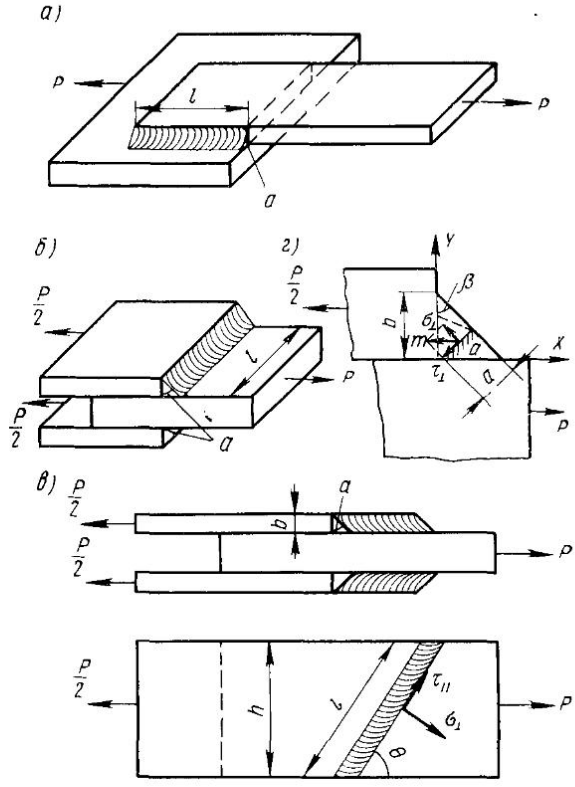


Рис. 4-54. Расчет угловых швов по МИС:

а) фланговые швы; *б*) лобовой шов; *в*) косые швы; *г*) деталь углового шва

Рекомендуется принимать $\nu = 0{,}75$ при $\Theta = 0°$ и $\nu = 0{,}85$ при $\Theta = 90°$; в промежуточных случаях используют линейную интерполяцию.

В комбинированных соединениях, состоящих из фланговых и лобовых швов (рис. 4-55) длиной l_1 и l_2, целесообразно иметь соотношение $0{,}5l_1 < l_2 \leqslant 1{,}5l_1$.

Для комбинации фланговых швов с лобовыми, расположенными со стороны широкого листа (рис. 4-55), расчетное усилие равно

$$P = [\tau'] \, a \, (1{,}5l_2 + 0{,}28l_1). \qquad (4.70)$$

Если расположить лобовой шов со стороны более узкого листа, что в практике не применяется, то

$$P = [\tau'] \, a \, (0{,}5l_2 + 0{,}85l_1). \qquad (4.71)$$

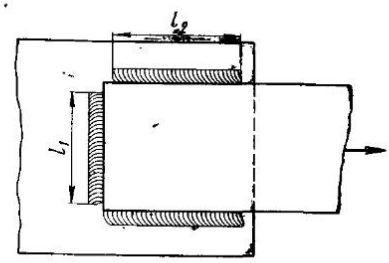


Рис. 4-55. Расчет комбинированных швов по МИС

В обоих случаях несущая способность соединений значительно снижается, по сравнению с принимаемой в настоящее время согласно нормам СССР.

В табл. 4.13 сопоставлены несущие способности некоторых типов сварных соединений с угловыми швами, имеющими очертание равнобедренных треугольников. Как следует из таблицы, несущая способность сварных соединений, найденная по методу, предлагаемому МИС, в значительной мере снижается. Это сопровождается увеличением размеров швов и повышением стоимости конструкций, поэтому формулами, разработанными МИС, в СССР не пользуются.

Таблица 4.13

Сопоставление несущих способностей

Тип соединения	Несущая способность	
	по методу СССР	по методу МИС
Два фланговых шва . .	$2\,[\tau']\,al$	$2 \cdot 0{,}75\,[\tau']\,al$
Один лобовой и два фланговых шва, равных по длине лобовому	$3\,[\tau']\,al$	$1{,}78\,[\tau']\,al$

§ 15. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ

В чертежах, составленных в масштабе 1 : 10 и меньше, ГОСТ 5263—58 предписывает применять упрощенные изображения швов в виде стрелок. При этом методе изображения сварные швы обозначаются на чертежах ломаной линией, состоящей из

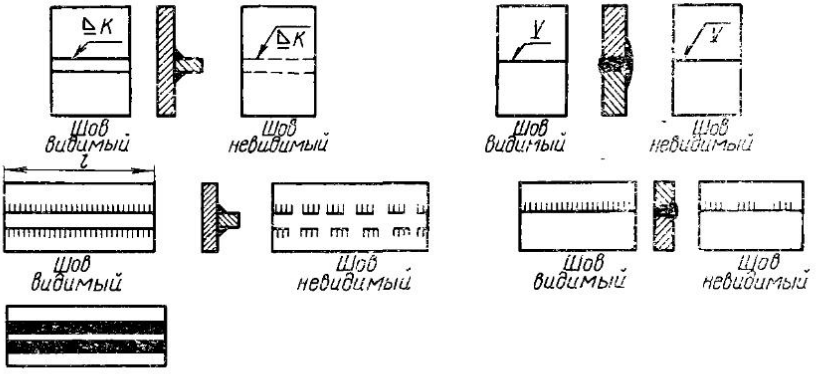


Рис. 4-56. Условные обозначения сварных соединений

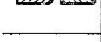
горизонтального и наклонного участков. Наклонный участок заканчивается односторонней стрелкой, указывающей место расположения сварного шва (рис. 4-56). Угол наклона стрелки принимается от 30 до 50°. Все условные размеры и знаки проставляются у видимого шва над горизонтальным участком стрелки, у невидимого — под ним. Швы, подлежащие выполнению на монтаже, обозначаются дополнительно буквой *М*.

На чертежах в масштабе более 1 :.10 допускается для обозначения швов, помимо стрелок, применять штриховку или утолщенные линии в плане и на фасаде, а также заливку тушью контуров шва в разрезе.

Электродуговая сварка сокращенно обозначается буквой Э, газовая — Г, контактная — К, в среде защитных газов — З; ручная сварка обозначается буквой Р, полуавтоматическая — П, автоматическая — А.

Примеры условных обозначений сварных соединений приведены в табл. 4.14 и 4.15.

Таблица 4.14

По форме подготовленных кромок	По характеру выполненного шва	Форма подготовки свариваемых кромок в поперечном сечении	Графические знаки типа шва	Изображение сварных швов сверху: видимые	Изображение сварных швов сверху: невидимые	Изображение сварных швов в разрезе	Обозначение шва
С отбортовкой двух кромок	Односторонние						С1
С отбортовкой одной кромки	То же						С1а
	Двусторонние				—		С2
	Односторонние						С3
Без скоса кромки	Односторонние с подкладкой						С4
	Односторонние замковые						С4а
	Односторонние с подкладкой						С7
V-образные: Со скосом двух кромок	Двусторонние						С8
	Односторонние						С9
	Односторонние с подкладкой						С10
	Односторонние замковые						С10а
С криволинейным скосом двух кромок	Двусторонние						С11

Продолжение табл. 4.14

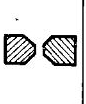
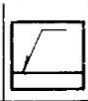
	По форме подготовленных кромок	По характеру выполненного шва	Форма подготовки свариваемых кромок в поперечном сечении	Графические знаки типа шва	Изображение сварных швов сверху: видимые	Изображение сварных швов сверху: невидимые	Изображение сварных швов в разрезе	Обозначение шва
	С двумя симметричными скосами двух кромок	То же				—		С16
	С двумя несимметричными скосами двух кромок	„						С16
Х-образные	С двумя криволинейными скосами двух кромок	Двусторонние				—		С17
Контактные		Без оплавления				—		С18
		С оплавлением				—		С19

Таблица 4.15

По характеру выполненного шва	Формы подготовки свариваемых кромок в поперечном сечении	Графические знаки типа шва	Изображение сварных швов сверху: видимые	Изображение сварных швов сверху: невидимые	Изображение сварных швов в разрезе	Условные буквенно-цифровые обозначения типа шва
Двусторонние						У4
Односторонние						У5
Двусторонние						У6
Односторонние						У7
Двусторонние				—		У8

Продолжение табл. 4.15

По характеру выполненного шва	Формы подготовки свариваемых кромок в поперечном сечении	Графические знаки типа шва	Изображение сварных швов сверху		Изображение сварных швов в разрезе	Условные буквенно-цифровые обозначения типа шва
			видимые	невидимые		
Двусторонние						У9
Односторонние						У10
Двусторонние						Т1
То же						Т8
Односторонние						Т9
Двусторонние						Т10
То же						Т11
Односторонние с проплавлением						Н5
Двусторонние				—		Н6
Односторонние				—		Н7
Рельефные						Н8
Роликовые				—		Н9
Односторонние сплошные						Н10
Односторонние точечные						Н11

ГЛАВА V

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ И МЕТОДЫ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

§ 1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Приведенные в главе III формулы для расчета прочности сварных соединений, которыми конструкторы пользуются в повседневной работе, являются условными. В действительности распределение усилий в сварных соединениях значительно сложнее.

Точные методы расчета прочности несравненно труднее приближенных, а в некоторых случаях вычисление напряжений в сварном узле точным путем составляет решение целой исследовательской проблемы. Эти методы расчета позволяют определять концентрацию напряжений, т. е. напряжения весьма значительной величины на участке очень небольшой протяженности.

Рассмотрим в качестве примера распределение напряжений в полосе, имеющей небольшое отверстие и нагруженной по торцам равномерно распределенными силами (рис. 5-1).

Согласно элементарной формуле из курса «Сопротивления материалов», расчетное напряжение в сечении, ослабленном отверстием, будет

$$\sigma_0 = \frac{P}{(a-d)s}, \tag{5.1}$$

где σ_0 — условное среднее напряжение;

d — диаметр отверстия;

P — действующая сила (остальные обозначения указаны на рис. 5-1).

Если d мал по сравнению с a, то

$$\sigma \approx \frac{P}{as}. \tag{5.2}$$

Расчетные напряжения в сечении, ослабленном отверстием, приблизительно равны напряжению в целой полосе. Между тем

решение задачи об определении концентрации напряжений в полосе, ослабленной круглым цилиндрическим отверстием, методом теории упругости приводит к совершенно другим результатам.

В каждой точке полосы образуются три составляющих напряжения: σ_r, направленные по радиусу отверстия; σ_θ, направленные по касательной, и срезывающее $\tau_{r\theta}$ (рис. 5-1, *а*). Наибольшую величину имеет напряжение σ_θ при $\Theta = 90°$. Эпюра распределения этого напряжения по сечению полосы $A—A$ изображена на рис. 5-1, *б*. Как видно из эпюры, возле отверстия образуется значительная концентрация напряжений. Если диаметр отвер-

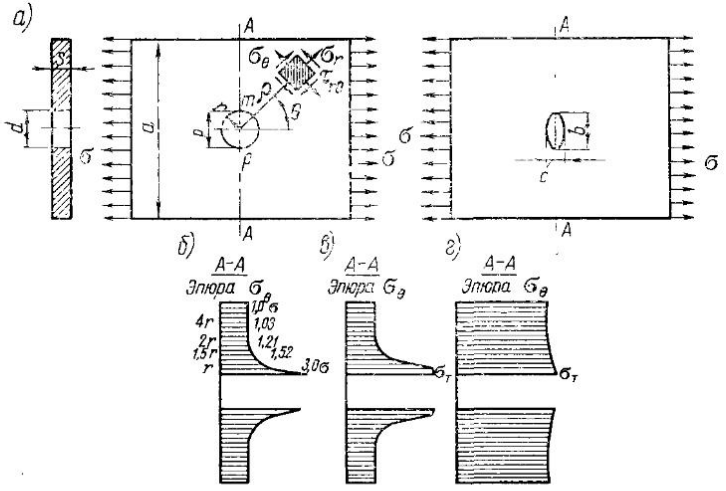


Рис. 5-1. Концентрация напряжений в полосе, ослабленной отверстием:

а) полоса нагружена σ; *б*) распределение σ_θ в упругой области; *в*) распределение σ_θ при образовании пластичности; *г*) распределение σ_θ в пластической стадии

стия мал по сравнению с шириной пластины, то по формуле теории упругости напряжения σ_θ в поперечном сечении, проходящем через центр отверстия, при $\Theta = 90°$ равны

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma}{2}\,(2 + r^2/\rho^2 + 3r^4/\rho^4). \qquad (5.3)$$

Будем называть *теоретическим коэффициентом концентрации* (или просто коэффициентом концентрации) величину

$$K_T = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}, \qquad (5.4)$$

где σ_{max} — максимальное значение напряжения;

σ — среднее его значение.

В рассматриваемом случае при $\rho = r$ $\sigma_{max} = 3\sigma$.

Таким образом, возле отверстия в сечении $A—A$ местное напряжение возрастает в 3 раза, по сравнению с его номинальным значением σ.

Коэффициенты концентрации напряжений достигают еще больших значений в зоне отверстий эллиптической формы.

Например, в полосе большой ширины, ослабленной эллиптическим отверстием, наибольший коэффициент концентрации напряжений равен

$$K_т = 1 + \frac{2b}{c}, \qquad (5.5)$$

где b — ось эллипса, перпендикулярная направлению растяжения;

c — ось, параллельная усилию.

У концов трещины, которую можно рассматривать как эллиптическое отверстие при $c=0$, теоретический коэффициент концентрации напряжений $K_т = \infty$. Это решение неточно, так как при малых значениях c величина деформаций, вызванных приложением внешних сил, оказывает существенное влияние на форму отверстия, и формула (5.5) теряет свою силу.

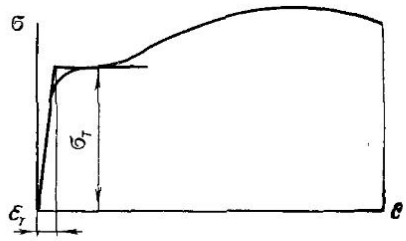


Рис. 5-2. Зависимость нагрузки от деформации

Указанные местные напряжения в зоне концентрации не опасны для прочности в конструкциях из пластичных металлов при статических нагрузках. Поясним это положение.

Диаграммы растяжения пластичного металла нередко схематизируются. Их строят в координатах: условных напряжений σ и относительной деформации ε (рис. 5-2); их приближенно заменяют двумя прямыми: одной — наклонной, выражающей зависимость напряжения от деформации в упругой области, другой — горизонтальной. Горизонтальная прямая показывает, что при $\varepsilon < \varepsilon_т$ деформация протекает пластически, без увеличения нагрузки, приложенной к испытуемому элементу.

Вернемся к рассмотрению эпюры напряженной полосы, ослабленной отверстием (см. рис. 5-1, *б*). Напряженное состояние в сечении $A—A$ близко к одноосному, так как σ_r мало. Допустим, что около отверстия σ_θ достигло $\sigma_т$ (см. рис. 5-1, *в*). Это соответствует деформации $\varepsilon_т$. При увеличении нагрузки деформации возросли, но напряжения в зоне, где $\varepsilon > \varepsilon_т$, как это следует из диаграммы (рис. 5-2), остаются равными $\sigma_т$. Эпюра станет изменять свою форму и выравниваться; приближенно можно принять,

что она примет очертание, близкое к прямоугольному (см. рис. 5-1, *г*), это и было положено в основу расчета прочности согласно элементарным формулам.

Сглаживание эпюры напряжений в пластической стадии, рассмотренное на конкретном примере, является закономерным процессом, имеющим место во многих элементах конструкций из пластических сталей,— малоуглеродистых, конструкционных и низколегированных и др.— при одноосно-напряженных состояниях.

Так как концентрация напряжений не оказывает влияния на величину нагрузки, вызывающей полную текучесть, то тем более величина разрушающей силы не зависит от местных напряжений, возникающих при работе металла в упругом состоянии.

Концентрацию напряжений в сварных конструкциях вызывают следующие причины:

1. *Технологические дефекты шва* — газовые пузыри, шлаковые включения и особенно трещины и непровары. Возле этих дефектов силовые линии искривляются, в результате чего образуется концентрация напряжений. Коэффициенты концентрации напряжений около указанных дефектов значительны, но при их небольшом числе и размерах прочность сварных соединений остается удовлетворительной. В плотных однородных швах концентрация напряжений может быть сведена до минимума.

2. *Нерациональные очертания швов.* На основании данных теории упругости установлено, что очертание швов оказывает большое влияние на распределение в них внутренних сил. Экспериментально на металлических моделях и на моделях из прозрачного материала подтверждены выводы теории упругости.

3. *Нерациональные конструкции соединений.* (Примеры нерациональной конструкции соединений рассмотрены в следующих параграфах этой главы.)

Концентрация напряжений существенно снижает прочность при переменных нагрузках, а для ряда случаев и при статических нагружениях.

§ 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЫКОВЫХ ШВАХ

Стыковые швы представляют собой наиболее совершенную форму сварных соединений, в которых концентрация напряжений невелика.

Как показали эксперименты, при хорошем проваре и удалении «усилений» швов концентрация напряжений в стыковых швах отсутствует. В швах, имеющих выпуклые очертания (рис. 5-3, *а*), распределение напряжений неравномерно.

На рис. 5-3, *б* показано распределение нормальных напряжений, действующих в направлении, перпендикулярном шву; напряжения измерены в различных точках по длине элемента, на

верхней и нижней плоскостях испытуемого образца. Равномерное напряжение σ, действующее в сечении, удаленном от стыкового шва, принято условно за единицу.

Как следует из рис. 5-3, *б*, наибольшая концентрация напряжений имеет место у начала усиления в сечении *II*. В шве, имеющем форму и размеры, указанные на рис. 5-3, *а*, наибольший коэффициент концентрации со стороны усиления равен 1,6, а с противоположной нижней стороны — 1,5. В точках, лежащих на оси шва (сечение *I*), напряжения не превышают σ. Значительной величины достигают напряжения в косом сечении *III*.

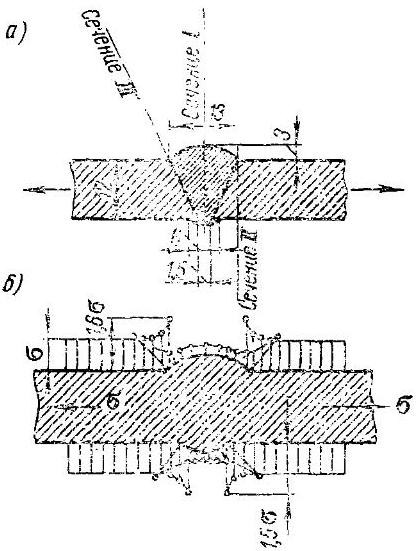


Рис. 5-3. Распределение напряжений в стыковом шве

В стыковых швах концентрация напряжений возникает вследствие изменения сечения пластины в зоне соединений. Она может быть очень значительной при отсутствии полного провара корня шва. Чем меньше усиления швов и особенно чем плавнее их сопряжения с основным металлом, тем меньше коэффициенты концентрации.

§ 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛОБОВЫХ ШВАХ

Определение напряжений в лобовом шве в случае работы соединения при продольной силе может быть выполнено методом теории упругости. Шов рассматривается как упругое тело, имеющее форму треугольной призмы, длина которой равна длине шва, и нагруженное по одной стороне равномерно распределенной нагрузкой, равной напряжениям в накладке σ (рис. 5-4, *а*). Такая методика определения напряжений в шве может быть допущена при решении задачи в первом приближении.

Рассмотрим в поперечном сечении лобового шва элемент, вырезанный двумя смежными радиальными плоскостями и концентрическими цилиндрическими поверхностями (рис. 5-4, *а*). По формулам «плоской задачи» теории упругости, решаемой в полярных координатах, в шве при указанном его загружении образуются напряжения трех видов:

нормальные напряжения σ_r, направленные по радиусам, соединяющим рассматриваемый элемент dF в сечении шва с его вершиной;

нормальные напряжения σ_0, действующие по граням элемента по направлениям, перпендикулярным к радиусам;

касательные напряжения $\tau_{r\theta}$

На основе данных теории упругости доказано, что напряжения σ_r, σ_0, $\tau_{r\theta}$ зависят от одного переменного Θ и не зависят от

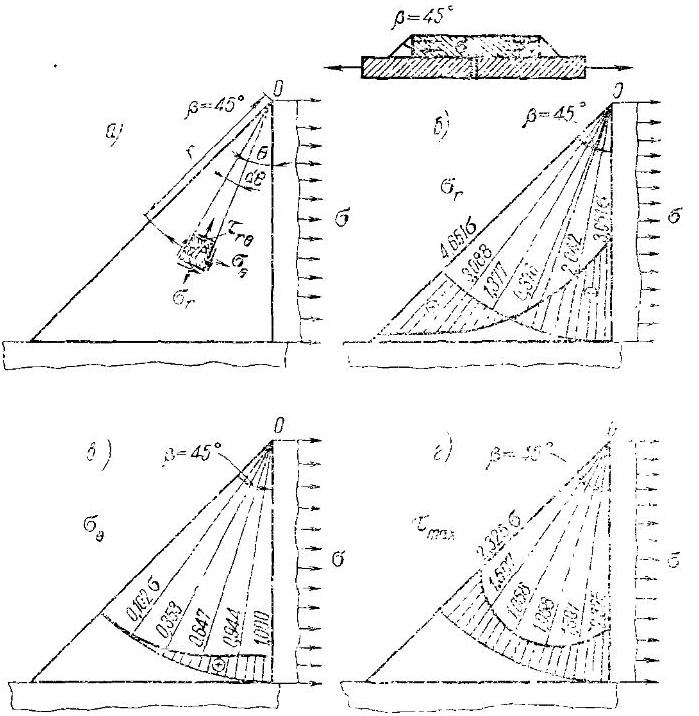


Рис. 5-4. Распределение напряжений в лобовом шве при $\beta=45°$:

а) шов и элемент dF; *б*) эпюра σ_r; *в*) эпюра σ_0; *г*) эпюра τ_{max}

длины r (r — расстояние от рассматриваемого элемента до вершины шва).

Эпюры напряжений σ_r и σ_0 в шве приведены на рис. 5-4, *б*, *в*, а касательных напряжений τ_{max} — на рис. 5-4, *г*; τ_{max} определяют по формуле

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_r - \sigma_0)^2 + 4\tau^2}.$$

Наибольшие значения имеют нормальные напряжения σ_r, особенно на радиусах в точках, где $\Theta=45°$ и $\Theta=0°$ (рис. 5-4, *б*). Эти напряжения двузначны. Наибольшее напряжение σ_θ превышает в 4,65 раза напряжение σ в основном металле накладки.

Величина расчетного напряжения в лобовом шве, имеющем форму равнобедренного треугольника, на плоскости под углом 45° к горизонту определяется по формуле

$$\tau = \frac{\sigma\kappa}{0{,}7\ \kappa} = 1{,}4\sigma, \qquad (5.6)$$

где κ — длина катета шва;

σ — напряжение в накладке.

Таким образом, наибольшее значение коэффициента концентрации напряжений в лобовом шве при $\beta=45°$ равно

$$K_т = \frac{4{,}65}{1{,}4} = 3{,}32.$$

Как видно из рис. 5-4, *б, в*, напряжения σ_θ значительно меньше, чем σ_r, и не превышают σ.

При изменении очертания треугольного лобового шва, т. е. при увеличении β до 60°, напряжения значительно уменьшаются.

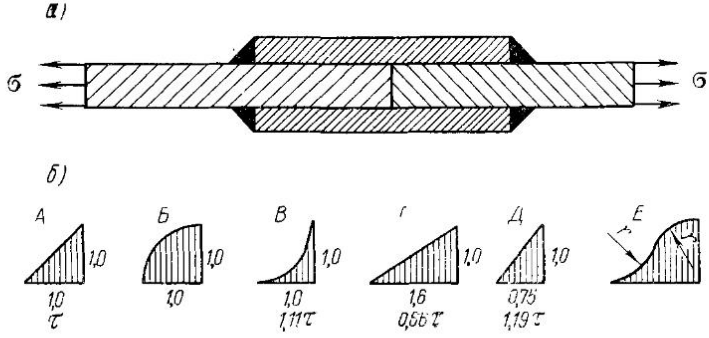


Рис. 5-5. Результаты опытного исследования величин напряжений в лобовых швах в зависимости от их очертаний:

а) вид соединения; *б*) очертания лобовых швов и коэффициенты концентрации напряжений

С помощью экспериментов были изучены коэффициенты концентрации напряжений в лобовых швах, имеющих очертания, указанные на рис. 5-5. Если принять величину наибольшего напряжения, определенного опытным путем, в образце *А* (рис. 5-5, *б*) за единицу, то наибольшие напряжения в других образцах (*Б—Д*) будут выражены цифрами, приведенными на рис. 5-5, *б*. Особенно пониженные значения коэффициентов концентрации получены при испытании шва с профилем Е.

Чтобы уменьшить концентрацию напряжений и улучшить условия работы лобового шва, необходимо придать ему форму неравнобедренного треугольника с основанием, равным 1,5—3,0 высоты.

Приведенные величины напряжений в лобовых швах верны при условии, если σ не превышают предела текучести $\sigma_т$. При $\varepsilon < \varepsilon_т$ распределение напряжений в лобовом шве изменяется.

С использованием уравнений пластичности можно показать, что в лобовом шве при $\beta = 60°$ образование первичных пласти-

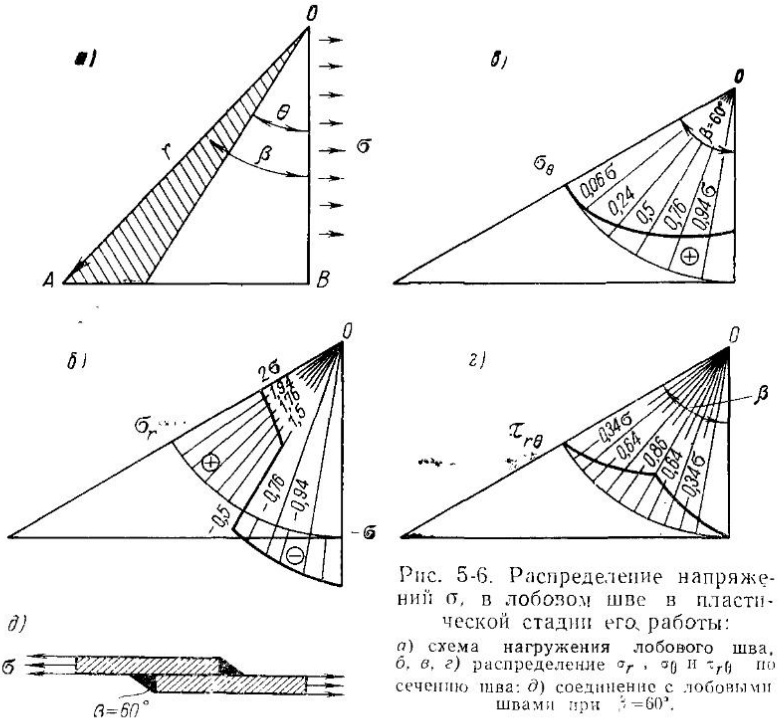


Рис. 5-6. Распределение напряжений σ, в лобовом шве в пластической стадии его работы:

а) схема нагружения лобового шва, *б, в, г*) распределение σ_r, σ_θ и $\tau_{r\theta}$ по сечению шва; *д*) соединение с лобовыми швами при $\beta = 60°$.

ческих деформаций имеет место при напряжении в листе, равном 39,0% от предела текучести. В случае дальнейшего нагружения пластические деформации распространяются на все поперечное сечение углового шва.

При достижении предельного состояния, т. е. момента, когда все точки шва при $\beta = 60°$ имеют эквивалентные напряжения, равные $\sigma_т$, эпюра распределения напряжений σ_r будет иметь вид, как показано на рис. 5-6. Напряжение в листе σ при этом равно $q_{пред}$. Два лобовых шва с $\beta = 60°$ образуют соединение с несущей способностью, равной целому сечению.

В действительности очертания угловых швов не соответствуют строго треугольным. Проплавление основного металла способствует уменьшению концентрации напряжений в швах, и их несущая способность повышается по сравнению с величинами, указанными выше.

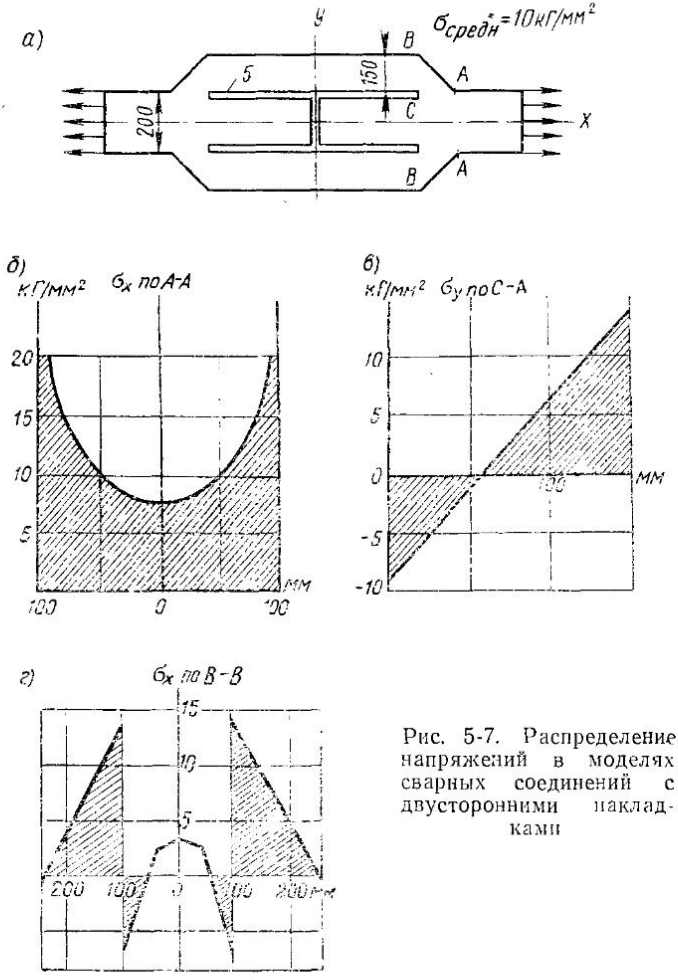


Рис. 5-7. Распределение напряжений в моделях сварных соединений с двусторонними накладками

На рис. 5-7, *б*, *в* и *г* показаны эпюры распределения напряжений в моделях, имитирующих работу сварных соединений с двусторонними накладками (рис. 5-7, *а*). Значительная концентрация напряжений σ_x в этом типе наблюдается в точке A сечения $A—A$ (рис. 5-7, *б*). При напряжении $\sigma_x = 10$ *кГ/мм²* в зо-

не концентратора оно повышается до 20 *кГ/мм*². Это напряжение в сечении *B—B* (рис. 5-7, *г*) имеет меньшую величину и не превышает в точке *C* значений 14 *кГ/мм*². В сечении *C—A* (рис. 5-7, *в*) напряжение σ_y достигает 15 *кГ/мм*².

В соединениях внахлестку (рис. 5-8) распределение усилий между двумя поперечными швами происходит равномерно лишь в случае одинаковых толщин соединяемых деталей. При разной их толщине усилия между швами распределяются неравномерно. Они зависят от отношения s_1/s_2, а также от схемы действия нагрузок. В большинстве случаев соединения с двойной нахлесткой работают по схеме рис. 5-8, *а*, но в некоторых случаях возможна работа по схеме рис. 5-8, *б*.

При работе соединения по схеме, показанной на рис. 5-8, *а*, усилие P_1 в шве № 1 относится к усилию P_2 шва № 2, как

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(1 + \frac{s_2 - s_1}{s_1} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{0{,}66\, l}{0{,}66\, l + 2s_2}\right), \qquad (5.7)$$

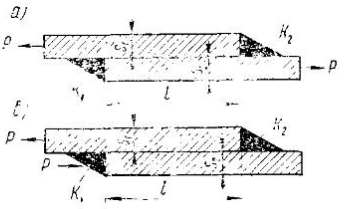


Рис. 5-8. Работа сварных соединений внахлестку с двумя лобовыми швами:
K_1 и K_2 — катеты швов

где s_2 — бóльшая толщина соединяемых частей;
s_1 — мéньшая толщина;
l — длина нахлестки.

В случае равных толщин $s_1 = s_2$ $P_1 = P_2$. При $s_2 \neq s_1$ распределение усилий зависит от отношения s_2/s_1 и от l.

При $s_2 = 2s_1$ и $l = 5s_2$

$$\frac{P_1}{P_2} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{0{,}66 \cdot 5}} = 1{,}77.$$

При $s_2 = 2s_1$ и $l = 10s_2$

$$\frac{P_1}{P_2} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{0{,}66 \cdot 10}} = 1{,}86.$$

При работе соединения по схеме рис. 5-8, *б*

$$\frac{P_1}{P_2} = 1 + \frac{1{,}32l}{0{,}66l + 2s_2} \cdot \frac{s_2}{s_1}.$$

В этом случае распределение усилий между P_1 и P_2 еще более неравномерно, чем при работе соединения по схеме рис. 5-8, *а*.

Возле ребер жесткости, приваренных к растягиваемому элементу (рис. 5-9, *а*), образуется концентрация напряжений σ_x по

сечению $A—A$. Эпюра этих напряжений показана на рис. 5-9, *б* на основе эксперимента.

При односторонней приварке ребра жесткости (рис. 5-9, *в*) концентрация напряжений σ_x, как показывают эксперименты, не больше, а даже несколько меньше, чем при двусторонней.

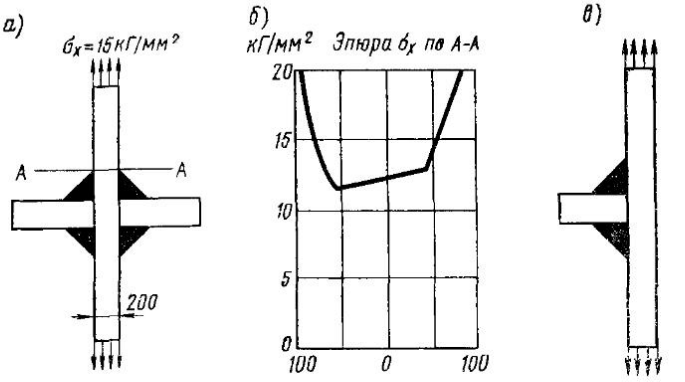


Рис. 5-9. Работа сварных соединений металлов:
а) двусторонние ребра жесткости; *б*) эпюра σ_x по $A—A$; *в*) одностороннее ребро жесткости

§ 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВО ФЛАНГОВЫХ ШВАХ

Приведенные в главе III расчетные формулы для определения условных (номинальных) напряжений во фланговых швах были составлены в предположении, что распределение напряжений по длине шва равномерно. Это предположение являлось рабочей гипотезой, упрощающей методику расчета прочности. Определим напряжения во фланговом шве более точным методом.

В действительности, при нахождении напряжений во фланговых швах следует учитывать упругие деформации соединяемых частей и швов. Основные элементы под действием растягивающих усилий удлиняются и перемещаются: во фланговых швах образуются сдвиговые деформации. Прямоугольный элемент dx шва $11—22$ обращается в $1'1''—2'2''$ (рис. 5-10, *а*). Наибольшие сдвиги наблюдаются в крайних точках шва, наименьшие — в средних. Поэтому касательные напряжения распределяются по длине швов неравномерно.

В соединениях, у которых $F_1=F_2=F$, усилие в шве на единицу его длины определяется уравнением

$$q_x = \frac{\alpha P}{4}\left[\frac{\operatorname{ch}\alpha x + \operatorname{ch}\alpha (l-x)}{\operatorname{sh}\alpha l}\right]. \qquad (5.8)$$

Эпюра q_x имеет вид, приведенный на рис. 5-10, *б*. Величина q_x выражается при этом функцией гиперболического косинуса, называемой цепной линией.

Наибольшие значения q_x при $x=0$ и $x=l$ будут

$$q_{max} = \frac{\alpha P}{4}\left(\frac{1+\operatorname{ch}\alpha l}{\operatorname{sh}\alpha l}\right) \approx \frac{\alpha P}{4}\operatorname{cth}\alpha l, \qquad (5.9)$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{4G}{EF}}; \qquad (5.10)$$

E и G — модули упругости первого и второго рода;
F — площадь поперечного сечения элемента.

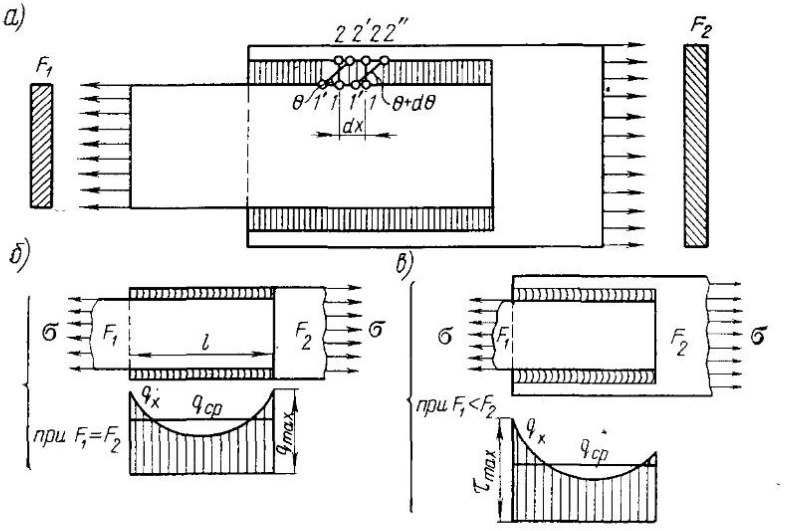


Рис. 5-10. Распределение усилий в соединении с длинными фланговыми швами, прикрепляющими узкую полосу

а) общий вид соединения; *б*) распределение q_x по длине шва при $F_1=F_2$; *в*) распределение q_x по длине шва при $F_1<F_2$

Для равнопрочных соединений при условии, что $[\tau']=0{,}6[\sigma]_р$, теоретический коэффициент концентрации напряжений во фланговом шве

$$K_\tau = \frac{q_{max}}{q_{ср}} = 0{,}57\sqrt{\frac{l}{0{,}7\,\kappa}}, \qquad (5.11)$$

где l — длина шва;
κ — его катет.

В редких случаях соединения с фланговыми швами могут быть нагружены по схеме, изображенной на рис. 5-11.

При этом

$$q_{max} = \alpha P \frac{\mathrm{ch}\alpha l + 1}{\mathrm{ch}\alpha l - 1}. \qquad (5.12)$$

В длинных швах

$$q_{max} = \alpha P. \qquad (5.12')$$

Распределение напряжений во фланговых швах по их длине в схеме нагружения, показанной на рис. 5-11, еще более неравномерно, чем в схеме нагружения, приведенной на рис. 5-10.

При неравновеликих площадях поперечных сечений элементов F_1 и F_2, например при $F_1 < F_2$, усилие (рис. 5-10, *в*) равно

$$q_x = \frac{\alpha P}{2} \cdot \frac{F_1 \mathrm{ch}\alpha x + F_2 \mathrm{ch}\alpha (l - x)}{2 (F_1 + F_2) \mathrm{sh}\alpha l}, \qquad (5.13)$$

при этом

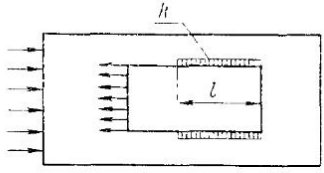


Рис. 5-11. Схема работы фланговых швов

$$\alpha = \sqrt{\frac{2G (F_1 + F_2)}{EF_1F_2}}. \qquad (5.14)$$

Распределение q_x вдоль швов имеет асимметричный характер. При $x = 0$

$$q_0 = \frac{\alpha P}{2} \cdot \frac{F_1 + F_2 \mathrm{ch}\alpha l}{(F_1 + F_2) \mathrm{sh}\alpha l}; \qquad (5.15)$$

при $x = l$

$$q_l = \frac{\alpha P}{2} \cdot \frac{F_1 \mathrm{ch}\alpha l + F_2}{(F_1 - F_2) \mathrm{sh}\alpha l}. \qquad (5.16)$$

При условии, что $F_1 < F_2$, $q_0 > q_l$, наибольшее q имеет место со стороны элемента с меньшим поперечным сечением. Коэффициент концентрации напряжений при условии, что прочность швов равна прочности меньшего поперечного сечения основного металла F_1, равен

$$K_\tau = 0{,}87 \sqrt{\frac{1}{1 + \mu}} \frac{\mu \mathrm{ch}\,\alpha l + 1}{\mathrm{sh}\,\alpha l}, \qquad (5.17)$$

где $\mu = F_1/F_2$.

Эпюры распределения q_x имеют вид, показанный на рис. 5-10, *в*, при условии, что все деформации упругие.

Рассмотрим распределение напряжений в листе между фланговыми швами (рис. 5-12). Обозначим ширину листа $2a$, длину фланговых швов l. Допустим, что фланговые швы имеют небольшую длину, и примем приближенно, что распределение напряжений τ вдоль их длины происходит равномерно. Ширину же

листов $2a$ будем считать значительной и определять концентрацию напряжений σ в металле листов, вызванную фланговыми швами. Силовые линии в растянутом листе сгущаются в зоне фланговых швов, а средняя часть напряжена меньше крайних волокон. Поэтому в рассматриваемом соединении неравномерно распределяются нормальные напряжения. Они имеют наибольшую величину в верхних и нижних волокнах накладки и наименьшую — в средних.

Величина напряжения σ_x вдоль оси x на расстоянии y от оси накладки составляет

$$\sigma_x = \tau_0 Vl \frac{\operatorname{ch} Vy}{\operatorname{sh} Va}. \qquad (5.18)$$

где a — половина ширины накладки;
l — половина длины;
$V = 2{,}3/l$;
τ_0 — среднее касательное напряжение, во фланговых швах, равное $\frac{\sigma_{cp}\, as}{0{,}7\, \kappa l}$.

Здесь s — толщина соединяемых листов;
κ — катет шва;
σ_{cp} — среднее напряжение в листах, которое положено в основу условного расчета прочности.

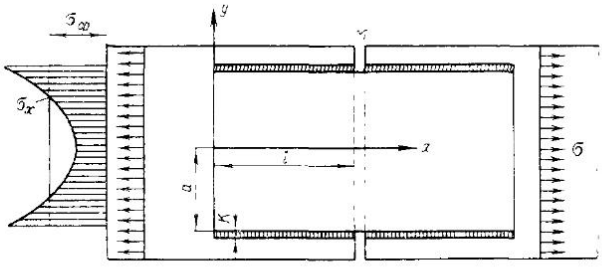


Рис. 5-12. Распределение напряжений в широкой накладке соединения с короткими фланговыми швами

Наибольшая величина напряжения σ_x

$$\sigma_{max} = 2{,}3\tau_0 \operatorname{cth} 2{,}3 \frac{a}{l}.$$

Эпюра σ_x имеет вид, изображенный на рис. 5-12, и выражается с помощью гиперболического косинуса цепной линии.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений для этого соединения выражается через гиперболический котангенс при $\kappa = s$

$$K_т = 3{,}3 \frac{\operatorname{cth} 2{,}3\, a/l}{l/a}, \qquad (5.19)$$

где $2a$ — ширина накладки.

При

$$a/l = 0{,}1;\ 0{,}5;\ 1{,}0;\ 2{,}0$$
$$K_т = 1{,}45;\ 2{,}01;\ 3{,}37;\ 6{,}61.$$

Наибольшие напряжения возникают в крайних точках среднего сечения накладки.

Приведенные цифры показывают, что при значительном увеличении ширины $2a$ листа, по сравнению с длиной фланговых швов l, коэффициент концентрации нормальных напряжений в листе резко увеличивается.

Таким образом, в соединениях с фланговыми швами всегда возникает концентрация напряжений.

В соединениях с длинными фланговыми швами при небольшом расстоянии между ними концентрация образуется главным образом в концах фланговых швов (концентрация касательных напряжений τ_x).

В соединениях с короткими фланговыми швами при относительно большом расстоянии между ними концентрация возникает преимущественно в основном металле на участке между швами (концентрация нормальных напряжений σ_x).

В соединениях, применяемых в сварных конструкциях, образуются обе разновидности концентраций в более или менее резко выраженной форме.

§ 5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ЛОБОВЫМ И ФЛАНГОВЫМИ ШВАМИ

Распределение напряжений в соединениях с накладками неравномерно. В тех соединениях, где стыковые швы перекрыты односторонними накладками, образуется эксцентриситет, в результате которого появляется изгибающий момент. В таких соединениях напряжения не только не уменьшаются по сравнению со стыковым швом без накладки, но даже заметно возрастают. В соединениях, не имеющих стыковых швов, накладки также вызывают значительную концентрацию напряжений.

На рис. 5-13 показаны результаты экспериментального изучения распределения напряжений в различных поперечных сечениях ($В—В$; $Б—Б$; $А—А$) соединений с односторонними наклад-

ками (рис. 5-13, *а*). Накладки приварены к соединяемым полосам только фланговыми швами.

Из рис. 5-13, *б* следует, что распределение напряжения по поперечным сечениям элементов в зоне накладок очень неравномерно. В точках, близко расположенных к фланговым швам,

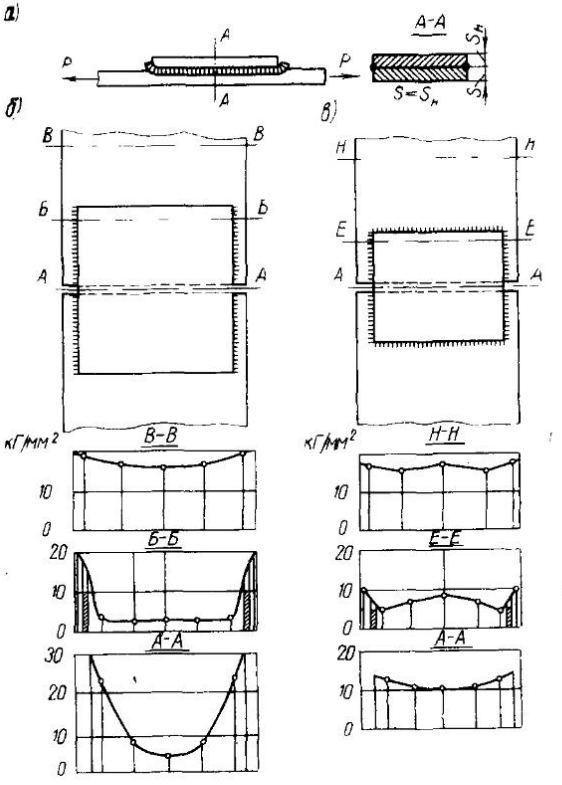


Рис. 5-13. Распределение напряжений в соединениях с накладками без стыковых швов:

а) вид соединения; *б*) неравномерное распределение σ между фланговыми швами; *в*) равномерное распределение σ в соединениях с лобовым и фланговыми швами

образуется концентрация напряжений; точки, удаленные от швов и лежащие возле оси элемента, напряжены весьма слабо. Вдали от накладок эпюра напряжений в поперечном сечении выравнивается, и элемент работает более равномерно. Неравномерность распределения напряжений по поперечному сечению накладок значительно уменьшается при добавлении к фланговым швам лобового.

На рис. 5-13, *в* показано распределение напряжений в соединении с накладками в сечениях *Н—Н*, *Е—Е*, *А—А*. По сечению напряжения распределены также неравномерно, однако концентрация напряжений в соединениях, показанных на рис. 5-13, *б*, значительно больше, чем в соединениях, показанных на рис. 5-13, *в*.

§ 6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В РОЛИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ, СВАРЕННЫХ КОНТАКТНЫМ СПОСОБОМ

В соединениях, выполненных роликовой контактной сваркой, неравномерность распределения напряжений вызвана следующими факторами:

1) неравномерностью распределения напряжений σ в зоне шва по толщине детали при растяжении;

коэффициент концентрации напряжений $K_т$ при растяжении деталей может быть приближенно выражен формулой

$$K_т = 2{,}3\ \frac{s}{b}\ \text{cth}\ 2{,}3\ \frac{s}{b}, \qquad (5.20)$$

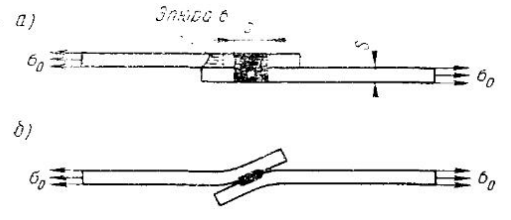


Рис. 5-14. Соединения с роликовыми швами:
а) неравномерное распределение σ по толщине;
б) изгиб соединения

где s — толщина детали;

b — ширина роликового шва.

Как правило, $K_т$ невелик, например, при $b = 2{,}3s$

$$K_т = \text{cth}\ 1 \approx 1{,}32$$

при $b = 4{,}6\ s$

$$K_т = 1{,}09,$$

т. е. $K_т$ в большинстве случаев лишь незначительно превышает единицу.

Неравномерное распределение σ при растяжении показано на верхней эпюре рис. 5-14, *а*;

2) изгибом детали;

изгиб деталей показан на нижней эпюре рис. 5-14. *б*.

Напряжение от изгиба

$$\sigma_{изг} = \frac{3\sigma_0}{1 + \frac{b}{s}\sqrt{\frac{3\sigma_0}{E}}}, \qquad (5.21)$$

где σ_0 — номинальное напряжение в соединении от растягивающей силы.

Как видно из формулы (5.21), напряжение от изгиба $\sigma_{изг}$ не является линейной функцией от номинального напряжения σ_0. Это объясняется тем обстоятельством, что с увеличением σ_0 уменьшается плечо силы. Например, при $b/s=3$ и $\sigma_0=80$ *кГ/мм²*

$$\sigma_{изг}=\frac{3\cdot 80}{1+3\sqrt{\frac{3\cdot 80}{20000}}}=135\ кГ/мм^2;$$

$$\text{отношение}\quad \frac{\sigma_{изг}}{\sigma_0}=\frac{135}{80}=1{,}69;$$

при $\sigma_0=20$ *кГ/мм²*

$$\sigma_{изг}=\frac{3\cdot 20}{1+3\sqrt{\frac{3\cdot 20}{20000}}}=\frac{60}{1{,}16}=51\ кГ/мм^2;$$

$$\text{отношение}\quad \frac{\sigma_{изг}}{\sigma_0}=\frac{51}{20}=2{,}52.$$

Чем меньше напряжение σ_0, тем ближе $\frac{\sigma_{изг}}{\sigma_0}$ к трем.

Следует помнить, что вывод верен лишь при работе соединений в пределах упругих деформаций. За пределом текучести происходит некоторое выравнивание напряжений и коэффициент концентрации при этом снижается.

§ 7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ТОЧЕЧНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ, СВАРЕННЫХ КОНТАКТНЫМ СПОСОБОМ

В точечных соединениях возникает концентрация напряжений, обусловленная рядом факторов.

1. В результате сгущения силовых линий основной металл испытывает концентрацию напряжений в надточечной зоне (рис. 5-15). Интенсивность сгущения определяет концентрацию. Она растет с ростом отношения шага t (расстояние между точками в направлении, перпендикулярном действию силы) к диаметру точки d (рис. 5-15, *а*). Расчетом установлено, что коэффициент концентрации напряжений $K_т$ в этом соединении находится в пределах

$$0{,}62\,t/d < K_{т_1} < t/d$$

и может вычисляться по приближенной формуле

$$K_{т_1}=0{,}38+0{,}62\,t/d. \qquad (5.22)$$

На рис. 5-15, *б* показана эпюра распределения σ в продольном сечении соединения. Максимального значения напряжение достигает в сечении *О—О*.

Усилия в отдельных точках соединения, расположенных в продольном ряду, при их работе в упругой области при условии, что поперечные сечения соединяемых элементов $F_1 = F_2$ вы-

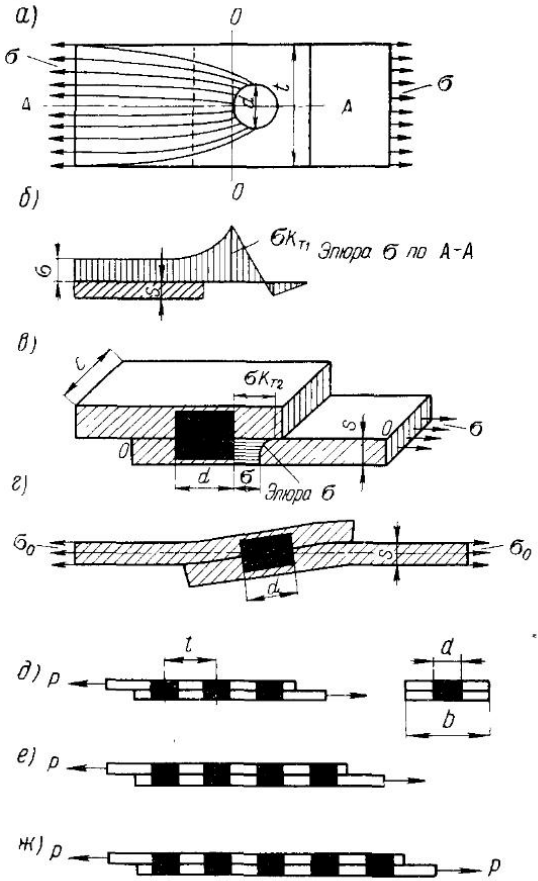


Рис. 5-15. Распределение напряжений в точечных соединениях:

а) общий вид; *б*) распределение σ в продольном сечении; *в*) распределение σ по толщине элемента возле точки; *г*) изгиб точечного соединения; *д, е, ж*) примеры соединений с тремя, четырьмя и пятью точками

числяются по следующим формулам:

при числе точек в ряду $i=3$ усилия в крайних точках (рис. 5-15, *д*)

$$P_1 = P_3 = \frac{m+1}{2m+3} P, \tag{5.23}$$

в средней точке

$$P_2 = P \frac{1}{2m+3}; \tag{5.24}$$

при числе точек в ряду $i=4$ усилия в крайних точках (рис. 5-15, *е*)

$$P_1 = P_4 = \frac{2m+1}{4m+4} P; \tag{5.25}$$

при числе точек в ряду $i=5$ усилия в крайних точках (рис. 5-15, *ж*)

$$P_1 = P_5 = \frac{2m^2+4m+1}{4m^2+10m+5} P, \tag{5.26}$$

$$P_2 = P_4 = \frac{m+1}{4m^2+10m+5} P. \tag{5.27}$$

В средней точке

$$P_3 = \frac{1}{4m^2+10m+5} P, \tag{5.27'}$$

где P — усилия в соединении;

t — расстояние между точками в продольном шве;

s — толщина соединяемых элементов;

$m = t/s\xi$,

где

$$\xi = \frac{1}{0{,}53\,(\ln b'd - 0{,}46)}; \tag{5.27''}$$

b — ширина образца;

d — диаметр точки.

Относительные значения усилий сварных точек в продольном ряду даны ниже.

Примем, что расстояние между точками $t=3d$, ширина образца (шаг поперечного ряда) также $b=3d$; $\xi=2{,}95$ подсчитан по формуле (5.27″).

При этих условиях распределение усилий между точками в продольном ряду, подсчитанных по формулам (5.23) ÷ (5,27), даны в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Распределение усилий

Номера точек	Число точек в продольном ряду		
	3	4	5
1	0,444 *P*	0,436 *P*	0,435 *P*
2	0,112 *P*	0,064 *P*	0,058 *P*
3	0,444 *P*	0,064 *P*	0,014 *P*
4		0,436 *P*	0,058 *P*
5			0,435 *P*

Крайние точки оказываются сильно перегруженными, средние — недогруженными. С увеличением количества точек в продольном ряду коэффициент перегрузки возрастает. Как видно из таблицы, увеличение числа точек в продольном ряду существенно не меняет усилия, воспринимаемого крайними точками. Подобное явление имеет место при работе в пределах упругости. За пределами текучести наступает значительное выравнивание усилий.

2. В соединении возникает изгиб, как показано на рис. 5-15, *в, г,* который вызывает дополнительное напряжение изгиба $\sigma_{изг}$, вычисляемое по формуле

$$\sigma_{изг} = \frac{3\sigma_0}{1 + \frac{d}{s}\sqrt{\frac{3\sigma_0}{E}}}, \qquad (5.28)$$

где σ_0 — напряжение в основном металле соединения.

Если принять $\sigma_0/E = 0{,}001$, то

$$\sigma_{изг} = \frac{3\sigma_0}{1 + 0{,}055\, d/s}; \qquad (5.29)$$

при $d/s = 3$ $\sigma_{изг} = 2{,}6\sigma_0$ уменьшает свою величину с уменьшением толщины соединяемых деталей s.

При учете указанных концентраторов максимальное расчетное напряжение в элементах, соединяемых точкой, для типовых соотношений размеров в зоне точки приближенно равно

$$\sigma_{max} = \sigma_{изг}\ K_{т_1}. \qquad (5.30)$$

Все приведенные соотношения выведены в предположении работы соединений в пределах упругих деформаций.

Условные способы расчета точек, изложенные в главе IV, не дают действительного представления о полях напряжений в околошовных зонах в пределах упругости. В действительности, сварная точка испытывает напряжения в пределах упругих деформаций во много раз больше расчетных. Этим и объясняется низкая прочность точек при работе под переменными нагрузками.

При статических нагрузках, за пределом упругих деформаций, концентрация напряжений в значительной степени смягчается, и величины разрушающих усилий, найденные опытным путем, незначительно отличаются от расчетных.

Распределение напряжений в зоне концентраторов следует распределению гидродинамических потоков. На рис. 5-16, *а* показаны концентраторы, образуемые в лобовом шве, на

рис. 5-16, *б* — в стыковом, на рис. 5-16, *в* — вдоль флангового шва, на рис. 5-16, *г* — в месте резкого изменения ширины растя-

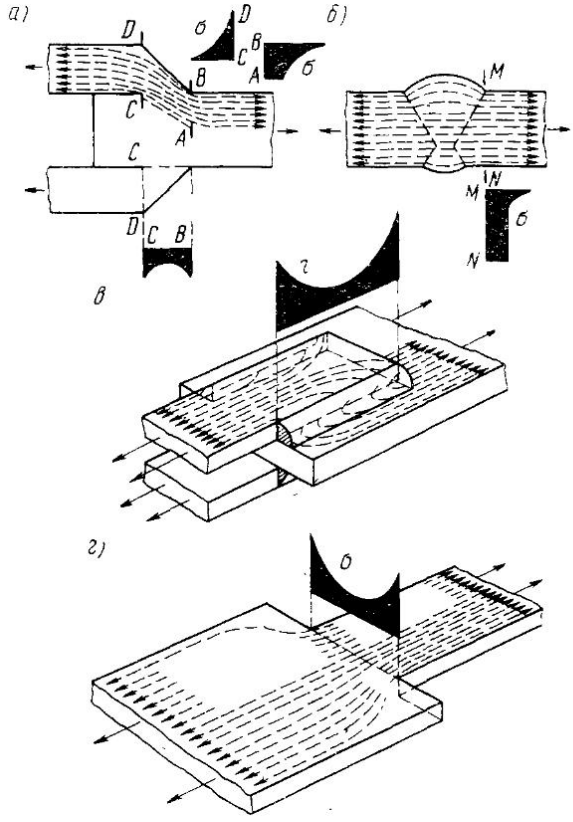


Рис. 5-16. Распределение силовых потоков и напряжений σ и τ в зоне концентраторов:

а) лобовые швы; *б)* стыковые швы; *в)* фланговые швы; *г)* при уширении растянутых элементов

гиваемого элемента. Эпюры нормальных напряжений σ и касательных τ изображены залитыми.

§ 8. КОНЦЕНТРАЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗОНЕ ДЕФЕКТОВ

Острыми концентраторами являются непровары швов и трещины. В результате образования сложных пространственных полей напряжений резко снижаются пластические свойства. На рис. 5-17, *а* и *б* изображены величины пластических деформаций в стыковом шве без дефектов соединения из малоуглеродистой

стали при разрушении растяжением. Рис. 5-17, *а* соответствует продольным деформациям, рис. 5-17, *б* — поперечным. Деформации были замерены после разрушения. Разными штриховыми линиями на рис. 5-17, *а* показаны участки соединения встык, где остаточные деформации ~ 92%, 71—80%, 51—70%

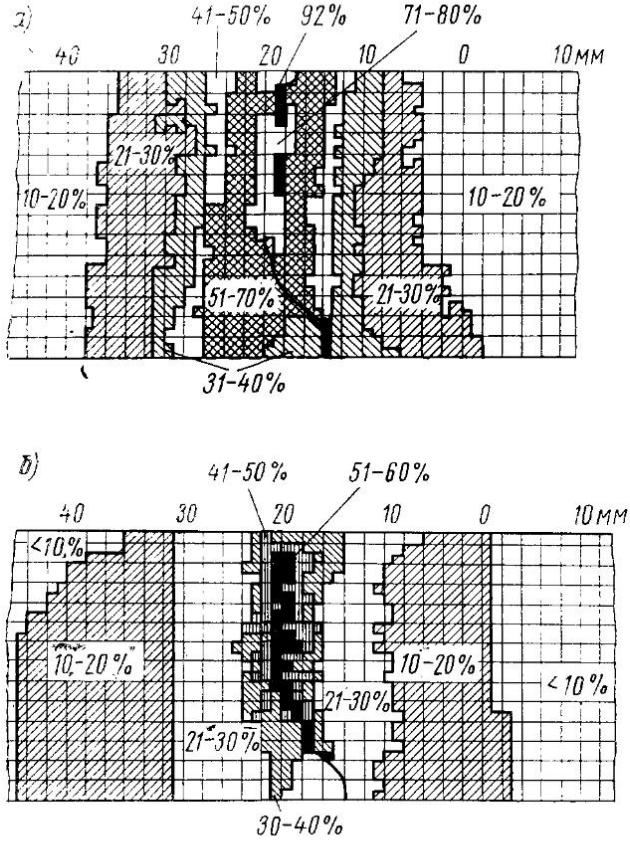


Рис. 5-17. Эпюры продольных (*а*) и поперечных (*б*) пластических деформаций в стыковом шве при разрушении, выраженные в процентах

и т. д.; на рис. 5-17, *б* — 51—60%, 41—50% и т. д. Остаточные деформации были замерены также в шве без непроваров. При непроваре участки пластических деформаций резко сократились.

ГЛАВА VI

ДЕФОРМАЦИИ, НАПРЯЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ПРОЦЕССОМ СВАРКИ

§ 1. ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ НАГРЕВЕ И ОСТЫВАНИИ

Помимо напряжений и деформаций, возникающих в деталях под действием приложенных нагрузок, в них могут быть так называемые собственные напряжения, которые существуют в телах даже при отсутствии воздействия каких-либо внешних сил. Причины образования собственных напряжений весьма многообразны. Одной из них является неравномерный нагрев тела.

Рассмотрим вначале образование напряжений в стержне, который вставлен в массивную жесткую деталь без зазора и нагрет до температуры T (рис. 6-1, *а*). Очевидно, что в нем возникнут напряжения сжатия. Если величина деформации αT значительна (рис. 6-1, *б*), то напряжения достигнут предела текучести $\sigma_т$, и в стержне произойдут пластические деформации. Величина напряжений при этом будет соответствовать напряжению в точке A (рис. 6-1, *б*). При остывании стержня напряжения сжатия будут в нем уменьшаться, следуя закону упругой разгрузки (прямая AB), и в точке B окажутся равными нулю. При дальнейшем остывании между стержнем и деталью образуется зазор $\varepsilon_{ост}\, l$, где $\varepsilon_{ост}$ — остаточное относительное укорочение стержня, возникшее в результате пластической деформации при нагреве. Если бы стержень был прикреплен к детали, то в нем после остывания возникли бы собственные напряжения растяжения.

Образование собственных напряжений растяжения проследим на примере длинной узкой пластины (рис. 6-2, *а*), посередине которой уложен проводник, выделяющий тепло и нагревающий пластину до некоторой температуры T, кривая которой показана на рис. 6-2, *б*. Если бы волокна пластины длиной l не были связаны между собой, то они удлинились бы на абсолютную величину αTl. Будучи связанными между собой, все волокна

фактически удлиняются на относительную величину ε (рис. 6-2, *б*).

Положение прямой линии m—m находится из условия уравновешенности эпюры: площади, заключенные между прямой m—m и кривой αT (показаны штриховкой), в сумме с учетом их знака должны давать величину, равную нулю*. При этом по оси пластины образуются напряжения сжатия, а по ее краям — напряжения растяжения. Допустим, что максимальная деформация ε_{max} в области сжатия превысила величину $\varepsilon_т$, а материал пластины является идеально упруго-пластичным (см. диаграмму на рис. 6-1, *б*). Тогда эпюра упругих деформаций несколько изменит свой вид (рис. 6-2, *в*). Прямой штриховкой на рис. 6-2, *в* показаны упругие деформации, а косой — пластические. Положение прямой m'—m' при этом изменится, так как эпюра упругих деформаций должна быть уравновешена вслед-

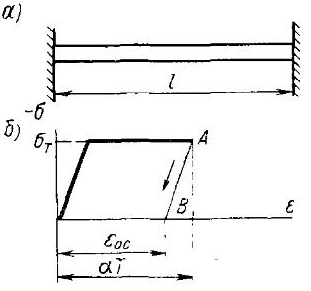


Рис. 6-1. Схема образования напряжений и пластических деформаций при нагреве стержня:

а) стержень; *б*) диаграмма $\sigma = f(\varepsilon)$ идеально упруго-пластичного металла

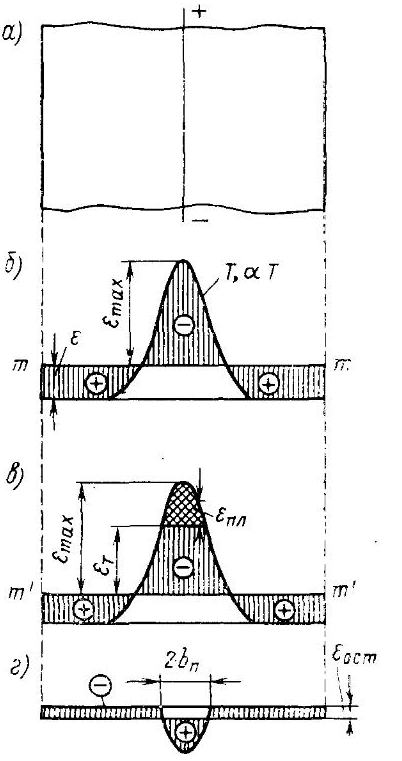


Рис. 6-2. Температурные и остаточные напряжения в пластине при симметричном нагреве (плюс означает образование растягивающих напряжений, минус — сжимающих):

а) пластина; *б*) временные деформации при $\varepsilon_{max} < \varepsilon_т$; *в*) временные деформации при $\varepsilon_{max} > \varepsilon_т$; *г*) остаточные деформации

* Собственные напряжения всегда уравновешены по сумме сил и по сумме моментов в любом поперечном сечении тела.

ствие уравновешенности собственных напряжений в пределах всего поперечного сечения пластины.

Волóкна, не испытавшие пластической деформации, при остывании стремятся сократиться до длины, которую они имели перед нагревом. Волóкна, испытавшие пластическую деформацию при нагреве, после остывания укоротились бы на величину $\varepsilon_{пл}$, если бы при этом они не были связаны с остальными волокнами. Эпюра $\varepsilon_{пл}$ показана на рис. 6-2, *г* кривой линией. Будучи связанными между собой, волокна сокращаются на величину $\varepsilon_{ост}$ (рис. 6-2, *г*). При этом по оси образуются собственные напряжения растяжения, а по краям — напряжения сжатия. Эти

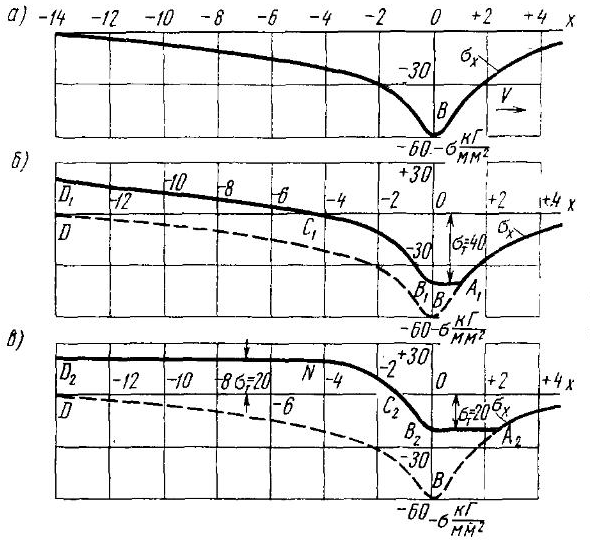


Рис. 6-3. Схема образования временных и остаточных продольных напряжений σ_x в процессе нагрева кромки пластины движущимся источником тепла при различных значениях предела текучести металла:

а) $\sigma_т \to \infty$; *б*) $\sigma_т = 40$ *кГ/мм²*; *в*) $\sigma_т = 20$ *кГ/мм²*

напряжения носят название *остаточных*, в отличие от напряжений при нагреве, которые называются *временными*, или *температурными*. Зона шириной $2b_н$ (рис. 6-2, *г*), где происходили при нагреве пластические деформации, носит название *зоны пластических деформаций*.

Если источник нагрева перемещается, то образование собственных деформаций и напряжений происходит значительно сложнее, чем в двух предыдущих случаях. Допустим, по краю пластины перемещается источник нагрева, например в виде

газового пламени, который создает в пластине установившееся температурное поле. Допустим также, что нам известна кривая изменения сжимающих напряжений σ_x в крайнем волокне пластины (рис. 6-3, *а*). Если напряжения σ_x не достигают $\sigma_т$, то после полного остывания остаточные напряжения будут отсутствовать.

Предположим, что по такому же режиму нагревается кромка металла с пределом текучести $\sigma_т = 40$ *кГ/мм*^{2} (рис. 6-3, *б*). При этом будем полагать, что металл не нагревается выше температуры, при которой происходит снижение предела текучести, а модуль упругости E остается неизменным. Напряжения σ_x до точки A_1 (рис. 6-3, *б*) будут возрастать, оставаясь меньше предела текучести. После точки A_1 будет происходить пластическая деформация, а напряжения в предположении идеальной пластичности будут оставаться равными пределу текучести $\sigma_т = 40$ *кГ/мм*^{2}. В точке B_1 сжимающие напряжения начнут уменьшаться, следуя по кривой $B_1C_1D_1$, эквидистантной кривой BD. В точке C_1 напряжения окажутся равными нулю, а затем перейдут в растягивающие. После полного остывания возникнут растягивающие напряжения $\sigma_{ост} < \sigma_т = 40$ *кГ/мм*^{2}.

Если предположить, что по такому же режиму нагревается кромка металла с меньшим пределом текучести, например $\sigma_т = 20$ *кГ/мм*^{2}, то картина образования временных и остаточных напряжений изменится (рис. 6-3, *в*). Пластические деформации начнутся раньше и будут протекать вплоть до точки B_2. Затем напряжения сжатия начнут уменьшаться и перейдут в растягивающие. В точке N напряжения достигнут предела текучести и вплоть до полного остывания в металле будет происходить пластическая деформация. Остаточные собственные напряжения растяжения будут равны пределу текучести $\sigma_т = 20$ *кГ/мм*^{2}.

Собственные напряжения классифицируются по нескольким признакам (табл. 6.1). В приведенных выше примерах рассматривались одноосные собственные напряжения 1-го рода, вызванные неравномерным нагревом и термопластической деформацией. В ряде случаев напряжения являются двух- или трехосными. Образование собственных напряжений может происходить вследствие объемных изменений, вызванных структурными превращениями.

§ 2. СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПРИ СВАРКЕ

Определение деформаций и напряжений в ряде случаев производится с учетом зависимости предела текучести $\sigma_т$ (рис. 6-4, *б*) и модуля упругости E от температуры (рис. 6-4, *а*).

В упрощенных расчетах удобнее пользоваться схематизированной диаграммой зависимости предела текучести от темпера-

туры. На рис. 6-4, *б* эти схематизированные зависимости показаны пунктирными линиями. Для малоуглеродистых сталей используется зависимость *1* с изломом при $T=500°$ С и нулевым значением $\sigma_т$ при 600° С, для титанового сплава — прямая *2*.

Зависимость $\sigma=f(\varepsilon)$ обычно принимается, как для идеально-упруго-пластичного тела (см. диаграмму на рис. 6-1, *б*). Это

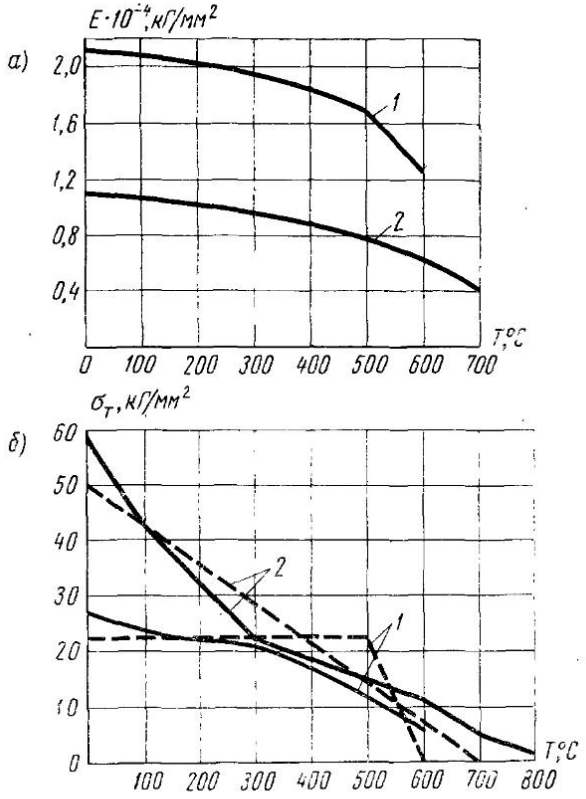


Рис. 6-4. Механические свойства металлов при высоких температурах:

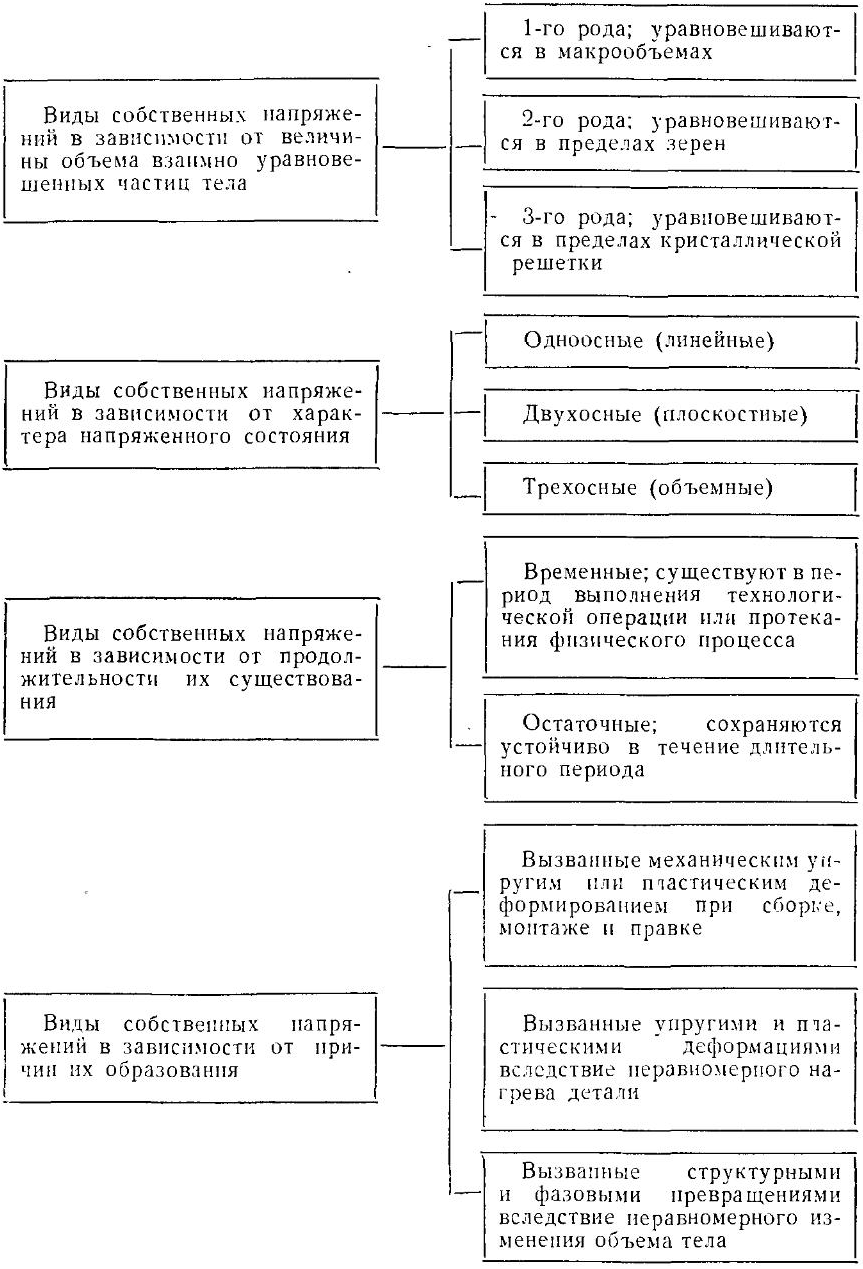
а) модуль упругости малоуглеродистой стали с 0,1% С — *1* и технического титана — *2*; *б*) предел текучести; сплошные кривые — действительные зависимости, пунктирные — схематизированные зависимости

объясняется тем, что при сварке пластические деформации, как правило, невелики и упрочнением металла можно пренебречь.

Для описания температурных полей при расчете деформаций и напряжений можно пользоваться теорией тепловых процессов при сварке. Эта теория дает хорошее совпадение расчетов

Таблица 6.1

Классификация собственных напряжений



с опытами при температурах ниже 800—900° С, т. е. в той области, где обычно и производится вычисление температуры для определения собственных напряжений. Численные значения теплофизических коэффициентов* для расчетов температурных полей и для формул (6.3), (6.5), (6.6) рекомендуется брать из табл. 6.2.

Таблица 6.2

Значения теплофизических коэффициентов

Материал	$\alpha \cdot 10^6$, $\frac{1}{град}$	$T_{ср}$ для λ, a, $c\gamma$	λ, *дж/см · сек · град*	ρc, *дж/см³ · град*	a, *см²/сек*
Малоуглеродистые и низколегированные стали . . .	12—16	500—600	0,38—0,42	4,9—5,2	0,075—0,09
Аустенитные хромоникелевые стали . . .	16—20	600	0,25—0,33	4,4—4,8	0,053—0,07
Алюминий	23—27	300	2,7	2,7	1,0
Технический титан	8,5	700	0,17	2,8	0,06

§ 3. ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ, НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ

Процесс сварки обычно сопровождается неравномерным нагревом, расширением металла и пластическими деформациями, что приводит к образованию собственных деформаций и напряжений. Собственные напряжения создают так называемые внутренние усилия в деталях и конструкциях; под действием этих сил могут возникать значительные перемещения отдельных точек сварных конструкций вследствие их укорочения, изгиба, закручивания и т. п.

* α — коэффициент линейного расширения;
λ — коэффициент теплопроводности;
ρc — объемная теплоемкость;
a — коэффициент температуропроводности.

Собственными деформациями металла и напряжениями в нем обычно интересуются, когда требуется установить изменение свойств металла и его состояния для оценки прочности при статических и переменных нагрузках, коррозионной стойкости, технологической прочности и др.

Остаточные перемещения в сварных конструкциях, вызванные процессом сварки, могут влиять на такие эксплуатационные свойства, как точность, сопротивление потоку жидкости или газа, устойчивость, а также на процесс сборки при производстве сварных конструкций. Перемещения могут заметно искажать заданные проектные формы изделий и ухудшать их вид.

Обычно деформации и напряжения, а также перемещения определяют отдельно, используя различные расчетные методы и приемы.

Рассмотрим образование деформаций и напряжений при однопроходной сварке встык двух пластин в предположении, что напряжения одноосны, соблюдается гипотеза плоских сечений (поперечные сечения свариваемых пластин не искривляются), идеально упруго-пластический материал имеет зависимость $\sigma_т = f(T)$, представленную на рис. 6-4, *б* ломаной линией *1*.

В методе Г. А. Николаева [4] рассматривается распределение деформаций и напряжений в сечении *1—1*, где область, ограниченная изотермой 600° С, имеет наибольшую ширину (рис. 6-5, *б*). Температурные деформации волокон пластины равны величине αT. Так как волокна связаны между собой и деформируются совместно, то в них возникают дополнительные деформации. На рис. 6-5, *а* деформации укорочения показаны со знаком минус, а деформации удлинения — со знаком плюс. Пластические деформации показаны косой штриховкой, упругие — прямой. Величина упругих деформаций на участке l_2 отложена в соответствии с зависимостью $\sigma_т$ от температуры для Ст. 3 (см. рис. 6-4). Прямая *m—m'* на рис. 6-5, *а* показывает положение сечения пластины. Она проводится с учетом условия уравновешенности эпюры упругих деформаций.

Пластические деформации укорочения являются причиной образования остаточных напряжений. На рис. 6-5, *в* они показаны линией *add'a'*. Величина пластических деформаций в зоне с температурой нагрева выше 600° С определяется условно. Деформации при $T \geqslant 600°$ С в расчет не вводятся ввиду того, что при этих температурах предполагается отсутствие напряжений. Поэтому на рис. 6-5, *а* они ограничены линией *gd*.

Эпюра *add'a'* на рис. 6-5, *в* выражает укорочение волокон, которое произошло в зоне пластических деформаций в период нагрева металла. Это укорочение волокон обнаружится лишь при остывании металла и приведет к образованию растягивающих напряжений.

Для определения остаточных деформаций необходимо провести прямую $n—n'$ так, чтобы площадки у положительной и отрицательной части эпюры были равны. Если бы волокна при

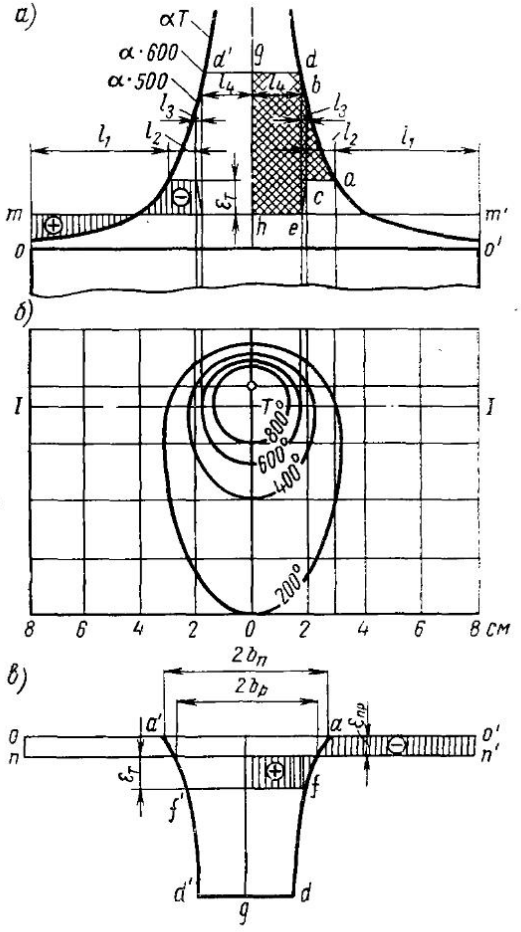


Рис. 6-5. Определение продольных деформаций и напряжений при сварке пластин (по Г. А. Николаеву):

а) распределение температур и деформаций в сечении *I—I*; *б*) распределение температур в пластине; *в*) остаточные деформации и напряжения

остывании сокращались беспрепятственно, то их укорочение соответствовало бы кривой $add'a'$. Связь с соседними волокнами вызывает появление растягивающих напряжений, которые, достигнув $\sigma_т$, создают на стадии остывания пластические деформа-

ции удлинения. Эти деформации удлинения представлены эпюрой $fdd'f'$ (рис. 6-5, *в*). Умножив ординаты эпюры деформаций на модуль упругости E, получим эпюру остаточных напряжений (заштрихованная часть на рис. 6-5, *в*).

Максимальные значения $\sigma_{ост}$ на участке $f—f'$ равны $\sigma_т$. Зона шириной $2b_р$ носит название зоны растягивающих напряжений, а зона $2b_п$ — зоны пластических деформаций.

При расчетном определении перемещений, возникающих в сварных конструкциях от продольного сокращения металла, используется фиктивная усадочная сила $P_{ус}$, величина которой в данном случае пропорциональна площади зоны остаточных пластических деформаций $aff'a'$

$$P_{ус} = \int_{-b_п}^{b_п} \varepsilon_{пл.ост}\, sEdy^*. \tag{6.1}$$

При определении фиктивной силы методом Н. О. Окерблома используется не распределение температур в сечении *1—1*, а эпюра максимальных температур, до которых нагревается металл. Ширина зоны пластических деформаций $2b_п$ оказывается при этом больше действительной. Приближенно усадочная сила (в $кГ$) в этом случае вычисляется для низкоуглеродистых и низколегированных сталей по формуле

$$P_{ус}\ [кГ] = -1{,}7\ \frac{q}{v_{с_i}}, \tag{6.2}$$

где $q/v_с$ — погонная энергия сварки, *дж/см*;

q — эффективная мощность источника тепла, *дж/сек*;

$v_с$ — скорость сварки, *см/сек*.

В действительности усадочные силы меньше вычисляемых по формуле (6.2) примерно на 30%. Для приближенного определения усадочной силы в алюминиевом сплаве АМг6 можно использовать формулы:

в стыковых соединениях

$$P_{ус} = -(1{,}4 \div 1{,}5)\ \frac{q}{v_с}; \tag{6.2'}$$

в тавровых соединениях при одном угловом шве

$$P_{ус} = -(1{,}6 \div 1{,}7)\ \frac{q}{v_с}. \tag{6.2''}$$

---

* Так как $\varepsilon_{пл.ост.}$ в данном случае являются деформациями укорочения и имеют знак минус, то сила $P_{ус}$ является сжимающей. Если учитывать объемные изменения металла в процессе тех фазовых превращений, которые происходят при температурах ниже 600° С, о чем сказано далее, то в некоторых зонах по ширине сварного соединения величина $\varepsilon_{пл.ост}$ будет иметь знак плюс, а интеграл (6.1) может дать растягивающую фиктивную силу.

Под действием усадочной силы пластина испытывает относительную продольную деформацию $\varepsilon_{пр}$ (рис. 6-5, *в*), а на всей длине L — укорочение $\Delta_{пр} = \varepsilon_{пр} L$.

Существуют более точные методы определения сварочных напряжений с учетом их двухосности и изменения свойств металла в зависимости от температуры [1].

Остаточные напряжения в сварных соединениях аустенитных сталей, алюминиевых и титановых сплавов, не испытывающих структурных превращений (рис. 6-6, *а*, кривая *1*), по характеру распределения аналогичны малоуглеродистым сталям. Однако, если в малоуглеродистых и аустенитных сталях максимальные

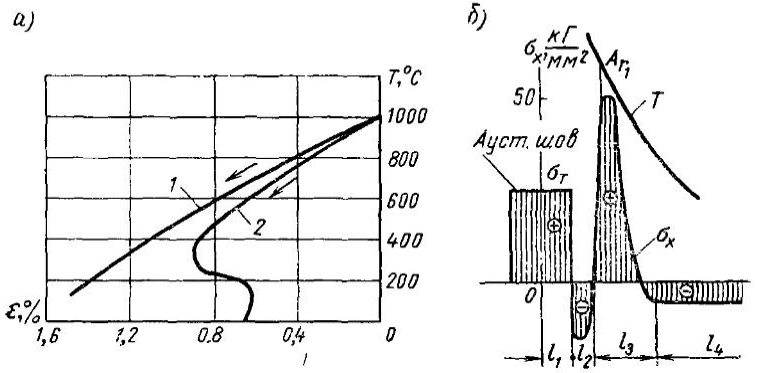


Рис. 6-6. Характерные дилатограммы сталей (*а*): аустенитной — *1* и перлитной — *2* и распределение остаточных напряжений σ_x в среднелегированной стали, сваренной аустенитным швом (*б*)

остаточные напряжения близки к пределу текучести металла, то в алюминиевых и титановых сплавах они, как правило, составляют $(0{,}6—0{,}8)\,\sigma_т$.

В легированных сталях при нагреве выше температуры A_{r_1} а затем при охлаждении происходят структурные превращения, сопровождающиеся изменением объема металла. На рис. 6-6, *а* кривая *2* показывает изменение линейного размера на стадии охлаждения в случае, если металл был нагрет выше температуры структурных превращений A_{r_3}. До температуры, равной примерно 300° С (рис. 6-6, *а*, кривая *2*), происходит укорочение металла, а затем в интервале температур 300—100° С, несмотря на уменьшение температуры, происходит увеличение объема металла, вызванное структурным превращением. Остаточные напряжения в сварном соединении из такой стали имеют сложный характер (рис. 6-6, *б*). Например, при сварке легированной стали аустенитными электродами остаточные напряжения в шве будут примерно равны пределу текучести аустенитного металла (зона l_1). К шву примыкает зона l_2, которая нагревалась выше

температуры A_{r_3}. В ней вследствие расширения металла при сравнительно низких температурах (кривая 2 на рис. 6-6, *а*) возникли остаточные напряжения сжатия. Зона l_3 также нагревалась до высоких температур, но ниже A_{r_1}. В ней при нагреве происходили значительные пластические деформации укорочения, в результате которых после остывания возникли остаточные напряжения растяжения, достигающие предела текучести легированной стали. В этой зоне при нагреве и остывании не было структурных превращений, сопровождающихся изменением объема. Зона l_4 — зона упругих деформаций. Знак напряжений в зоне l_4 зависит от распределения деформаций и напряжений в зонах l_1, l_2 и l_3. Например, если присадочный металл имеет тот же химический состав, что и основной легированный металл, в шве вследствие структурных превращений будут остаточные напряжения сжатия. При этом ввиду возможной уравновешенности эпюры σ_x в пределах зон l_1, l_2, l_3 остаточные напряжения в зоне l_4 могут быть близкими к нулю или даже растягивающими. Это указывает на то, что при сварке легированных сталей, испытывающих структурные превращения, возможно получение фиктивной силы P_{yc}, близкой к нулю, или даже растягивающей.

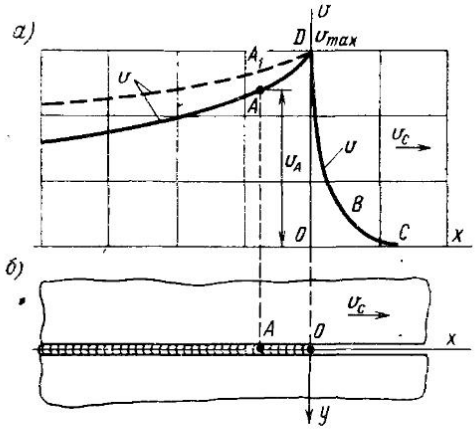


Рис. 6-7. Схема образования поперечной усадки при однопроходной сварке встык

Рассмотрим перемещение кромок при сварке пластин встык с зазором (рис. 6-7). Металл при нагреве расширяется не только в направлении *Ox*, но и в перпендикулярном направлении *Oy*. Характер перемещения края пластины, по кромке которой движется источник тепла, показан кривой v на рис. 6-7, *а*. При подходе источника тепла (точка *O*) кромка интенсивно перемещается (участок *CBD*), достигая максимального перемещения v_{max} в точке *O*. Затем по мере остывания металла край пластины постепенно возвращается в исходное положение. Чем больше теплоотдача в воздух, тем интенсивнее перемещение кромки. Если свариваются две пластины с зазором (рис. 6-7, *б*), то кромка каждой из пластин испытывает поперечное перемещение v. В момент сваривания перемещения достигают максимальной величины v_{max}, а взаимное приближение кромок составляет $2v_{max}$.

На участке OA металл обладает небольшим сопротивлением пластической деформации, в результате чего он испытывает удлинение $2(v_{max}-v_A)$. В точке A пластическое удлинение металла прекращается и таким образом фиксируется взаимное сближение кромок, равное $2v_A$. В процессе остывания пластины подтягиваются друг к другу и возникает поперечная усадка $\Delta_{поп}=2v_A$. В пластинах, которые свариваются без зазора, перемещение кромок впереди источника тепла не может осуществляться беспрепятственно. До некоторой точки B (рис. 6-7, *а*) происходит упругая деформация; а от точки B до точки D — пластическая. Поперечная усадка оказывается меньше, чем при сварке с зазором.

При упругом протекании процесса без пластических деформаций теоретическое решение дает максимально возможное перемещение кромок

$$2v_{max}=2\frac{\alpha}{\rho c}\frac{q}{sv_c}, \tag{6.3}$$

где s — толщина пластины, *см*;

v_c — скорость сварки, *см/сек*;

q — эффективная мощность источника нагрева, *дж/сек*.

Фактически величина поперечного укорочения, как было объяснено выше, меньше теоретически возможного. При электродуговой однопроходной сварке металла встык толщиной до 12—16 *мм* поперечное укорочение равно

$$\Delta_{поп}\approx(0{,}5\div 0{,}7)\,2v_{max}, \tag{6.4}$$

а иногда и меньше.

Формулой (6.4) можно пользоваться также для приближенного определения поперечного укорочения, когда шов укладывается на целую пластину без полного провара, например при сварке внахлестку или втавр.

§ 4. ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Распределение остаточных напряжений в основных типах сварных соединений исследовано экспериментально и теоретически довольно широко. Продольные остаточные напряжения σ_x в сварных соединениях, выполненных внахлестку, угловых и втавр, как по величине, так и по распределению в основном аналогичны напряжениям в стыковых соединениях, т. е. максимальные их значения в конструкциях из низкоуглеродистых и аустенитных сталей близки к $\sigma_т$. Помимо продольных, в сварных однопроходных соединениях возникают также и поперечные остаточные напряжения σ_y.

Короткие и узкие пластины, сваренные с большой скоростью, вследствие продольного укорочения при остывании стремятся согнуться, как показано на рис. 6-8, *а*. Из-за наличия связи возникают поперечные напряжения σ_y, эпюра которых показана на

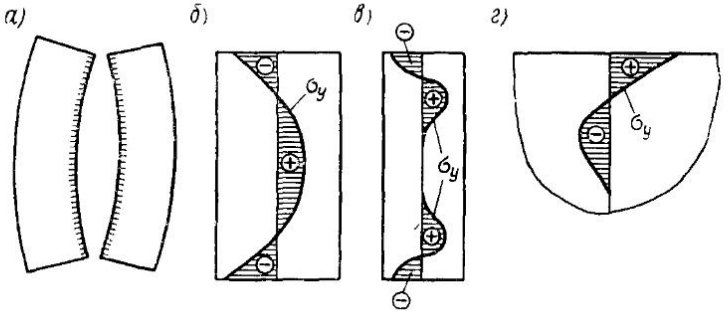


Рис. 6-8. Распределение поперечных напряжений σ_y в стыковых однопроходных сварных соединениях

рис. 6-8, *б*. В длинных пластинах, сваренных с большой скоростью, по аналогичным причинам возникают напряжения σ_y (эпюра на рис. 6-8, *в*).

Если сваривают с малой скоростью пластины, имеющие зазор, то уже в процессе сварки металл остывает достаточно полно, и последний участок шва, остывая и сокращаясь, встречает препятствие со стороны остальной части пластины. На конце соединения возникают растягивающие остаточные напряжения σ_y (эпюра на рис. 6-8, *г*).

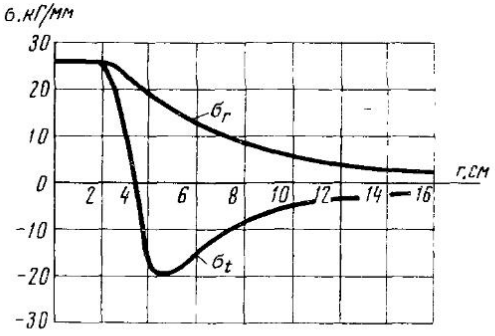


Рис. 6-9. Остаточные напряжения σ_r и σ_t после осесимметричного нагрева

При осесимметричном разогреве (электрозаклепки, контактная точечная сварка) остаточные напряжения σ_r и σ_t также осесимметричны (рис. 6-9). В центральной части они растягивающие и приблизительно равны друг другу по величине, на некотором расстоянии от центра σ_r — растягивающие, а σ_t — сжимающие.

Распределение и величина остаточных напряжений в сварных стыковых соединениях большой толщины существенно зависят

от способа и последовательности сварки. В многослойных сварных соединениях из низкоуглеродистых сталей напряжения σ_x в шве близки к $\sigma_т$, но несколько меньше в средней части по толщине. Распределение напряжений σ_y в V-образных соединениях зависит от характера закрепления свариваемых пластин. Кривая *1* на рис. 6-10, *а* относится к случаю сварки без закреплений, кривая *2*,— когда угловой поворот пластин, вызываемый поперечной усадкой валиков, совершенно устранен. Распределение

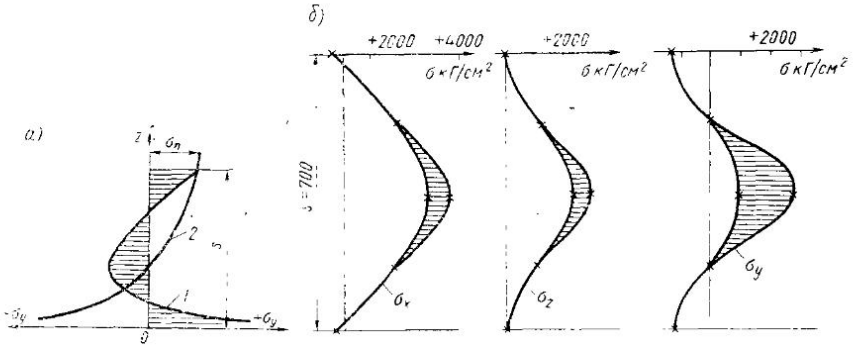


Рис. 6-10. Остаточные напряжения при сварке швов большой толщины:
а) напряжения σ_y при многослойной сварке; *б*) напряжения σ_x, σ_z и σ_y в шве плиты толщиной 700 *мм*, сваренной электрошлаковым способом

напряжений при частичном повороте свариваемых пластин занимает промежуточное положение между кривыми *1* и *2*. Наибольшие напряжения σ_y, близкие к $\sigma_в$, могут образоваться в корне многослойного шва вследствие неравномерной поперечной усадки. В средней по толщине части шва напряжения σ_y либо близкие к нулю, либо сжимающие.

В электрошлаковых сварных соединениях (рис. 6-10, *б*) толщиной более 150—200 *мм* в глубине металла шва все три компонента напряжений являются растягивающими. На поверхности шва компонент σ_x невелик; он может быть и растягивающим и сжимающим, а компонент σ_y — только сжимающим. Такое распределение вызывается двумя причинами: а) относительно малой шириной зоны пластических деформаций, по сравнению с толщиной металла, в этом случае появляется заметное сопротивление сокращению металла в направлении оси *Oz*; б) неравномерностью температуры по толщине металла в период остывания соединения; более высокие температуры по оси соединения создают дополнительную неравномерность в распределении напряжений σ_x и σ_y.

При пайке соединений, если нагрев деталей производится равномерно, остаточные напряжения возникают при остывании

вследствие различных коэффициентов линейного расширения α припоя и материала детали. Например, медно-цинковые припои имеют $\alpha \approx (21 \div 22) \cdot 10^{-6} \frac{1}{град}$, в то время как низкоуглеродистые стали имеют $\alpha \approx (12 \div 14) \cdot 10^{-6} \frac{1}{град}$. После остывания в данном случае в припое по плоскости спая возникнут двухосные растягивающие остаточные напряжения, близкие к $\sigma_т$ припоя.

§ 5. ДЕФОРМАЦИИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ И КОНСТРУКЦИЯХ

При сварке встык пластин с зазором, как это имеет место при электрошлаковой сварке, могут возникать значительные временные перемещения деталей под влиянием температурных и структурных деформаций металла.

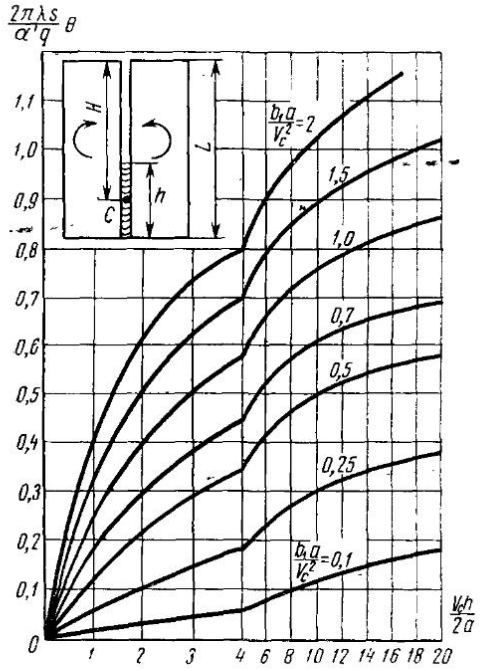


Рис. 6-11. Номограмма для определения углового поворота Θ при сварке пластин встык

Перемещения от температурных деформаций возникают главным образом вследствие неравномерного отхода кромок сваренных пластин в исходное положение (см. рис. 6-7). На участках шва, ближе расположенных к зоне сварки, перемещение v точек, которые до сварки являлись точками кромок, происходит в большей степени, чем на удаленных участках. Так как кромки между собой сварены, то их неравномерное перемещение вызывает взаимный поворот пластин Θ, приводящий к закрыванию зазора, как это показано на рис. 6-11 стрелками. Величину углового поворота Θ в радианах, возникающего с самого начала сварки, определяют с помощью кривых на номограмме рис. 6-11. Каждая кривая соответствует различной безразмерной теплоотдаче

$$\frac{b_1 a}{v_c^2} = 22\left[\frac{27{,}2 \cdot 10^{-7} a\varepsilon}{\rho c s v_c^2}\left(0{,}118\,\frac{q}{\lambda s}\right)^{1.61}\right]^{2{,}66}, \qquad (6.5)$$

где ε — степень черноты поверхности плит (для проката черных металлов $\varepsilon = 0{,}9$);

v_c — скорость сварки, *см/сек*;

q — эффективная мощность источника тепла, *дж/сек*.

На номограмме рис. 6-11 α' — коэффициент линейного расширения, при определении которого исключены структурные превращения; для перлитных сталей $\alpha' = (16{,}5 \div 17) \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{град}$. Остальные значения принимаются в соответствии с табл. 6.2.

Если перемещения до высоты h_1 отсутствовали, например, они были устранены закреплениями или сопротивлением от веса деталей, то из величины углового перемещения Θ_2 при длине шва h_2 необходимо вычесть величину Θ_1 при длине шва h_1. Зная величину углового перемещения и длину деталей L, можно вычислить закрывание зазора в верхней части стыка.

Одновременно в процессе сварки происходит поступательное сближение деталей. Однако оно обычно невелико.

Пример. Определить закрывание зазора в конце стыка от углового поворота деталей из низкоуглеродистой стали при электрошлаковой сварке, когда длина заваренного шва $h = 150$ *см*. Закрывание зазора до $h_1 = 50$ *см* устранялось путем закрепления деталей.

$$L = 350\ см;\ \frac{q}{s} = 2000\ дж/см \cdot сек;\ v_c = 0{,}55\ м/ч =$$

$$= 0{,}0153\ см/сек;\ \frac{b_1 a}{v_c^2} = 0{,}25.\ \text{По табл. 6.2 находим}\ \lambda =$$

$$= 0{,}4\,\frac{дж}{см \cdot сек \cdot град};\ a = 0{,}085\ см^2/сек.$$

Вычисляем

$$\frac{v_c h}{2a} = \frac{0{,}0153 \cdot 150}{2 \cdot 0{,}085} = 13{,}5 \text{ и } \frac{v_c h_1}{2a} = 4{,}5,$$

а также

$$\frac{2\pi\lambda s}{\alpha' q} = \frac{2\pi \cdot 0{,}4}{17 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 74{,}0.$$

По номограмме на рис. 6-11 при $\frac{v_c h}{2a}$, равном 13,5 и 4,5,

для $\frac{b_1 a}{v_c^2} = 0{,}25$ находим $\frac{2\pi\lambda s}{\alpha' q}\,\Theta = 0{,}345;$

$$\frac{2\pi\lambda s}{\alpha' q}\,\Theta_1 = 0{,}195;$$

соответственно

$$\Delta\Theta = \Theta - \Theta_1 = 0{,}00465 - 0{,}00264 = 0{,}002 \ рад.$$

Плечо поворота на конце деталей H при сварке на участке от h_1 до h составляло примерно

$$H = L - \left(\frac{h + h_1}{2}\right) = 350 - 100 = 250 \ см.$$

Величина закрывания зазора на конце стыка

$$\Delta = \Delta\Theta \cdot H = 0{,}002 \cdot 250 = 0{,}5 \ см = 5 \ мм.$$

Перемещения Θ_c от структурных деформаций металла зависят от марки стали, термического цикла и положения зоны структурных превращений относительно центра тяжести сечения заваренного шва C (см. рис. 6-11). Вначале, когда зона структурных превращений находится ниже точки C, происходит закрывание зазора на незаваренном участке шва. Когда зона превращений оказывается выше точки C, происходит открывание зазора. Особенно значительно закрывание зазора у легированных сталей 34ХМ, 15ГН2М, 15ГН4М, которое происходит до $h \approx 1500$—2000 *мм*. Номограмму для вычисления Θ_c можно найти в [5].

Уменьшение зазора при электрошлаковой сварке происходит не только вследствие перемещений свариваемых деталей. Как указывалось выше, в момент сваривания возникает также местное сближение кромок от нагрева (см. рис. 6-7), которое по экспериментальным данным при электрошлаковой сварке равно

$$\Delta_{\text{поп. эшс}} = 0{,}8 \cdot 2v_{\max} \approx 1{,}6 \ \frac{\alpha}{\rho c} \ \frac{q}{v_c s}. \qquad (6.6)$$

Величина $\Delta_{\text{поп. эшс}}$ может составлять при электрошлаковой сварке около 4—10 *мм* в зависимости от режима сварки.

Пример. Используя данные предыдущего примера, определить поперечное укорочение в момент сваривания кромок. По табл. 6.2 находим $\alpha = 14 \cdot 10^{-6} \ \frac{1}{град}$, $\rho c = 5 \ \frac{дж}{см^3 \cdot град}$. Используя формулу (6.6), получим

$$\Delta_{\text{поп}} = 1{,}6 \cdot \frac{\alpha}{\rho c} \cdot \frac{q}{v_c s} = 1{,}6 \cdot \frac{14 \cdot 10^{-6}}{5} \cdot \frac{2000}{0{,}0153} =$$

$$= 0{,}585 \ см = 5{,}85 \ мм.$$

Угловые остаточные перемещения в плоскости, перпендикулярной оси шва, возникают вследствие неравномерного поперечного сокращения по толщине металла s (рис. 6-12, *а*). Точка A в момент сваривания переме-

щается в положение A_1, в то время как точка D — в положение D_1. После сварки и остывания точки A и D стремятся возвратиться в исходное положение. Если $AA_1 > DD_1$, то возникает угловое перемещение β (рис. 6-12, *б, в*). Величина β зависит от отношения глубины провара H к толщине s, от формы провара и его ширины B. Схематично характер зависимости β от $\frac{H}{s}$ показан на рис. 6-13.

При сварке соединений втавр (рис. 6-12, *г*), кроме угловой деформации β, возникает поворот полки относительно стенки ω.

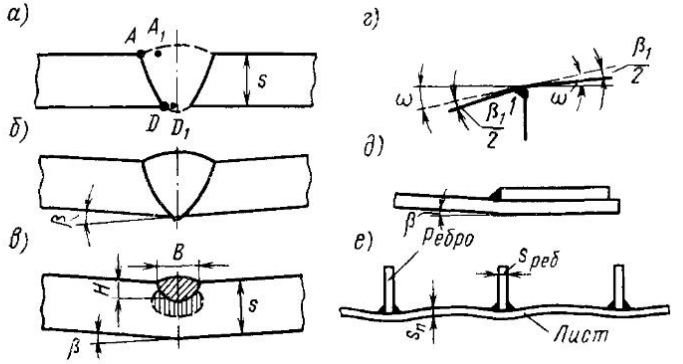


Рис. 6-12. Деформации листов в плоскости, перпендикулярной шву

Ориентировочно величину углового перемещения β при сварке сталей встык и укладке валикового шва при сварке втавр или внахлестку можно определить по номограммам, приведенным в [7].

При сварке соединений угловыми швами (рис. 6-12, *д, е*) угол излома листа (пояса) β также определяется по номограммам [7].

В качестве расчетной толщины $s_р$ принимается толщина листа пояса $s_п$. Расчетная эффективная мощность принимается равной мощности, вводимой в лист пояса $q_п$. Ее приближенно вычисляют по формуле

$$q_п = q \frac{2s_п}{2s_п + s_{реб}}. \qquad (6.7)$$

Определение угла β при сварке алюминиевых сплавов втавр можно производить по номограмме на рис. 6-14.

Изгиб и укорочение в балочных конструкциях возникают от продольных (поясных) и от поперечных швов, приваривающих различные ребра жесткости и диафрагмы.

Помимо изгиба и укорочения, в балках возникают закручивание и потеря устойчивости листовых элементов стенок.

Изгиб и укорочение балок от продольных швов можно определить с помощью метода фиктивных сил. Действие внутренних сил заменяется некоторой фиктивной силой $P_{ус}$, прикладываемой по концам сварного соединения приблизительно в центре тяжести площади пластических деформаций, возникших при выполнении сварного соединения (рис. 6-15, *а*). Величина $P_{ус}$ определяется

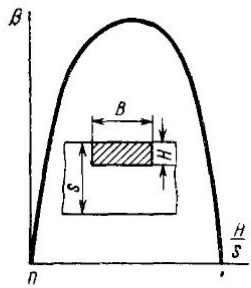


Рис. 6-13. Характер зависимости угловой деформации β от относительной глубины провара

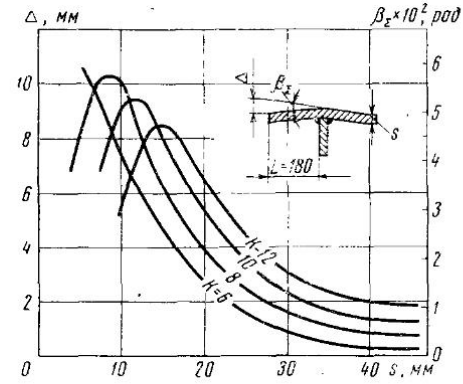


Рис. 6-14. Номограмма для определения угловой деформации при сварке алюминиевых сплавов втавр в зависимости от катета шва и толщины полки

по формуле (6.2). При сварке втавр двумя угловыми швами, когда зоны пластических деформаций соединений перекрываются (рис. 6-15, *г*), в качестве расчетной принимается погонная энергия сварки одного шва, увеличенная на 15%, т. е. $1{,}15\frac{q}{v_c}$. Для прерывистых швов величину фиктивной силы определяют по формуле

$$P_{ус.\,пр} = P_{ус}\ \frac{t_ш}{t}, \qquad (6.8)$$

где $t_ш$ — длина участка шва;
t — шаг прерывистого шва.

Погонную энергию $\frac{q}{v_c}$ при сварке углового шва, если режим сварки еще не известен, можно приближенно определять в зависимости от катета шва

$$\frac{q}{v_c} = Dk^2, \qquad (6.9)$$

где D — численный коэффициент, равный 30 000 *дж/см*^{3} при автоматической сварке и 40 000 *дж/см*^{3} при ручной сварке;

$к$ — катет углового шва, *см*;

$\frac{q}{v_c}$ — погонная энергия сварки, *дж/см*.

Если балка сваривается последовательно, т. е. вначале сваривается тавр (рис. 6-15, *б*), а затем двутавр, то деформации находят от каждого сварного соединения в отдельности. После

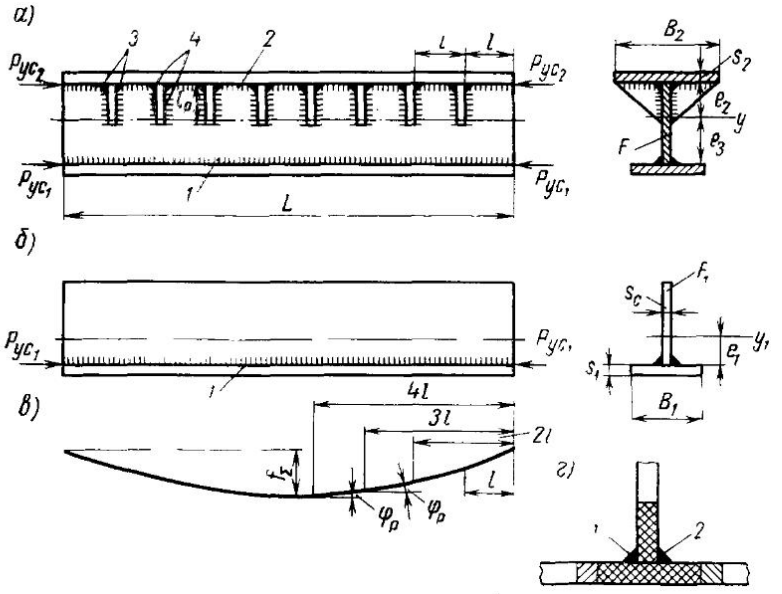


Рис. 6-15. Деформации балок от продольных и поперечных швов

сварки шва *1* (рис. 6-15, *б*) в тавре возникнет прогиб f, величина которого находится по формуле

$$f = \frac{ML^2}{8EJ}; \tag{6.10}$$

угловой поворот концов равен

$$\varphi = \frac{ML}{EJ}, \tag{6.11}$$

продольное укорочение

$$\Delta_{пр} = \frac{P_{yc_1} L}{EF_1}, \tag{6.12}$$

где $M = P_{yc_1} \cdot e_1$ — момент от силы P_{yc_1};

L — длина балки;

J — момент инерции сечения тавра относительно оси y_1;

F_1 — площадь поперечного сечения тавра.

После сборки тавра с поясом *2* и сварки шва *2* возникнет изгиб в противоположном направлении, величина которого определяется по формуле (6.10) с подстановкой в нее момента инерции J всего сечения балки относительно оси y, проходящей через центр тяжести, и эксцентриситета e_2. Дополнительное укорочение балки определится по формуле (6.12). При этом величина F_1 будет равна площади всего поперечного сечения балки. Если балка сначала собирается на прихватках, а затем свариваются швы *1* и *2*, то изгиб от швов находится при эксцентриситетах e_3 и e_2 (рис. 6-15, *а*) и моменте инерции всего сечения. Расстояния e_2 и e_3 взяты от центра тяжести площади поперечного сечения балки до центра тяжести площади пластических деформаций.

Пример. Определить изгиб тавра из низкоуглеродистой стали (рис. 6-15, *б*) после сварки поясного шва при следующих значениях размеров: $L = 10$ *м*; $B_1 = 200$ *мм*; высота стенки $h_c = 500$ *мм*; $s_1 = s_c = 12$ *мм*; $к = 8$ *мм*; сварка автоматическая.

Определяем погонную энергию сварки по формуле (6.9)

$$\frac{q}{v_c} = Dк^2 = 30000 \cdot 0{,}8^2 = 19200 \ дж/см.$$

Учитывая, что зоны пластических деформаций двух поясных швов перекрывают друг друга, расчетную погонную энергию увеличиваем не вдвое, а на 15%, т. е.

$$\left(\frac{q}{v_c}\right)_{расч} = 1{,}15 \cdot \frac{q}{v_c} = 22100 \ дж/см.$$

Определим фиктивную силу по формуле (6.2) с учетом поправочного коэффициента 0,7

$$P_{yc} = 0{,}7 \cdot 1{,}7 \left(\frac{q}{v_c}\right)_{расч} = 0{,}7 \cdot 1{,}7 \cdot 22100 = 26300 \ кГ.$$

Определения центра тяжести поперечного сечения тавра и его момента инерции дают $e_1 = 17{,}7$ *см*; $J_{y_1} = 24\,250$ *см*^{4}.

Прогиб находим по формуле (6.10)

$$f = \frac{ML^2}{8EJ} = \frac{P_{yc} e_1 L^2}{8EJ_{y_1}} = \frac{26300 \cdot 17{,}7 \cdot 1000^2}{8 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 24250} = 1{,}2 \ см = 12 \ мм.$$

Поперечные швы, приваривающие ребра, если они смещены относительно центра тяжести сечения балки, вызывают значительные изгиб и укорочение. Общая схема расчета состоит в оп-

ределении углов поворота балки от отдельных поперечных швов с последующим вычислением суммарного прогиба. Угол поворота, вызываемый сваркой отдельного поперечного шва, определяется по формуле

$$\varphi = (\Delta_{пов} - \Delta_{пл}) \frac{S}{J}, \qquad (6.13)$$

где $\Delta_{пов}$ — поперечная усадка соединения, выполняемого в незакрепленном состоянии; определяется по формуле (6.4);

$\Delta_{пл}$ — пластическая деформация, вызываемая сопротивлением поперечного сечения балки;

S — статический момент части сечения, где располагается сварное соединение;

J — момент инерции всего сечения.

Оценить приближенно величину угла поворота можно, полагая $\Delta_{пл} \approx (0{,}4 \div 0{,}5)\Delta_{пов}$, как это следует из экспериментальных данных, полученных на некоторых типах балок. Полученное значение следует рассматривать как ориентировочное. Допустим, что два шва *3* (рис. 6-15, *а*), приваривающие ребра к поясу, вызывают поперечную усадку пояса $\Delta_{пов_п}$. Статический момент верхнего пояса относительно центра тяжести всего сечения равен

$$S_п = B_2 s_2 \left(e_2 + \frac{s_2}{2}\right).$$

Четыре шва *4*, приваривающие два ребра к стенке, дадут поперечную усадку $\Delta_{пов\ ст}$. Статический момент части сечения стенки, где располагаются швы ребер, равен

$$S_{ср} = l_р s_с \left(e_2 - \frac{l_р}{2}\right).$$

Суммарный угол поворота от приварки двух ребер $\varphi_р$ (рис. 6-15, *в*), расположенных напротив друг друга, составляет

$$\varphi_р = \frac{1}{J}\Big[(\Delta_{пов_п} - \Delta_{пл_п}) B_2 s_2 \left(e_2 + \frac{s_2}{2}\right) + \\ + (\Delta_{пов_{ст}} - \Delta_{пл_{ст}}) l_р s_с \left(e_2 - \frac{l_р}{2}\right)\Big].$$

Прогиб балки от всех поперечных швов, приваривающих ребра, равен (рис. 6-15, *в*)

$$f_с = \varphi_р 4l + \varphi_р 3l + \varphi_р 2l + \varphi_р l.$$

Продольное укорочение балки от поперечного шва равно

$$\Delta_{пр} = (\Delta_{пов} - \Delta_{пл}) \frac{F_э}{F}, \qquad (6.14)$$

где $F_э$ — поперечное сечение части элемента, где располагается сварное соединение;

F — площадь поперечного сечения балки.

Пример. Определить изгиб двутавровой балки из низкоуглеродистой стали на рис. 6-15 от приварки ребер при следующих размерах: $L=10$ *м*; $l=111$ *см*; $B_1=B_2=200$ *мм*: высота стенки — 500 *мм*; $s_1=s_2=s_c=12$ *мм*; $l_р=250$ *мм*; катеты швов, приваривающих ребра, равны 7 *мм* и свариваются вручную; момент инерции балки $J_y=43\,900$ *см*^{4}. По табл. 6.2

$$\alpha = 14 \cdot 10^{-6} \frac{1}{град}; \rho c = 5 \frac{дж}{см^3 \cdot град}.$$

Определим погонную энергию сварки при выполнении швов, катеты которых $к=7$ *мм*, по формуле (6.9)

$$q/v_c = Dк^2 = 40000 \cdot 0{,}7^2 = 19600 \ дж/см.$$

Определим долю тепла, вводимого в пояс и стенку, толщины которых равны, по формуле (6.7) с учетом частичного его поглощения ребром

$$(q/v_c)_{расч} = \frac{q}{v_c} \frac{2s}{2s+s} = 19600 \cdot \frac{2}{3} = 13100 \ дж/см.$$

Определим поперечную усадку от одного шва по формуле (6.4), взяв коэффициент 0,6

$$\Delta_{поп} = 1{,}2 \cdot \frac{\alpha}{\rho c} \left(\frac{q}{v_c}\right)_{расч} \cdot \frac{1}{s} = 1{,}2 \cdot \frac{14 \cdot 10^{-6}}{5} \cdot \frac{13100}{1{,}2} = 0{,}0364 \ см.$$

Величину $\Delta_{пл}$ примем равной $0{,}4\Delta_{поп}$.

Определим угол изгиба $\varphi_п$ от приварки ребер к поясу по формуле (6.13). Так как швов два, величину φ удваиваем

$$\varphi_п = 2(\Delta_{поп} - \Delta_{пл}) \frac{S}{J} = 2(0{,}0364 - 0{,}4 \cdot 0{,}0364) \frac{20 \cdot 1{,}2 \cdot 25{,}6}{43900} = 0{,}00061 \ рад.$$

Определим угол изгиба $\varphi_с$ от приварки ребер к стенке. Так как швов четыре, то величина φ в формуле (6.13) увеличивается в 4 раза

$$\varphi_с = 4(\Delta_{поп} - \Delta_{пл}) \frac{S}{J} = 4(0{,}0364 - 0{,}4 \cdot 0{,}0364) \frac{25 \cdot 1{,}2 \cdot 12{,}5}{43900} = 0{,}000745 \ рад.$$

Суммарный угол изгиба балки от одной пары ребер равен

$$\varphi_Σ = \varphi_п + \varphi_с = 0{,}00061 + 0{,}000745 = 0{,}001355 \ рад.$$

Прогиб балки от всех ребер равен

$$f_{\Sigma} = \varphi_{\Sigma}(4l + 3l + 2l + l) = 0{,}001355 \cdot 111 \cdot 10 =$$

$$= 1{,}5 \text{ см} = 15 \text{ мм}.$$

Закручивание балок изучено слабо. Оно может возникать от перемещений стенок относительно поясов в процессе сварки, от бимоментов, образованных внутренними силами, вследствие потери устойчивости крутильной формы и др. Потеря устойчивости стенок возникает под действием сжимающих остаточных напряжений.

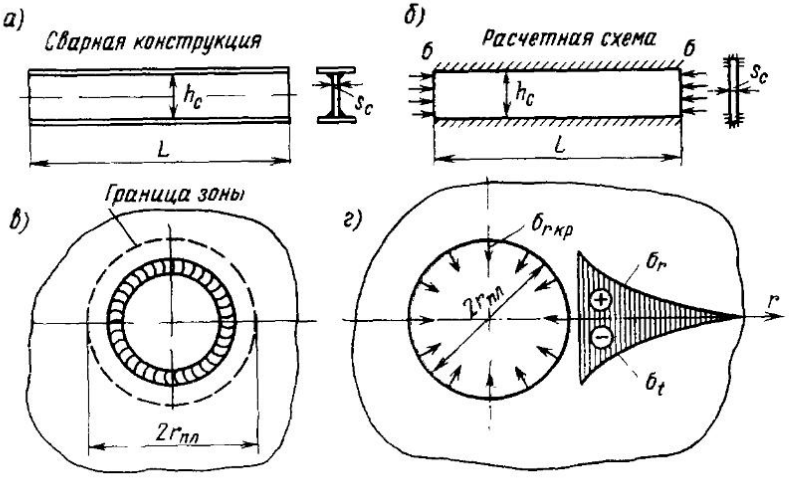


Рис. 6-16. Определение потери устойчивости в стенке двутавровой балки (*а*, *б*) и в листе с круговым швом (*в*, *г*)

Потеря устойчивости в листовых элементах конструкций возникает чаще всего при толщине металла до 4 ÷ 8 *мм*. Причиной коробления являются сжимающие напряжения. При достижении напряжениями сжатия критических значений возникает потеря устойчивости.

Решение задачи об определении возможности потери устойчивости состоит из двух стадий:

а) определения схемы действия сил и условий закрепления элементов по контуру;

б) собственно решения задачи о потере устойчивости.

На рис. 6-16, *а*, *б* приведен пример определения критических напряжений в стенке двутавровой балки. Напряжения, действу-

ющие в стенке от усадки двух поясных швов, определяются в предположении, что потеря устойчивости отсутствует

$$\sigma_{ст} = \frac{2P_{ус}}{F_б}. \qquad (6.15)$$

Полученные напряжения сравниваются с критическими при аналогичной схеме нагружения листа (рис. 6-16, *б*). Если $\sigma_{ст} > \sigma_{кр}$, то наступит потеря устойчивости.

На рис. 6-16, *в, г* показан лист с вваренным круговым элементом. На границе зоны пластических деформаций и остальной части листа в соединениях небольшого диаметра обычно возникают радиальные растягивающие напряжения $\sigma_r \approx \frac{\sigma_т}{2}$, которые убывают с возрастанием r. Тангенциальные напряжения σ_t за пределами зоны пластических деформаций являются сжимающими, что и вызывает потерю устойчивости. Величина радиальных критических напряжений для большого листа может быть определена по формуле

$$\sigma_{r_{кр}} = \frac{s^2 E}{4\,(1-\mu^2)\,r_{пл}^2}.$$

При $\frac{\sigma_т}{2} > \sigma_{r_{кр}}$ лист теряет устойчивость. Форма перемещений, если дать развертку сечения листа по окружности, представляет синусоидальную кривую, чаще с четырьмя полуволнами. При малых наружных диаметрах листа наблюдаются формы с шестью, восьмью и более полуволнами.

Определение величины перемещений в элементах после потери устойчивости представляет собой сложную задачу. В общем случае решение такой задачи состоит в отыскании формы и величины перемещений, которые обеспечивают системе минимум потенциальной энергии.

Тонкие листы, сваренные встык, в результате потери устойчивости искривляются по дуге окружности, приобретая в поперечном сечении седлообразную форму (рис. 6-17, *а*). Такая форма обеспечивает расположение зоны пластических деформаций по дуге наименьшего радиуса, что в свою очередь позволяет этой зоне сократиться по длине и освободиться в значительной степени от растягивающих остаточных напряжений и потенциальной энергии. Уменьшение потенциальной энергии в зоне пластических деформаций превосходит работу, затрачиваемую на изгиб пластины, и в целом потенциальная энергия во всей пластине после потери устойчивости снижается (рис. 6-17, *б*). При увеличении кривизны выше оптимальной (точка A), где потенциальная энергия минимальна, наблюдается рост потенциальной энергии. Зависимость кривизны пластин после сварки от оста-

точных растягивающих напряжений σ, ширины пластин $2B$, зоны пластических деформаций $2b_п$ и толщины металла s показана на рис. 6-18.

Формы потери устойчивости сварных конструкций весьма многообразны. Несмотря на значительные перемещения, деформации в основном металле, как правило, протекают упруго. Это свойство деформаций коробления позволяет успешно бороться с ними путем применения прокатки или проковки только зоны пластических деформаций (см. главу 7).

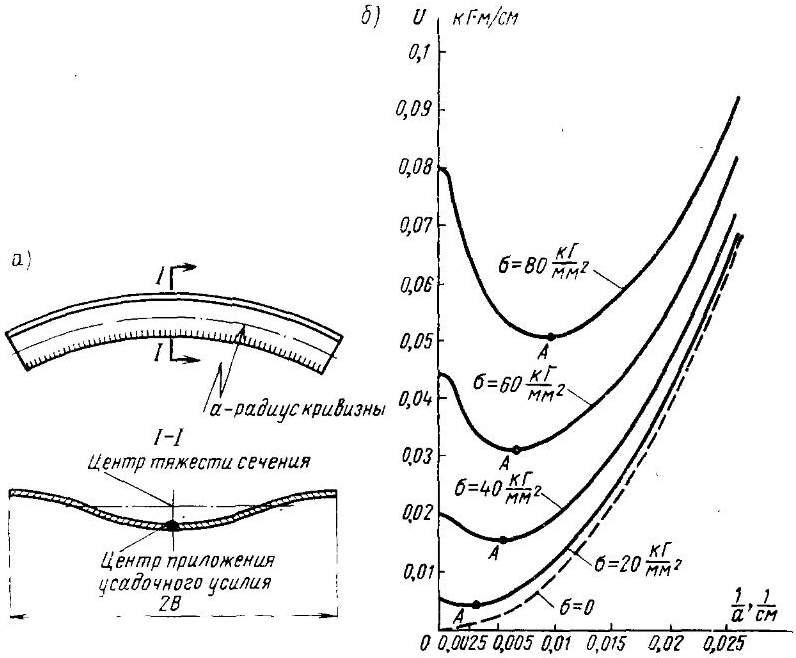


Рис. 6-17. Потеря устойчивости тонких пластин, сваренных встык:

а) характер деформации; *б)* зависимость потенциальной энергии в пластине от кривизны $1/a$ при $2B=30$ *см*; $2b_п=4$ *см*; $s=0.15$ *см*; $E=2{,}1\cdot10^4$ *кГ/мм²*; $\mu=0{,}3$

Пример. Определить, произойдет ли потеря устойчивости стенки у сварной двутавровой балки из Ст. 3, имеющей размеры: высоту стенки $h_{ст}=60$ *см*, толщину $s_{ст}=4$ *мм*, ширину поясов 15 *см*, толщину 6 *мм*, после сварки поясных швов с катетом $к=4$ *мм*. Поперечные ребра отсутствуют; $E=2\cdot10^6$ *кГ/см²*.

Находим по формуле (6.9) погонную энергию сварки

$$\frac{q}{v_с}=Dк^2=40000\cdot0{,}4^2=6400\ дж/см.$$

Расчетная погонная энергия сварки для двух угловых швов в тавровом сечении

$$1{,}15\ \frac{q}{v_c} = 1{,}15 \cdot 6400 = 7350\ дж/см.$$

Фиктивную силу от одной пары швов, прикрепляющих пояс к стенке, вычислим по формуле (6.2), вводя поправочный коэффициент 0,7,

$$P_{yc} = 0{,}7 \cdot 1{,}7 \cdot 7350 = 8750\ кГ.$$

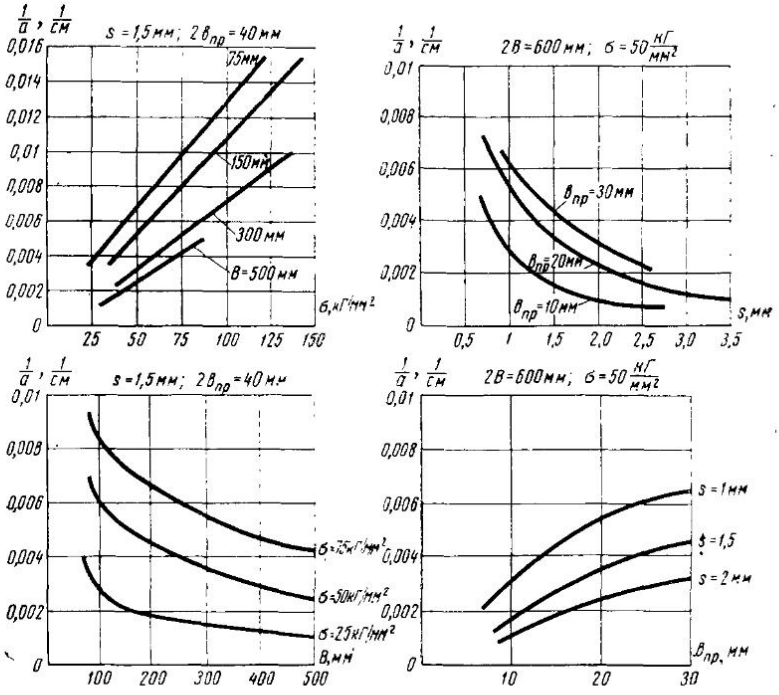


Рис. 6-18. Зависимость кривизны пластины от расчетных остаточных напряжений σ_0, ширины половины пластины B, толщины пластины s и ширины зоны пластических деформаций $2b_п$

Два соединения втавр дадут усадочную силу, в 2 раза большую $2P_{yc} = 17\,500\ кГ$. Напряжения сжатия в стенке вычислим по формуле (6.15)

$$\sigma_{ст} = \frac{2P_{yc}}{F_б} = \frac{17500}{2 \cdot 15 \cdot 0{,}6 + 60 \cdot 0{,}4} = 417\ кГ/см^2.$$

Для длинной пластины, жестко защемленной по длинным сторонам, критическое напряжение вычисляется по следующей формуле:

$$\sigma_{кр} = 7\ \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{s_{ст}}{h_{ст}}\right)^2 = 7\ \frac{\pi^2 \cdot 10^6}{12(1-0{,}3^2)}\left(\frac{0{,}4}{60}\right)^2 = 560\ кГ/см^2.$$

Потери устойчивости не произойдет. Однако остаточные напряжения в стенке близки к критическим.

§ 6. ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ЭЛЕМЕНТАХ ОБОЛОЧЕК

Наиболее распространенными сварными соединениями в элементах оболочек являются продольные, кольцевые и круговые швы. Особенностью тонкостенных оболочек по сравнению с дру-

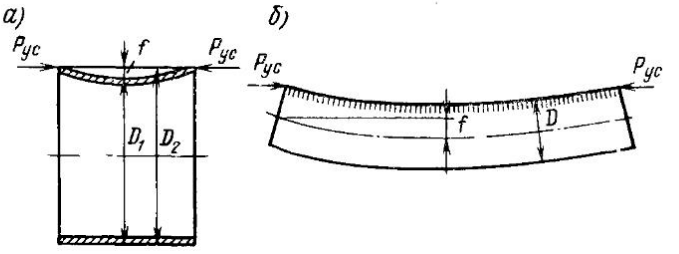


Рис. 6-19. Деформации от продольных швов в цилиндрических оболочках:
а) коротких; *б*) длинных

гими сварными конструкциями является пониженная жесткость отдельных листовых элементов.

Образование и распределение напряжений в продольных однопроходных соединениях цилиндрических обечаек, когда они свариваются с закреплением в приспособлениях, принципиально не отличаются от случая сварки двух листов встык. Вследствие гибкости оболочки поперечная усадка происходит беспрепятственно. Остаточные напряжения практически одноосные. После освобождения короткие обечайки получают местный прогиб f (рис. 6-19, *а*), который иногда составляет более 10—20 *мм*. При этом в среднем сечении $D_1 < D_{ном}$, а у краев $D_2 > D_{ном}$. У длинных обечаек (труб) возникает искривление оси (рис. 6-19, *б*), а на концах появляется овальность.

В кольцевых швах оболочек, если они свариваются на жестком кольце, после остывания образуются одноосные остаточные напряжения σ_t, мало изменяющиеся по окружности.

Уравновешивание напряжений σ_t на этой стадии происходит благодаря реакциям q (рис. 6-20, *а*) со стороны кольца

$$q = \frac{\sigma_t s}{r_0}.$$

После удаления кольца силы q снимаются и вызывают прогиб оболочки (рис. 6-20, *б*). На рис. 6-20, *в* показана экспериментальная кривая перемещений цилиндрической оболочки $2r_0 = 145$ *см*, $s = 1{,}5$ *мм* из нержавеющей стали после аргонодуговой однопроходной сварки. Сокращение периметра в зоне шва составляет около 9 *мм*.

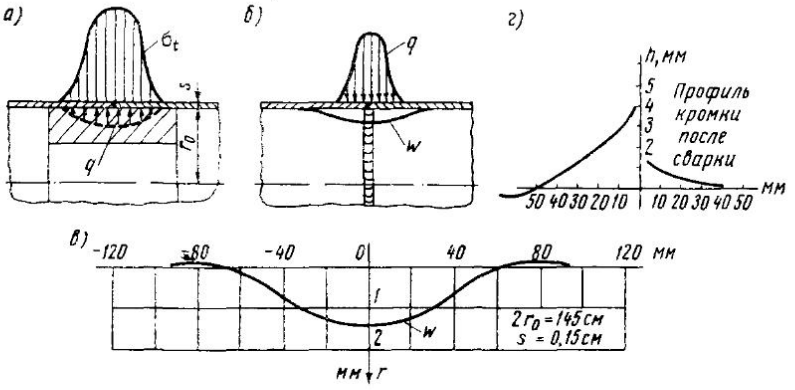


Рис. 6-20. Образование перемещений в зоне кольцевого шва цилиндрической оболочки:

а), *б*), *в*) симметричная деформация; *г*) смещение кромок относительно друг друга

Прогибы оболочек вызывают напряжения изгиба поперек шва: внутри — растягивающие, снаружи — сжимающие. Происходит также уменьшение растягивающих напряжений в шве. Сокращение оболочек от кольцевых швов возникает также после приварки кольцевых элементов жесткости дуговой или контактной сваркой.

Однако не во всех случаях после сварки происходит укорочение шва. Например, в оболочках из алюминиевых сплавов тепло распространяется на значительное расстояние, вызывая подогрев участков, где упругие свойства металла еще не утрачены. Эти участки, расширяясь, вызывают перемещение зоны шва в радиальном направлении. Удлинение и изгиб бывают настолько значительными, что после остывания металла периметр шва оказывается увеличенным по сравнению с исходным состоянием.

При сварке кольцевым швом различных по жесткости элементов радиальные перемещения в момент сваривания оказываются различными. В результате этого образуется ступенька (рис. 6-20, *г*), которая может явиться серьезным дефектом, снижающим прочность сосуда. Характер деформаций от кольцевых швов на сферических и тороидальных оболочках аналогичен деформациям на цилиндрах.

В круговом сварном соединении на плоском листе распределение напряжений и деформаций в первом приближении может рассматриваться как осесимметричное. В таком соединении следует различать три основных зоны: внутрен-

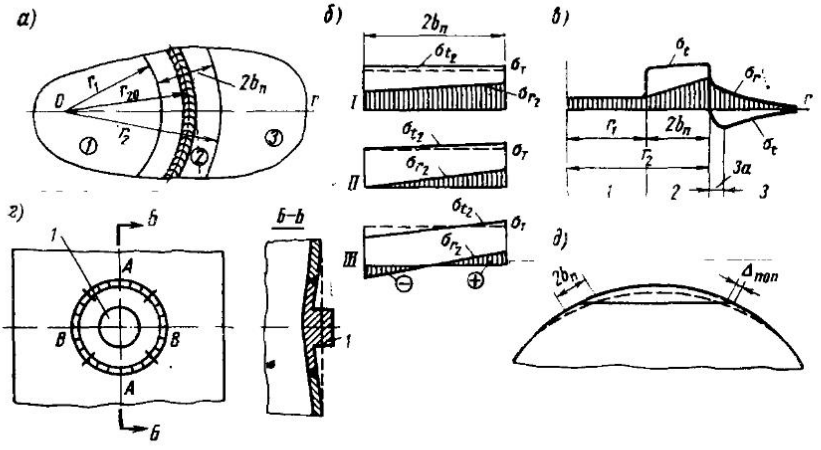


Рис. 6-21. Распределение напряжений и перемещений при сварке круговых швов в пластине (*а*, *б*, *в*) и в оболочках (*г*, *д*)

нюю *1*, среднюю *2* и внешнюю *3* (рис. 6-21, *а*, *в*). Зона *2* соответствует зоне растягивающих напряжений в обычном прямолинейном шве и имеет, как правило, высокие напряжения σ_{t_2}, близкие к пределу текучести. Вследствие уравновешенности зоны *2*, представляющей кольцо, радиальные напряжения σ_{r_2}, действующие на внешнюю зону *3*, всегда больше напряжений σ_{r_1}, действующих на внутреннюю зону. В малоуглеродистых и аустенитных сталях зона *2* находится в состоянии пластической деформации, что соответствует условию пластичности,

$$\sigma_{r_2}^2 + \sigma_{t_2}^2 - \sigma_{r_2}\sigma_{t_2} = \sigma_т^2. \qquad (6.16)$$

В сочетании с дифференциальным уравнением равновесия уравнение (6.16) позволяет определить распределение напряжений σ_{r_2} и σ_{t_2} в зоне *2* в зависимости от величины напряжения

σ_{r_1} или σ_{r_3}. На рис. 6-21, *б* схематично показано несколько возможных распределений (*I, II, III*) эпюр напряжений σ_{r_2} и σ_{t_2} в зоне *2*. В свою очередь, величина напряжений σ_{r_1} зависит от соотношения жесткостей элементов в областях *1* и *3*, радиуса r_{20}, поперечного сокращения шва и ширины зоны пластических деформаций $2b_{\text{п}}$.

Установить точную количественную связь между всеми этими величинами трудно. Однако всегда напряжение σ_{r_3} — растягивающее, в то время как σ_{r_1} может быть и растягивающим и сжимающим. Это объясняется тем, что поперечная усадка соединения вызывает растягивающие напряжения σ_r и в области *1*, и в области *3*, а продольная (окружная) вызывает в области *3* напряжения растяжения σ_r, а в области *1* — сжатие. При больших размерах зоны *3* и малых размерах зоны *1* поперечная усадка преобладает, и в области *1* действуют растягивающие напряжения (рис. 6-21, *б*). Аналогичная картина наблюдается, если элемент *1* представляет собой жесткую бобышку или фланец небольшого диаметра (до 100—200 *мм*). В этом случае могут возникнуть большие радиальные пластические деформации и даже разрушение металла.

Сжимающие напряжения σ_{r_1} в зоне *1* возникают при относительно малой жесткости области *3*, например, при приварке узкого кольца; окружное сокращение почти полностью передается на область *1* и она испытывает сжатие.

Круговые швы на сферических поверхностях вызывают нарушение формы оболочки в зоне кругового шва с приближением свариваемого элемента к центру сферы (рис. 6-21, *д*, пунктирная линия). Деформации появляются вследствие поперечной усадки соединения $\Delta_{\text{поп}}$ и окружного сокращения металла в зоне пластических деформаций $2b_{\text{п}}$. Характер деформаций близок к осесимметричному. В круговых швах остаточные напряжения в окружном направлении обычно велики и могут достигать значений $\sigma_{\text{т}}$. Напряжения поперек шва могут изменяться от нулевых значений, если круговой шов близок к кольцевому, до значений $\sigma_{\text{т}}$ в случае расположения кругового шва в зените сферы. Большие значения поперечных напряжений иногда являются причиной разрушений в круговых сварных соединениях.

Деформации от круговых швов на цилиндрических оболочках имеют сложный характер (рис. 6-21, *г*). Поперечная усадка в зонах *B* и продольная в зонах *A* создают сокращение периметра оболочки, в результате чего деталь *1* перемещается к оси цилиндра. Прямолинейная образующая искривляется.

При точечном разогреве на сферической или цилиндрической оболочке после остывания происходит перемещение нагревавшегося пятна к центру оболочки.

В толстостенных цилиндрических сосудах продольные и кольцевые швы выполняют многослойной дуговой или однопроходной электрошлаковой сваркой.

Образование напряжений и перемещений при сварке продольных швов в основном подчиняется тем же закономерностям, которые свойственны прямолинейным стыковым соединениям в пластинах. Сопротивление угловым деформациям при многослойной сварке продольного шва зависит от жесткости обечайки. Это оказывает влияние на величину напряжений σ_y в корне шва, если он расположен с внутренней стороны обечайки. Они могут быть, как растягивающими, так и сжимающими. Напряжения σ_x вдоль шва в продольном многослойном шве близки к $\sigma_т$.

В кольцевых многослойных швах на образование напряжений σ_y оказывают влияние поперечная усадка очередного валика, вызывающая сжатие нижележащих слоев; изгиб, возникающий от поперечной усадки валика, расположенного с эксцентриситетом относительно центра тяжести шва; изгиб оболочки вследствие окружного сокращения валиков. Изгибы от поперечной усадки и вследствие окружного сокращения валиков вызывают растяжение в корне шва. Остаточные напряжения σ_y в корне шва после заварки всей разделки зависят от жесткости оболочки и условий сварки. В гибких оболочках в корне шва могут возникать значительные поперечные деформации и напряжения. Продольные (окружные) напряжения σ_x в многослойных швах стальных обечаек близки к $\sigma_т$.

§ 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ, НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Для экспериментального определения деформаций и напряжений используют различные способы, основанные на явлениях фотоупругости, магнитной проницаемости, отражении рентгеновских лучей и др. Наибольшее распространение получили механические методы, в основе которых лежит измерение перемещений точек тела с помощью тензометров: механических, электросопротивления, индуктивных, емкостных и др.

Измерение временных деформаций и перемещений в большинстве случаев производится с помощью механических приборов, устанавливаемых нередко в зоне действия высоких температур. При этом они могут охлаждаться проточной водой.

Определение деформаций металла от внутренних сил в околошовных зонах в процессе сварки производят дифференциальным методом. Прибор на некоторой базе длиною $10 \div 25$ *мм*, расположенной параллельно оси шва, регистрирует изменение

деформации формоизменения $\varepsilon_ф$ во времени, которая слагается из температурной деформации $\varepsilon_т$ и деформации металла от внутренних сил ε

$$\varepsilon_ф = \varepsilon_т + \varepsilon. \tag{6.17}$$

Одновременно записывается термический цикл металла посередине базы измерения. Результат измерения $\varepsilon_ф$ откладывают на графике в функции температуры (кривая *1* на рис. 6-22, *а*). Затем на образце из того же металла, что и свариваемая пластина, при термическом цикле, совпадающем со снятым при сварке, определяют температурную деформацию $\varepsilon_т$ — дилатограмму металла (кривая *2* на рис. 6-22, *а*). Вычитая из $\varepsilon_ф$ вели-

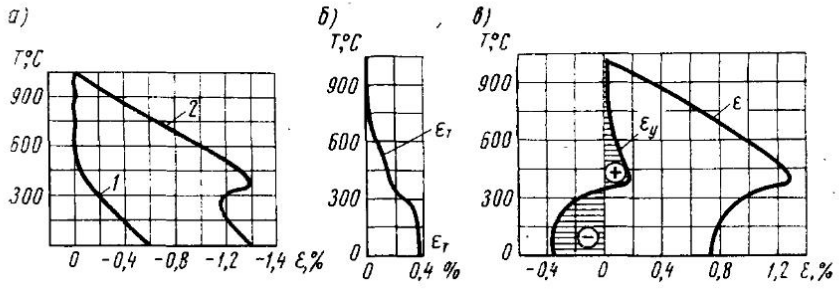


Рис. 6-22. Определение деформаций с помощью дифференциального метода

чину $\varepsilon_т$, получают ε (рис. 6-22, *в*). Зная зависимость деформации $\varepsilon_т$, соответствующей пределу текучести $\sigma_т$, от температуры (рис. 6-22, *б*), можно судить об упругих $\varepsilon_у$ и пластических деформациях металла при сварке.

Определение перемещений деталей, например при электрошлаковой сварке, можно производить с помощью индикаторных головок, штангенциркулей и съемных деформометров, так как перемещения происходят относительно медленно. В лабораторных условиях используют метод моделирования, сваривая детали уменьшенных или увеличенных по сравнению с натурой размеров. Одним из основных требований при этом является подобие температурных полей, что дает для пластин:

$$\left.\begin{gathered}\left(\frac{q}{\lambda s}\right)_н = \left(\frac{q}{\lambda s}\right)_м;\ \left(\frac{v_c x}{2a}\right)_н = \left(\frac{v_c x}{2a}\right)_м; \\ \left(\frac{ba}{v_c^2}\right)_н = \left(\frac{ba}{v_c^2}\right)_м,\end{gathered}\right\} \tag{6.18}$$

где индекс «н» относится к детали в натуральную величину, а индекс «м» — к модели;

x — линейные размеры;
s — толщина пластины;
q и v_c — эффективная мощность и скорость источника тепла;
b — коэффициент температуроотдачи;
a — коэффициент температуропроводности.

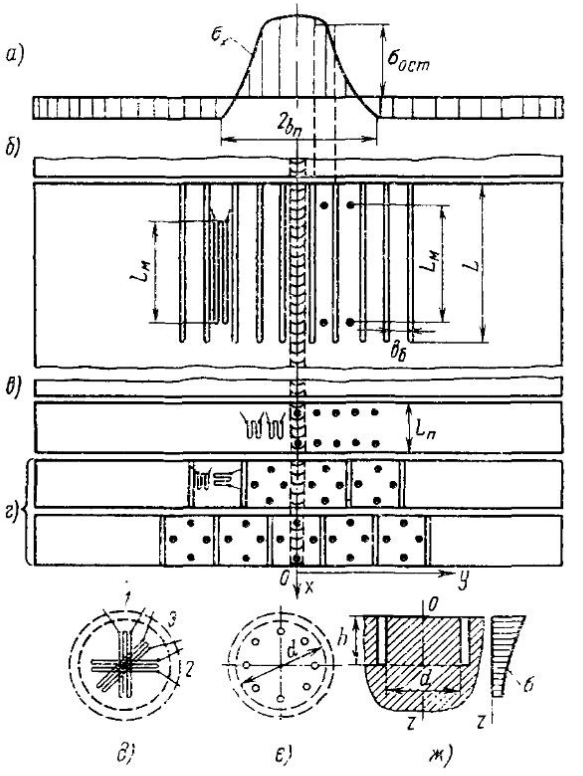


Рис. 6-23. Расположение мерительных баз и схемы разрезки при определении одноосных и двуосных остаточных напряжений

Определение остаточных напряжений производят физическими и механическими методами. Последние получили значительное распространение. Они основаны на освобождении металла от напряжений путем его разрезки. При этом регистрируют возникающие деформации и по ним вычисляют остаточные напряжения.

Определение одноосных и двухосных напряжений. Одноосные напряжения (рис. 6-23, *а*) в пластинах

незначительно изменяются по длине шва. Поэтому размер базы $L_м$ (рис. 6-23, *б*) можно принять достаточно большим (до 100 *мм*). Начальный отсчет берут либо с проволочных датчиков, либо производят съемным механическим тензометром с двух сторон пластины. Механический тензометр устанавливается в специальные конусные лунки диаметром около 2 *мм*.

Затем разрезают пластины на полосы (рис. 6-23, *б*), ширина которых $b_б$ в зоне значительных градиентов должна быть по возможности меньше. После разрезки измерения повторяются. По разности отсчетов определяют деформацию.

Остаточные напряжения вычисляют по формуле

$$\sigma_{x_{ост}} = -\varepsilon E, \tag{6.19}$$

где ε — относительная деформация фибра металла, возникшая в результате разрезки;

E — модуль упругости металла.

Возможна вырезка одной полосы, перпендикулярной оси шва (рис. 6-23, *в*). Однако для достаточного снятия напряжений разрезкой в этом случае необходимо, чтобы $L_п < b_п$. Одноосные остаточные напряжения в балках определяют путем разрезки их на полосы или путем сострагивания слоев.

Двухосные остаточные напряжения в пластинах определяют путем разрезки металла по схеме, показанной на рис. 6-23, *в* или *г*. Измерения производят по двум направлениям, совпадающим с главными осями. Остаточные напряжения вычисляются по формулам

$$\left.\begin{aligned} \sigma_{x_{ост}} &= -\frac{E(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)}{1-\mu^2}, \\ \sigma_{y_{ост}} &= -\frac{E(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x)}{1-\mu^2}, \end{aligned}\right\} \tag{6.20}$$

где ε_x и ε_y — относительные деформации металла в направлениях Ox и Oy, возникшие в результате разрезки.

Когда направления главных осей не известны, измерения производят в трех направлениях, используя либо розетку датчиков (рис. 6-23, *д*), либо механический тензометр (рис. 6-23, *е*). При определении двухосных остаточных напряжений на поверхности массивных тел производят подрезку металла на глубину $h \approx 0{,}6d$ (рис. 6-23, *ж*). При этом напряжения на поверхности, где наклеены датчики или расположены лунки под тензометр, снимаются достаточно полно.

Определение трехосных остаточных напряжений в сварных швах представляет значительную трудность, так как установка тензометров не может быть произведена без некоторого нарушения поля остаточных напряжений. Наиболее

универсальным из известных является метод, при котором в теле образца или детали сверлятся отверстия небольшого диаметра 5—8 *мм,* заканчивающиеся в зоне, где необходимо определить напряжения. Таких отверстий, различно ориентированных, может быть несколько. В них устанавливаются (приклеиваются, заливаются эпоксидной смолой или закрепляются на резьбе) тензометры с проволочными датчиками. После вырезки столбиков металла $\varnothing = 30—40$ *мм* с тензометром посередине производят повторный отсчет и находят деформации. По ним вычисляют напряжения.

В одном отверстии может находиться несколько различным образом ориентированных тензометров. Указанный метод основан на той особенности, что при сверлении отверстия искажение поля напряжений происходит в основном на расстоянии около пяти радиусов отверстий. Следовательно, если при вырезке столбика его границы находятся за пределами зоны искажения напряжений, то тензометр будет воспринимать деформации от снятия этих мало измененных напряжений.

Кроме перечисленных, имеется значительное количество других методов определения остаточных напряжений, предназначенных для определенных типов сварных соединений и элементов конструкций.

ГЛАВА VII

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИИ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

§ 1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Влияние сварочных напряжений, деформаций и перемещений на эксплуатационные характеристики сварных соединений и конструкций весьма многообразно. Остаточные напряжения могут оказывать влияние на точность сварных конструкций при механической обработке и последующей эксплуатации. Снятие напряженного металла при механообработке вызывает изменение уже полученных размеров, а суммирование рабочих и остаточных напряжений в эксплуатации при достижении ими $\sigma_т$ вызывает остаточные деформации детали или узла после снятия рабочих нагрузок. Вследствие протекания пластических деформаций при первом нагружении деформируемость конструкции может превысить допустимые нормы.

Растягивающие остаточные напряжения снижают прочность при переменных нагрузках. Пластические деформации, вызванные сваркой, и остаточные напряжения в ряде случаев оказывают отрицательное влияние на коррозионную стойкость сварных соединений.

В процессе кристаллизации металла, а также непосредственно после окончания сварки пластические деформации и растягивающие напряжения могут вызвать появление горячих или холодных трещин.

Остаточные напряжения сжатия в листовых элементах конструкций, а также прогибы, возникающие в них после сварки, снижают местную устойчивость при действии сжимающих нагрузок.

Пластические деформации металла при повышенных температурах ($T=200$—$300°$ С) вызывают его старение и снижение пластичности. В сочетании с накопленной энергией от остаточных

напряжений такие места в сварных конструкциях могут явиться очагами хрупких разрушений, в особенности при пониженных температурах. Такую же опасность представляют зоны с трехосными растягивающими напряжениями.

Остаточные перемещения в элементах сварных конструкций вследствие нарушения проектных форм и изменения размеров существенно затрудняют сборку конструкций как в процессе изготовления, так и на заключительной стадии. Для их устранения требуются большие затраты труда.

Значительные перемещения заставляют увеличивать припуск на механическую обработку. Ухудшаются эксплуатационные качества некоторых изделий, такие как сопротивление потоку жидкости или газа.

Коробление ухудшает внешний вид изделий.

В основе известных методов уменьшения и устранения сварочных напряжений и деформаций лежат три принципа, на использовании которых и построены различные технологические приемы:

1. Уменьшение величины пластической деформации укорочения в процессе нагрева и уменьшение объема металла, участвующего в пластической деформации. Этого можно достигнуть регулированием термического воздействия, например, уменьшением погонной энергии сварки, искусственным охлаждением, уменьшением количества сварных швов, их калибра, предварительным подогревом, растяжением металла в процессе сварки в зоне нагрева и др. Во всех этих случаях либо уменьшается пластическая деформация укорочения, возникающая в процессе нагрева, либо сокращается объем пластически деформированного металла.

2. Увеличение пластических деформаций удлинения в зонах, где возникли пластические деформации укорочения. В идеальном случае достигается равенство тех и других, в результате чего величина остаточных деформаций оказывается равной нулю. Приемами, основанными на этом принципе, являются проковка, прокатка, растяжение после сварки, изгиб, закрепление в приспособлениях, высокий отпуск. В указанных случаях либо в процессе сварки, либо чаще уже после сварки создается пластическая деформация, уменьшающая остаточные деформации укорочения.

Оба названных принципа в конечном итоге направлены к уменьшению объема остаточной пластической деформации укорочения.

3. Компенсация возникающих деформаций и перемещений путем создания деформаций противоположного знака. Например, предварительный пластический изгиб перед сваркой, симметричное расположение швов, рациональная

последовательность сборки и сварки, термическая правка, создающая укорочение металла в необходимых зонах.

В некоторых приемах одновременно используются разные принципы.

Методы условно подразделяются на методы уменьшения остаточных напряжений и на методы уменьшения перемещений от сварки в зависимости от того, каково основное назначение конкретного метода. Разумеется, при изменении перемещений изменяется и напряженное состояние.

§ 2. УМЕНЬШЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Уменьшение остаточных напряжений производится предварительным и сопутствующим подогревом, высоким отпуском, механическими методами.

Подогрев, помимо снижения остаточных напряжений, заметно влияет на структуру металла в зоне сварки. Уменьшая скорость охлаждения, удается регулировать структурные превращения. Не следует переоценивать возможности низкотемпературного (до 200—250° С) подогрева для снижения напряжений, так как уменьшение их составляет ориентировочно не более 30—40%. Подогрев понижает предел текучести металла в момент сварки, что и влияет на формирование и величину остаточных напряжений.

Наиболее эффективным методом уменьшения остаточных напряжений является общий высокий отпуск. Высокий отпуск является практически единственным методом, когда одновременно с уменьшением напряжений первого рода происходит восстановление пластичности металла и снижение напряжений более высоких родов по всему объему металла сварной конструкции независимо от ее сложности и конфигурации. В случае необходимости можно снизить напряжения до 85—90% от исходных значений (рис. 7-1). Высокий отпуск сварных конструкций по объему своего применения в машиностроении значительно превосходит все остальные методы уменьшения остаточных напряжений.

Высокий отпуск состоит из 4-х стадий (рис. 7-2): нагрева, выравнивания температур по длине и сечению детали, выдержки и охлаждения. Продолжительность нагрева и выравнивания температур зависит от размеров сечения деталей. Продолжительность выдержки при температуре отпуска зависит как от структурных изменений в металле при восстановлении пластичности, утраченной в результате закалки, деформационного старения и наклепа металла, так и от необходимой степени снижения остаточных напряжений.

Экспериментальные данные показывают, что при температуре отпуска 650—680° С пластичность низкоуглеродистых сталей

полностью восстанавливается через 2—3 *ч*. Снижение остаточных напряжений после достижения температуры отпуска и выдержки 2—3 *ч* продолжается, но весьма медленно. Поэтому в большинстве случаев выдержку при отпуске следует назначать в зависимости от необходимой степени снижения напряжений.

Для суждения о величине снижения остаточных напряжений удобно использовать кривые простой релаксации, снятые от различных начальных уровней (рис. 7-3, *а*). Это объясняется тем, что процесс изменения собственных напряжений при отпуске весьма близок к процессу простой релаксации, когда напряже-

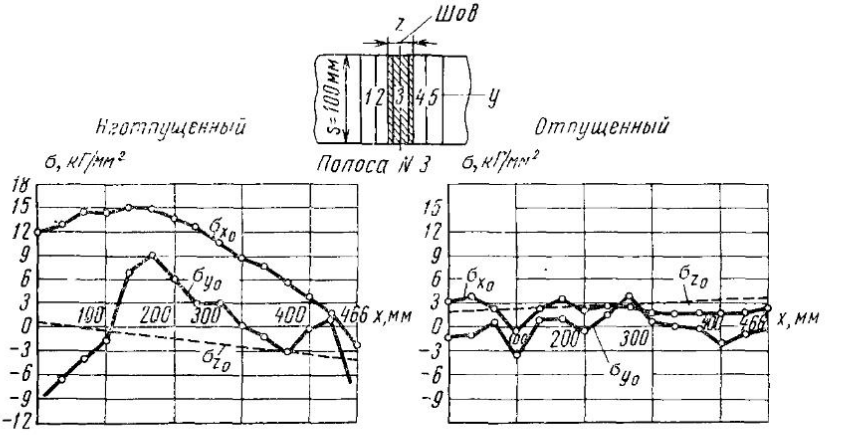


Рис. 7-1. Остаточные напряжения в швах электрошлаковых сварных соединений:

$s=100$ *мм*, Ст. 3 до и после высокого отпуска; x — координата вдоль оси шва; σ_{x_0}, σ_{y_0}, σ_{z_0} — средние остаточные напряжения вдоль шва, поперек шва и в направлении толщины

ния снижаются, а деформации элементарных объемов тела сохраняются строго постоянными. В процессе отпуска полного постоянства деформаций нет, однако их изменение незначительно. Получение кривых простой релаксации при переменной температуре осуществляется на трубчатых тонкостенных образцах, угол закручивания которых поддерживается постоянным. Переход от октаэдрических касательных напряжений $\tau_{окт}$, получаемых при испытании трубчатых образцов, к нормальным напряжениям σ можно производить по формуле

$$\sigma = 2{,}12\,\tau_{окт}. \qquad (7.1)$$

Снижение одноосных и двухосных остаточных напряжений происходит приблизительно так же, как и на кривых простой

релаксации (рис. 7-3, *а*). Изменение трехосных остаточных напряжений находится путем решения специальных задач [5] с учетом процесса простой релаксации и перераспределения напряжений в теле. Результаты расчетов показывают (рис. 7-3, *б*), что снижение трехосных растягивающих напряжений, например, в электрошлаковом соединении большой толщины следует той же закономерности, что и одноосных, но величина их оказывается в 2—2,5 раза выше одноосных.

Многолетняя заводская практика выработала нормативы для продолжительности выдержки при отпуске, исходя из толщины металла наиболее массивных элементов конструкции, например 1 *ч* на 25—50 *мм* толщи-

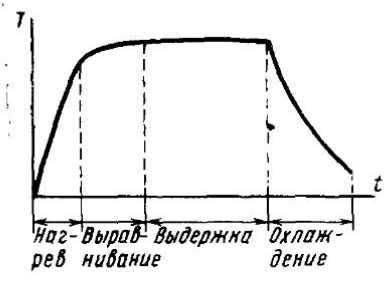


Рис. 7-2. Характерный термический цикл при проведении высокого отпуска:
T — температура; *t* — время

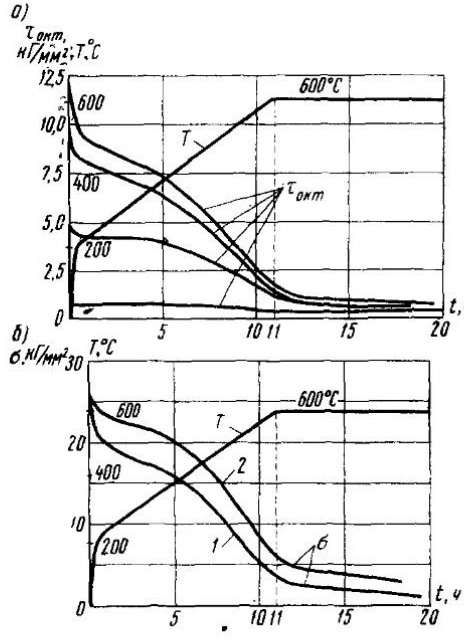


Рис. 7-3. Кривые простой релаксации стали 30, снятые при термическом цикле отпуска (*а*), и снижение остаточных напряжений в сварных швах (*б*):
1 — одноосных; *2* — трехосных

ны. Такой подход не учитывает температуры отпуска, свойств металла и распределения остаточных напряжений и приводит к завышенной продолжительности периода выдержки. Более правильным является назначение продолжительности выдержки по релаксационным кривым в зависимости от необходимого снижения остаточных напряжений. Уровень допустимых остаточных напряжений после отпуска зависит от требований, предъявляемых к сварной конструкции.

Высокий отпуск, как правило, предназначается для предотвращения деформирования, вызванного перераспределением напряжений, а также для повышения сопротивляемости хрупким

разрушениям. Так как в большинстве машиностроительных конструкций напряжения от рабочих нагрузок не превышают $2/3\,\sigma_т$, то остаточные напряжения могут составлять примерно до $1/3\,\sigma_т$, если ставится условие отсутствия пластических деформаций в детали при ее нагружении. Хрупкие разрушения, в частности при низких температурах, как это следует из пробы Робертсона, могут происходить при напряжениях обычно выше $0{,}15—0{,}25\,\sigma_т$. Указанные напряжения практически достигаются после двухчетырехчасовой выдержки, когда наступает относительная стабилизация напряжений и дальнейшее их снижение почти не происходит. Поэтому для большинства машиностроительных конструкций, если не предъявляются специальные требования, выдержка после выравнивания температур может составлять 3—4 *ч* независимо от толщины металла.

Если требуется более значительное снижение остаточных напряжений, то это в лучшей мере может быть достигнуто некоторым повышением температуры отпуска (на 20—30° С), чем увеличением продолжительности выдержки. Эксперименты показывают, что повышение температуры отпуска на 30—50° С дает больший эффект, чем дополнительная выдержка в течение 10—15 *ч*.

Местный отпуск отличается от общего обычно средствами, с помощью которых осуществляется нагрев, а также тем, что при местном отпуске нагревается до заданной температуры лишь часть сварной конструкции. При остывании неравномерно нагретой детали возникают вновь остаточные напряжения, величина которых зависит от распределения температуры и жесткости детали. Основное назначение местного отпуска заключается в восстановлении пластических свойств металла и повышении сопротивляемости разрушениям.

Однако необходимо стремиться к тому, чтобы возникающие остаточные напряжения были минимальными и находились в зоне, где нет концентраторов напряжений. Например, если при местном отпуске кольцевого стыка трубы нагревалась узкая зона (рис. 7-4, *а*, кривая *1*), то при остывании, как и при сварке, вновь будет возникать изгиб трубы с растяжением в корне шва. При нагреве более широкой зоны (кривая *2*) остаточные напряжения при остывании будут возникать в основном в стороне от шва, в местах максимальных градиентов температур (заштрихованные зоны), а не в корне кольцевого шва.

Остаточные напряжения можно уменьшить также более плавным изменением температур по длине детали. Следует избегать назначения местной термообработки в замкнутом контуре (рис. 7-4, *б*) без компенсации температурного сокращения, возникающего при остывании. Целесообразно производить одновременно нагрев в другом симметричном сечении, как это схематично показано на рис. 7-4, *б*.

Поэлементный отпуск состоит в том, что отпускаются отдельные узлы конструкции, включающие зоны и элементы, где отпуск необходим, затем эти узлы свариваются между собой швами, конструктивное оформление которых не содержит резких концентраторов, а качество выполнения может быть проконтролировано. Чаще всего это — сварные соединения встык с полным проваром.

В ряде случаев конструкции, особенно из легированных сталей, свариваются присадочным металлом иного химического состава, чем основной металл. Сочетание основного металла и металла шва может оказаться неблагоприятным в отношении образования остаточных напряжений при остывании после отпуска.

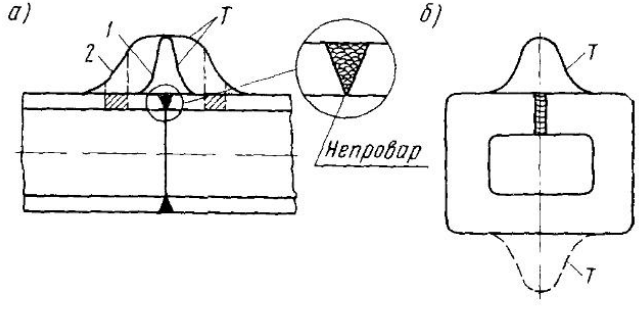


Рис. 7-4. Распределение температур T при местном отпуске сварных соединений

Это происходит вследствие различных коэффициентов линейного расширения шва и основного металла. Особенно значительными, достигающими величины $\sigma_т$, будут остаточные напряжения, если шов из аустенитного металла соединяет элементы, выполненные из перлитных сталей. Остаточные напряжения после отпуска и охлаждения возникают также в деталях, сваренных из разнородных по химическому составу металлов. Наиболее значительными оказываются эквивалентные напряжения около плоскости сплавления

$$\sigma_i = \frac{0{,}925\,\Delta\varepsilon E}{1-\mu}, \qquad (7.2)$$

где $\Delta\varepsilon$ — разность температурной деформации у двух разнородных металлов, возникающая при остывании после отпуска;

E — модуль упругости металла;

μ — коэффициент Пуассона.

Механические методы (проковка, прокатка, вибрация, приложение нагрузки к сварным соединениям) вызывают

сравнительно неравномерное уменьшение напряжений. Все они основаны на создании пластической деформации металла.

Проковка металла производится непосредственно после сварки по горячему металлу или после остывания. Благодаря осадке металла в направлении удара происходит его расширение в двух других направлениях. Растягивающие напряжения снижаются, а при значительной пластической деформации даже переходят в сжимающие. Снижение средних напряжений оказывается благоприятным в отношении предупреждения образования трещин и деформаций элементов конструкции. Основное преимущество этого метода состоит в простоте применяемого оборудования, универсальности и оперативности.

Прокатка обеспечивает более равномерную пластическую деформацию металла, по сравнению с проковкой, и в основном предназначена для устранения перемещений.

Приложение нагрузки к сварным соединениям осуществляется путем растяжения, изгиба элементов и т. п. Суммирование остаточных и приложенных напряжений вызывает пластические деформации удлинения и после снятия нагрузки снижение максимальных напряжений. Величина снижения напряжений зависит от величины прикладываемых напряжений.

Разновидностью метода приложения нагрузок является термомеханический метод. Участки основного металла, находящиеся по обе стороны зоны сварочных пластических деформаций, нагреваются движущейся горелкой или индуктором до температуры 150—250° С и непосредственно после нагрева охлаждаются водой. Создаются два движущихся пятна, которые, расширяясь, растягивают дополнительно зону сварного соединения в направлении вдоль шва и вызывают ее сжатие в поперечном направлении. Такая схема нагружения зоны пластических деформаций благоприятна в отношении протекания пластических деформаций. После указанной обработки снижаются максимальные растягивающие напряжения.

§ 3. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Все мероприятия по уменьшению деформаций можно разделить на три группы в зависимости от того, применяются ли они до сварки, в процессе сварки или после нее.

Мероприятия, применяемые до сварки:

1) рациональное конструирование сварного изделия включает уменьшение количества наплавленного металла, назначение видов сварки с малой погонной энергией, симметричное относительно центра тяжести сечения расположение швов и др.

Применение типов сварных соединений (например, внахлестку), позволяющих компенсировать усадку от других швов;

2) назначение начальных размеров и формы заготовок, их взаимное расположение с учетом последующей усадки, например, угловой излом (рис. 7-5, *а*) или переменный по длине шва зазор;

3) создание деформаций удлинения и напряжений растяжения в зоне сварного соединения путем изгиба или растяжения изделия в приспособлениях (рис. 7-5, *б*). Закрепления снимаются после завершения сварки и остывания;

4) создание деформаций и перемещений, обратных сварочным, путем пластического деформирования элементов. Сварка производится без приспособлений. Разновидностью этого приема является подогрев листов, которые затем собираются на при-

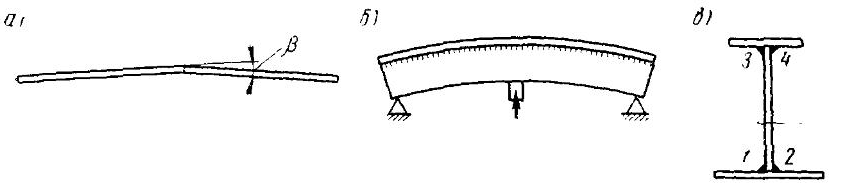


Рис. 7-5. Примеры использования способов, уменьшающих сварочные деформации

хватках с холодным каркасом. Удлинение листов от нагрева компенсирует возникающие в дальнейшем при сварке деформации укорочения и предотвращает потерю их устойчивости.

Мероприятия, используемые в процессе сварки:

1) снижение погонной энергии сварки при назначении более экономичных режимов;

2) уменьшение площади зоны пластических деформаций путем искусственного охлаждения, например водой;

3) закрепление изделий в приспособлениях. Положительный эффект достигается при использовании жесткости приспособлений;

4) рациональная последовательность выполнения сборочно-сварочных операций. На рис. 7-5, *в* приведен пример последовательности сварки двутавровой несимметричной балки, когда вначале сваривают тавр швами *1* и *2*, ближе расположенными к центру тяжести сечения, а затем швами *3* и *4*;

5) создание в процессе точечной или роликовой сварки направленного смещения элементов, уменьшающего деформации сварного изделия;

6) регулирование величины усадочной силы в материалах, испытывающих структурные превращения, применением режимов с оптимальной погонной энергией сварки в сочетании со специфическими свойствами металла. Напряжения сжатия в зоне структурных превращений уравновешивают напряжения растяжения в остальной части зоны пластических деформаций, в результате чего усадочная сила заметно уменьшается или даже оказывается равной нулю.

Мероприятия, используемые после сварки:

1) создание путем пластической деформации в зоне сварного соединения перемещений, обратных сварочным (изгиб, растяжение, проковка, прокатка роликами, осадка металла по толщине под прессом и т. п.);

2) создание пластических деформаций укорочения путем местного нагрева (термическая правка);

3) устранение деформаций при высоком отпуске деталей в зажимных приспособлениях.

Ниже рассмотрены некоторые конкретные приемы уменьшения деформаций, нашедшие распространение в производстве.

Уменьшение временных перемещений при электрошлаковой сварке пластин встык может быть выполнено лишь по отношению к угловым перемещениям в плоскости пластин.

Перемещения кромок от их нагрева непосредственно в зоне ванны можно уменьшить лишь частично, уменьшая погонную энергию сварки. Поступательные перемещения пластин практически уменьшить не удается вследствие большого сопротивления заваренного участка шва растяжению.

Угловые перемещения можно устранить или уменьшить несколькими приемами, однако во всех вариантах положительный результат достигается созданием изгибающего момента в плоскости свариваемых деталей, например путем использования веса деталей (рис. 7-6). До тех пор, пока момент от внутренних усадочных сил не превзойдет момента от веса детали $G_1 l_1$, поворот происходить не будет. В случае необходимости внешний момент может быть увеличен за счет балласта.

В практике широкое применение нашел способ скрепления деталей скобами *2*, сухарями *1* или через притупления кромок. Благоприятным является то, что угловые перемещения наиболее значительны в начальный период сварки, когда длина заваренного шва h еще мала и противодействующие силы и моменты способны вызвать пластическую деформацию заваренного участка. Приближенно необходимый момент для образования пластического шарнира в шве можно вычислить по формуле

$$M \approx \left(\frac{2}{3}\sigma\right)\frac{sh^2}{4} = \frac{\sigma s h^2}{6}, \qquad (7.3)$$

где h — длина заваренного шва (рис. 7-6);

s — толщина металла;

σ — предел текучести металла при температуре нижней части шва.

Коэффициент 2/3 перед σ в формуле (7.3) приближенно учитывает понижение предела текучести металла в верхней части шва в области более высоких температур.

Применение зажимных приспособлений для уменьшения сварочных перемещений имеет разную эффективность в зависимости от конкретных условий. На стадии сборки и прихватки элементов, когда перемещения могут быть значительными, зажимные приспособления весьма эффективны. Они фиксируют проектное положение деталей. Вполне оправдано использование зажимных приспособлений при сварке встык листов толщиной до 6÷8 *мм*. В этом случае приспособление не позволяет листам перемещаться в плоскости, плотно прижимает кромки к подкладке и обеспечивает устойчивость. Последнее достигается на листах толщиной 1÷3 *мм*, если усилие прижима одной кромки приспособлением составляет около 15—20 *кГ* на 1 *см* длины.

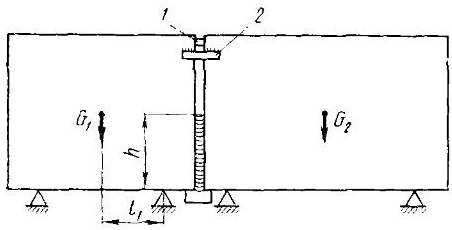


Рис. 7-6. Пример использования веса детали и скоб для уменьшения деформаций при электрошлаковой сварке

Нередко приспособления используют для уменьшения изгиба конструкций типа балочных, давая остывать балкам после сварки в приспособлении. Такое использование приспособлений неэффективно, так как уменьшение кривизны балки по сравнению со случаем сварки ее вне приспособления крайне мало. Даже при использовании абсолютно жесткого приспособления, момент инерции которого может считаться бесконечно большим, кривизна балки $C_{пр} = \frac{1}{R}$ при сварке ее в приспособлении составляет значительную величину, по сравнению с кривизной C при сварке без приспособления

$$C_{пр} = \frac{J_б - J_п}{J_б} C, \qquad (7.4)$$

где $J_б$ — момент инерции поперечного сечения балки относительно оси изгиба;

$J_п$ — момент инерции площади зоны пластических деформаций относительно центра тяжести поперечного сечения балки.

Так как обычно в конструкциях $J_б$ значительно больше $J_п$, то коэффициент при C близок к единице.

Термическая правка сварных конструкций местным нагревом основана на использовании тех же явлений, которые имеют место при сварке. Благодаря простоте, универсальности и маневренности термическая правка находит в производстве достаточное применение. Нагрев стальных изделий обычно осуществляют газовым пламенем. Температура нагрева для углеродистых сталей составляет 600—800° С. Нагреву подвергаются

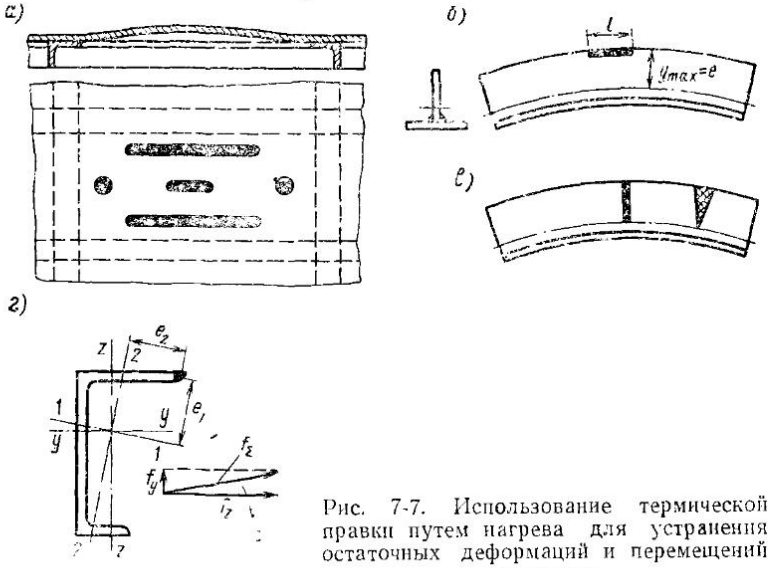


Рис. 7-7. Использование термической правки путем нагрева для устранения остаточных деформаций и перемещений от сварки

такие места в конструкции, после усадки которых должны возникнуть перемещения, компенсирующие сварочные деформации. По типу нагреваемых зон конструкции, подвергаемые термической правке, могут быть условно разделены на две группы:

1) конструкции, в которых необходимо править листовые элементы, потерявшие устойчивость от напряжений сжатия;

2) прочие конструкции главным образом балочного и рамного типа, в которых появились деформации изгиба.

Избыток площади в листах, потерявших устойчивость, устраняется путем местного нагрева листа пятнами, расположенными в различных местах (рис. 7-7, *а*). Пятна могут быть круглыми или в виде полосы в зависимости от характера усадки, которую необходимо получить. Во время нагрева пятна необходимо стремиться к концентрированному разогреву, чтобы окружающий

металл был по возможности менее нагрет. Тогда он будет оказывать сопротивление расширению нагретой зоны, вызывая в ней пластические деформации. Нагрев остальных пятен можно производить, не ожидая остывания листа. О результатах правки можно судить лишь после полного остывания листа.

Для устранения изгиба балочных и рамных конструкций изогнутый элемент нагревается с выпуклой стороны. Зона нагрева может располагаться как вдоль элемента, так и поперек его (рис. 7-7, *б, в*). В первом случае используется эффект продольной усадки, во втором — поперечной. Нагрев может выполняться и клиновидной формы (рис. 7-7, *в*). Поперечные нагревы выполняют в нескольких местах по длине балки. Объем нагреваемого металла устанавливают обычно непосредственно в процессе правки по результатам предыдущих нагревов.

Определение мест нагрева в поперечном сечении должно производиться с учетом расположения их относительно главных центральных осей *1—1* и *2—2* (рис. 7-7, *г*). В случае продольного нагрева, показанного на рис. 7-7, *г* темным пятном, изгиб определяют по формуле, включающей отношение $\frac{e}{J}$,

$$f = \frac{P_{\text{ус}} e l^2}{8EJ}, \qquad (7.\ 5$$

где e — расстояние от зоны нагрева до центра тяжести сечения;

l — длина зоны нагрева;

J — момент инерции сечения.

Для определения плоскости изгиба необходимо найти значения величин $\frac{e_1}{J_1}$ и $\frac{e_2}{J_2}$ и построить векторную диаграмму (рис. 7-7, *г*). Положение суммарного вектора f_{Σ} совпадает с положением плоскости изгиба.

Упругое предварительное деформирование деталей в приспособлениях производится так, чтобы зона сварки оказалась расположенной в зоне растягивающих напряжений. Сварка по напряженному металлу приводит к уменьшению величины усадочной силы, действующей на конструкцию после сварки. Вследствие этого уменьшается величина изгиба и укорочения. На рис. 7-8, *а* показана эпюра остаточных пластических деформаций укорочения в широкой пластине при сварке без растяжения. Усадочная сила пропорциональна площади $ABB'A'$. При наличии предварительно созданных деформаций удлинения $\Delta\varepsilon$ (рис. 7-8, *б*) остаточные пластические деформации укорочения будут выражаться площадью $CBB'C'$. Следовательно, усадочная сила будет заметно меньше. В случае $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{т}}$ усадочная сила равна нулю.

Прием предварительного деформирования в приспособлении может использоваться и на цилиндрических оболочках при

сварке кольцевого шва (рис. 7-8, *в*). Если с помощью распорного кольца создать предварительные деформации удлинения ε_{max}, близкие к $\varepsilon_т$, в некоторой зоне шириной $2b$, превышающей по ширине зону пластических деформаций при сварке $2b_п$, то после остывания остаточные пластические деформации укорочения будут близки к нулю и окружного сокращения оболочки не произойдет.

Устранение деформаций в тонколистовых конструкциях путем прокатки зоны сварного соединения цилиндрическими роликами основано на создании пластической деформации металла по толщине. Эта деформация приводит к удлинению металла в зоне прокатки в продольном и попереч-

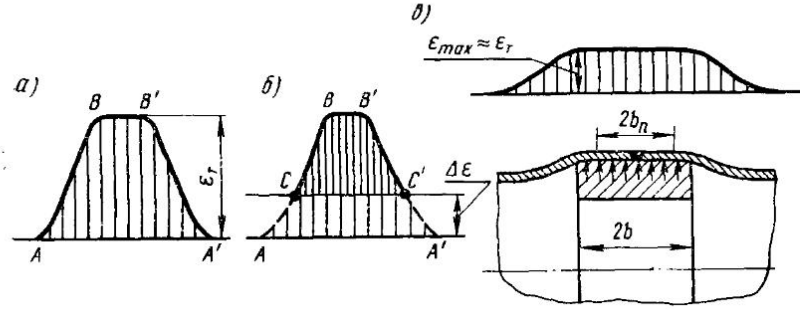


Рис. 7-8. Примеры использования метода предварительного упругого деформирования для уменьшения остаточных напряжений и перемещений

ном направлениях. В подавляющем большинстве случаев остаточные пластические деформации, вызванные сваркой, сосредоточены только в шве и околошовной зоне, т. е. на сравнительно небольшом участке шириной $2b_п$. В остальных частях сварной конструкции деформации являются упругими. Поэтому достаточно создать при прокатке пластические деформации, равные по величине, но противоположные по знаку сварочным только в зоне $2b_п$, чтобы устранить деформации во всем изделии.

Прокатка шва и околошовных зон производится стальными роликами шириной $5 \div 15$ *мм*. Она в основном устраняет деформации, вызванные продольной усадкой; удлинение металла в поперечном направлении невелико и не компенсирует поперечную усадку от сварки.

На рис. 7-9, *а, б, в, г* показано, что после прокатки остаточные напряжения растяжения σ_x могут понизиться, оказаться близкими к нулю или даже перейти в напряжения сжатия.

Величина остаточного напряжения $\sigma_{кон}$ в прокатанной зоне зависит от многих факторов. К основным из них относятся:

1) усилие при прокатке на ролики P, $кГ$;

2) диаметры роликов и ширина рабочего пояска роликов d и b, $см$;

3) толщина металла в зоне прокатки s, $см$;

4) механические свойства металла в зоне прокатки (предел текучести $\sigma_т$ и модуль упругости E), $кГ/см^2$;

5) начальные остаточные напряжения в металле перед прокаткой $\sigma_{нач}$, $кГ/см^2$;

6) жесткость прокатываемого изделия или узла.

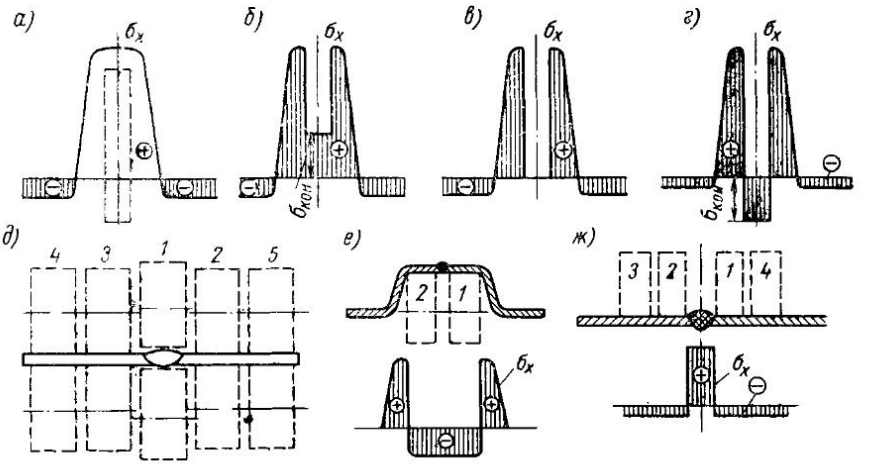


Рис. 7-9. Изменение продольных напряжений σ_x при различных приемах прокатки зоны сварного соединения

Связь между напряжениями в металле и параметрами режима прокатки узкими роликами выражается следующей формулой:

$$\frac{P^2}{b^2} = \frac{6{,}7\, ds\sigma_т\,(\sigma_{кон} - \sigma_т)^2\,(\sigma_{нач} - 1{,}5\,\sigma_{кон} + 0{,}5\sigma_т)}{E\,(0{,}7\,\sigma_т + 0{,}3\,\sigma_{нач})}. \qquad (7.6)$$

При известных параметрах режима прокатки и $\sigma_{нач}$ по формуле (7.6) можно определить остаточное напряжение после прокатки $\sigma_{кон}$. Формула (7.6) справедлива, если $\sigma_{кон} > -0{,}7\,\sigma_т$.

Экспериментально и расчетным путем показано, что для каждого металла при заданных размерах роликов и толщине металла в зоне прокатки существует определенное усилие на ролики P_0, при котором остаточные напряжения, примерно равные до прокатки пределу текучести, снижаются после прокатки до нуля. Утонение металла по толщине при этом составляет око-

ло 0,5—1%. На основании формулы (7.6), если $\sigma_{нач} \approx \sigma_т$, а $\sigma_{кон}=0$, получена формула для определения P_0

$$P_0 = b\sqrt{\frac{10{,}1\,a s z_т^3}{E}}. \qquad (7.7)$$

Вычисленное по формуле (7.7) усилие на ролики P_0 должно уточняться при исправлении конкретного изделия. Если имеются данные по оптимальным режимам прокатки конкретных сварных соединений из определенного материала, то при переходе с одного диаметра ролика d_1 на другой d_2 или при изменении толщины металла можно определить усилие по следующим формулам:

$$P_{0_2} = P_{0_1}\sqrt{\frac{d_2}{d_1}}; \qquad (7.8)$$

$$P_{0_2} = P_{0_1}\sqrt{\frac{s_2}{s_1}}, \qquad (7.9)$$

где P_{0_1} — оптимальное усилие прокатки по известному режиму.

Если ширина зоны пластических деформаций, вызванных сваркой, велика, а ролик узкий, то околошовную зону необходимо прокатывать последовательно (рис. 7-9, *д*). В случае невозможности прокатать всю зону пластических деформаций необходимо создать перекат в зоне, доступной для прокатки, назначая $P > P_0$, чтобы собственные напряжения были уравновешены в пределах узкой зоны и не передавали сжимающие усилия на остальную часть конструкции (рис. 7-9, *е*). Если в шве нежелательно снижать пластические свойства металла при прокатке, то тогда прокатывают при повышенных усилиях только околошовную зону, добиваясь устранения деформаций за счет напряжений сжатия в околошовной зоне (рис. 7-9, *ж*). Для соединений внахлестку при $s_{расч} = 2s$ прокатка может применяться и для устранения деформаций от точечных сварных соединений.

У термообработанных или наклепанных металлов после сварки предел текучести в зоне термического влияния может отличаться от исходного значения перед сваркой. Это обстоятельство необходимо учитывать при определении усилия прокатки.

Если прокатка по назначенному режиму не дает достаточного исправления, то можно производить повторную прокатку. Повторная прокатка по одному и тому же месту при неизменном усилии вызывает затухающую пластическую деформацию, составляющую не более 10—15% от деформации предыдущего пропуска. Для получения большей величины пластической деформации при повторных прокатках следует повысить усилие. Механическая правка прокаткой требует высокого качества сборки перед сваркой и определенной очередности сборки, сварки и правки. Если сварка одного из швов не нарушает качество

сборки второго, то исправление может выполняться после сварки обоих швов.

Устранение деформаций прокаткой может осуществляться на элементах толщиной до 8—12 *мм* и более. Для получения равномерной пластической деформации металла по толщине отношение $\frac{d}{s}$ не следует принимать менее $15 \div 20$. Прокатка может применяться на сталях различных классов, титановых и алюминиевых сплавах, а также на других материалах. Не рекомендуется применять прокатку конструкций из хрупких и малопластичных материалов. При наличии коррозионной среды требуется проверка влияния прокатки на коррозионную стойкость сварных соединений.

Устранение деформаций прокаткой зоны сварного соединения осуществляется на специализированном оборудовании, которое должно удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Усилие на ролики должно быть неизменным в процессе прокатки. Это достигается использованием пневматических и гидравлических цилиндров давления.

2. Привод движения при прокатке дуговых швов, имеющих неровности, должен осуществляться на оба ролика. При прокатке только околошовных зон, а также роликовых и точечных соединений внахлестку возможно применение механизмов с приводом на один ролик.

3. Поверхности цилиндрических роликов должны иметь прямолинейную образующую; края роликов на длине ~ 1 *мм* закруглены, а оси их должны быть строго параллельны.

§ 4. ОСОБЕННОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

Для уменьшения напряжений и перемещений в элементах оболочек могут использоваться почти все известные общие приемы, такие как рациональное конструирование, уменьшение погонной энергии сварки, прокатка и др. Однако в оболочках имеются специфические особенности конструктивного характера, заставляющие несколько изменять существующие приемы.

После сварки кольцевых швов стальных и титановых оболочек возникает окружное сокращение оболочки (§ 6, гл. VI).

Здесь возможно применить растяжение зоны сварного соединения перед сваркой с помощью жесткого распорного кольца (рис. 7-10, *а*). При $\sigma_{нач} \approx \sigma_т$ после сварки и удаления кольца остаточные напряжения в зоне пластических деформаций $2b_п$ будут близкими к нулю. Деформации также будут отсутствовать.

Если с помощью штамповки, экспандирования или прокатки края оболочке придать форму, соответствующую характеру и величине деформации после сварки, но с противоположным знаком (рис. 7-10, *б*), то такая предварительная пластическая деформация может оказаться достаточной для устранения перемещений. Остаточные напряжения при этом имеют примерно такое же значение, какое они имели бы после сварки без применения каких-либо специальных мер борьбы с деформациями.

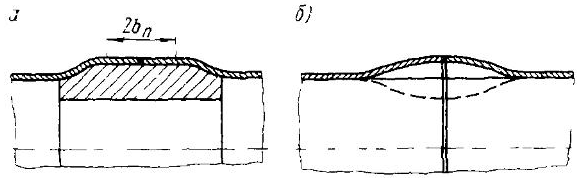


Рис. 7-10. Примеры устранения перемещений от кольцевых сварных швов в цилиндрических оболочках

В процессе сварки оболочек кромки перемещаются в радиальном направлении (рис. 7-11, *а*), при этом возможно образование их смещения в случае различной жесткости элементов (рис. 7-11, *б*). Особенно значительны перемещения в алюминие-

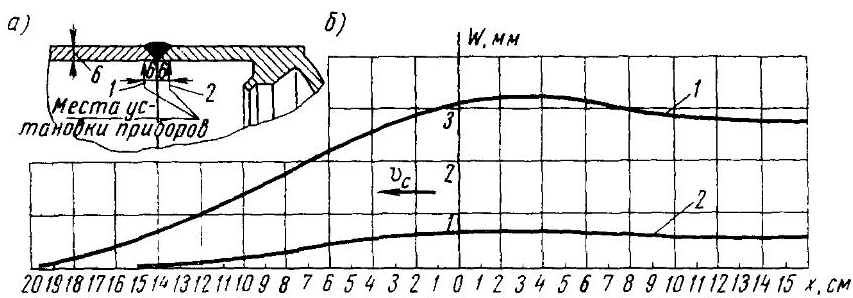


Рис. 7-11. Временные радиальные перемещения w в зоне кольцевого шва цилиндрической оболочки при различной жесткости свариваемых элементов

а) поперечное сечение оболочки и места установки приборов *1* и *2* для регистрации
б) перемещения точек *1* и *2* в процессе сварки, *x*—расстояние от шва по дуге оболочки

вых оболочках. Ввиду того, что перемещения возникают на значительном расстоянии впереди сварочного источника тепла, кромки можно прижимать к подкладному кольцу перекатывающимся роликом, расположенным перед дугой на расстоянии нескольких сантиметров. Такая схема прижатия кромок применяется в производстве.

При расположении жесткого кольца с наружной стороны и сварки с внутренней перемещения кромок возникать не будут, что предотвратит появление взаимного смещения листов

Круговые швы на сферических и цилиндрических тонкостенных оболочках вызывают существенные искажения их форм. И в этом случае создание предварительных обратных деформаций оказывается весьма эффективным. Предварительные деформации по величине и по форме должны быть равны сварочным, но иметь обратный знак. Например, если после сварки кругового шва на сфере (рис. 7-12, *а*) возникают перемещения Δ, показанные пунктирной линией *1*, то необходимо после сварки опытного узла снять профилограмму перемещений с тем, чтобы на последующих изделиях создать путем штамповки предварительные деформации противоположного знака, показанные штрих-пунктирной линией *2*. Фланец также необходимо сместить на величину — Δ.

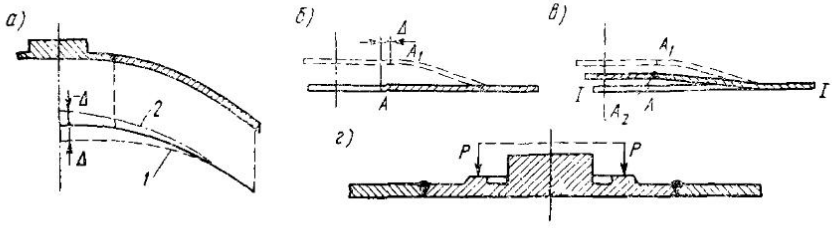


Рис. 7-12. Примеры устранения перемещений, вызываемых круговыми сварными швами

Предварительные перемещения должны создаваться в заготовках благодаря остаточным пластическим деформациям; если они созданы упругим деформированием с помощью приспособлений, устранение деформаций будет лишь частичное. С помощью указанного приема можно устранять перемещения и от круговых швов на цилиндрических оболочках, однако ввиду сложности формы перемещений требуется изготовление специальной оснастки для штамповки.

Предварительные перемещения не устраняют остаточных напряжений, а позволяют ликвидировать лишь искажения формы. Поэтому, если возникающие после сварки перемещения являются результатом потери устойчивости от остаточных напряжений, то устранить их предварительным деформированием не удается. В таких случаях необходимо устранять остаточные напряжения. Типичным примером в этом отношении является круговой шов на плоскости, когда сжимающие напряжения σ_t вызывают коробление листа. Прокатка зоны кругового шва по окружности вследствие недостаточного удлинения металла в радиальном направлении при прокатке не позволяет, как правило, устранить растягивающие напряжения σ_r, а следовательно, и σ_t. Здесь может оказаться эффективным прием, сочетающий пред-

варительную и последующую штамповку (рис. 7-12, *б, в*). Если перед сваркой создать осесимметричную пластическую деформацию листа так, чтобы он переместился из плоскости (рис. 7-12, *б*), то точка A перейдет в положение A_1 с некоторым радиальным перемещением Δ. После сварки вследствие усадки часть предварительного перемещения израсходуется (положение A_2 на рис. 7-12, *в*), но сохранится некоторое перемещение листа по отношению к плоскости. Для устранения остаточных напряжений, а также деформаций потери устойчивости, достаточно осадить фланец вместе с листом из положения A_2 в плоскость *I—I*. Такая операция компенсирует остаточную поперечную усадку и устранит растягивающие радиальные напряжения.

Радиальные и тангенциальные напряжения можно устранить, если при изготовлении фланца предусмотреть утолщение в виде пояска (рис. 7-12, *г*). После сварки указанное утолщение осаживается на прессе одновременно по всей окружности, в результате чего возникает радиальное перемещение, достаточное для снижения остаточных напряжений и устранения потери устойчивости листа.

ГЛАВА VIII

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МЕТОДЫ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

Технологической прочностью называется прочность сварных соединений в процессе сварки, остывания и некоторого вылеживания без существенных внешних нагрузок. Технологическую прочность часто определяют сопротивляемостью к образованию в сварных соединениях горячих (кристаллизационных) и холодных трещин.

§ 1. ОБРАЗОВАНИЕ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ГОРЯЧИХ (КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ) ТРЕЩИН

Экспериментально установлено, что при повышении температуры T пределы прочности и текучести металлов понижаются. Изменение пластических свойств от температуры происходит по более сложной зависимости. Нередко в некотором диапазоне температур наблюдаются резкие уменьшения пластичности (ее провалы), а при дальнейшем повышении температуры (T) пластические свойства снова улучшаются. Предел выносливости, как правило, понижается с повышением температуры, но в некоторых быстро стареющих сплавах наблюдается обратное явление, т. е. с повышением температуры предел выносливости возрастает до некоторой величины, а затем уменьшается. При высоких T (1100° С и выше) пределы прочности сталей резко падают и приближаются в ряде случаев скачкообразно к нулю в зоне температур солидуса. Пластические свойства сталей при высоких T меняются различным образом. Однако все они обладают одним общим свойством. При приближении температуры к температуре солидуса ($T_{сол}$) пластические свойства очень резко снижаются.

На рис. 8-1 приведены результаты исследований изменений пластических свойств — коэффициентов поперечного сужения при разрыве — в функции от температуры испытания. Все кривые возле соответствующей $T_{сол}$ резко обрываются.

Значительное снижение пластических свойств в зоне $T_{сол}$ свойственно всем сталям и цветным сплавам, однако в неодинаковой степени. Это является важным фактором при оценке прочности соединений в процессе их сварки. Пластические свойства металла при температуре солидуса не связаны с величиной пластичности при комнатных и высоких температурах. В некоторых случаях сплавы, обладающие очень высокими пластическими свойствами при обычных и повышенных температурах, например аустенитные стали, имеют очень малую пластичность при $T_{сол}$.

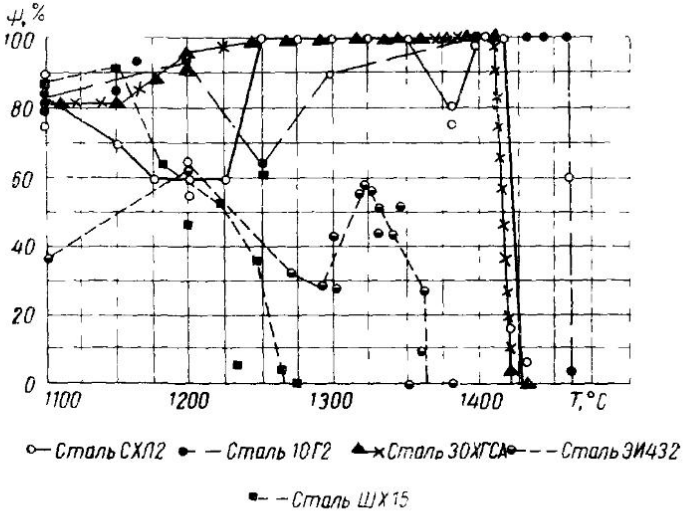


Рис 8-1. Пластические свойства сталей при высоких температурах (коэффициент ψ)

В конструкциях из углеродистых, низко- и высоколегированных сталей, а также цветных сплавов, в процессе сварки иногда образуются горячие (кристаллизационные) трещины. Они возникают в температурном интервале хрупкости вблизи $T = T_{сол}$.

Кристаллизационные трещины в наплавленном металле швов бывают открытыми и скрытыми, нередко распространяясь от корня шва (стыкового или углового), недостаточный провар которого способствует образованию этих трещин. Они встречаются иногда в бездефектных швах с высокими пластическими свойствами при комнатных температурах. Однако более часто трещины появляются в швах, обладающих дефектами, и имеют различную ширину, глубину и протяженность. Иногда они видимы лишь под микроскопом, ширина их измеряется микронами, но

в большинстве случаев они легко обнаруживаются невооруженным глазом и имеют ширину десятых долей миллиметров.

Образовавшиеся горячие трещины являются концентраторами напряжений и под влиянием внешних нагрузок могут постепенно раскрываться. Это происходит большей частью при действии на конструкцию переменных нагрузок, а также при низких температурах. Имеются примеры, когда наличие кристаллизационных трещин приводило к разрушению конструкций, работающих под динамическими нагрузками, например, судов, подкрановых балок, резервуаров и цистерн, эксплуатируемых на открытом воздухе при морозе.

Образование этих трещин определяется тремя основными факторами: 1) продолжительностью периода кристаллизации; чем продолжительнее ее период, тем более вероятно образование горячих трещин; 2) пластическими свойствами самого металла в интервале кристаллизации, зависящими от его состава; 3) от скорости деформации шва при остывании; чем больше скорость деформации, тем более вероятно образование трещин.

Важным фактором является жесткость конструкций. Таким образом, сопротивляемость образованию горячих трещин значительно изменяется в зависимости от типов сварных соединений.

Наибольшей сопротивляемостью трещинообразованию обладают швы, наплавленные на кромку или плоскость пластин (тип *1—3* на рис. 8-2). Сопротивляемость образованию трещин несколько понижается в соединениях, сваренных угловыми и стыковыми швами (типы *4—6*). Наименьшей сопротивляемостью кристаллизационным трещинам обладают соединения внахлестку и крестовые (типы *7—10*). По оси ординат диаграммы на рис. 8-2 отложен условный коэффициент A *мм/мин*, характеризующий склонность к трещинообразованию в зоне температур солидуса. Чем ниже располагаются незалитые точки на рис. 8-2, тем меньше склонность соединения к образованию горячих трещин при сварке.

§ 2. ОБРАЗОВАНИЕ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН

Нередки случаи образования трещин в процессе остывания сварных швов при температурах T, более низких, чем $T_{сол}$, после полного остывания, а иногда и в течение некоторого периода вылеживания. Такие трещины, образуемые в большинстве случаев в околошовных зонах сварных соединений, условно называют *холодными*.

Холодные трещины возникают в различных участках соединений: на границе сплавления присадочного и основного металла, где он нагревался выше $T_{сол}$, но ниже температуры ликвиду-

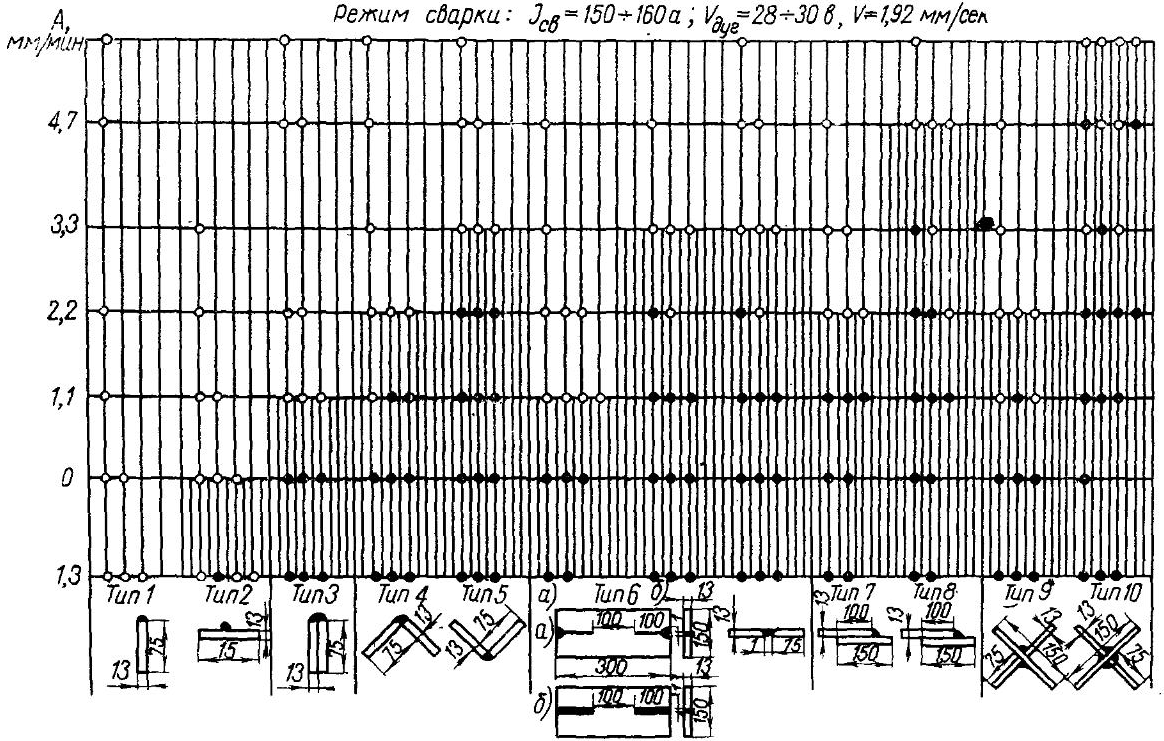


Рис. 8-2. Данные о сопротивляемости образованию горячих трещин различных видов сварных соединений из стали Ст. 3:

чем ниже располагаются незалитые кружки, тем больше сопротивляемость соединения к трещинообразованию при сварке

са $T_{ликв}$; в этой зоне часто имеет место химическая неоднородность; на участке перегрева, характеризуемого крупнозернистой структурой; на участке полной перекристаллизации, где температура ниже температуры начала фазовых превращений при остывании; частичной перекристаллизации при температуре выше конца фазового превращения при остывании; в зоне рекристаллизации, или старения, где металл, свариваемый в нагартованном или термообработанном состоянии, разупрочняется. На этом участке вследствие старения возможно уменьшение его ударной вязкости.

Основной причиной образования холодных трещин в сварных соединениях является недостаточная пластичность металла, особенно на границах зерен. Этому способствует напряженное состояние, возникающее в результате фазовых и структурных превращений в металле.

Нередко холодные трещины образуются в соединениях средне- и высоколегированных сталей мартенситного и перлитного классов, подвергающихся закалке. Поэтому эти трещины иногда называются *закалочными*. Трещины возникают в процессе распада аустенита, а также нередко в течение длительного промежутка времени после полного остывания изделия. Холодные трещины возникают между зернами и по телу зерен, а располагаются вдоль швов и перпендикулярно им. Скорость их распространения различна.

В сварных соединениях из некоторых сталей при сварке образуются замедленные разрушения, в частности в сталях мартенситного класса ВКС1, ВЛ1Д, СП43 и т. д. Прочностные свойства резко ухудшаются после сварки в течение некоторого периода времени, а впоследствии они снова восстанавливаются. Пределы прочности сварных соединений после сварки уменьшаются и составляют 25—30% от $\sigma_в$ основного металла, а с течением времени поднимаются до 60—70%. В моменты резкого ухудшения механических свойств по границам зерен происходит разрушение.

Ухудшение свойств объясняется образованием метастабильных структур в углеродистых и легированных сталях. На образование холодных трещин влияет водород, с увеличением содержания которого падает поверхностная энергия и понижается сопротивляемость металла распространению трещин. Водород снижает температуру конца фазовых превращений при остывании.

Само по себе насыщение металла водородом вредно отражается на пластических свойствах соединения.

На рис. 8-3 изображены результаты испытания на прочность наплавленных образцов из стали 30ХН2МФА. По оси абсцисс отложено время испытаний, т. е. продолжительность нахождения испытуемого таврового образца толщиной 12 *мм* под нагруз-

кой, по оси ординат — разрушающие напряжения. Кривая *1* соответствует результатам, полученным непосредственно после сварки, кривая *2*,— спустя трое суток после окончания сварочного процесса. Из приведенных данных следует, что в течение трех суток наступает значительное улучшение прочностных свойств главным образом по границам зерен, при этом $\sigma_в$ достигает 80 *кГ/мм²*. При испытании тех же образцов непосредственно после сварки их прочность резко падает. Испытания под нагрузкой производятся в течение нескольких часов.

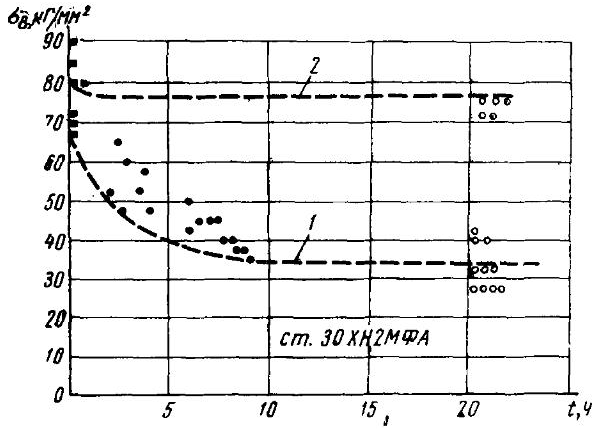


Рис. 8-3. Величины напряжений в образцах при замедленных разрушениях в функции продолжительности приложения растягивающих усилий

На рис. 8-4 представлены пределы прочности образцов толщиной 3 *мм*, со швами, полученными проплавлением вольфрамовым электродом. В одних образцах швы направлены вдоль усилий, в других — поперек. Испытывались следующие стали: 4Х13 — с пределом прочности 160 *кГ/мм²*; 2Х13 — 140 *кГ/мм²*; СП-43 — 160 *кГ/мм²*, СП-28 — 130 *кГ/мм²*; ВКС-1 — 140 *кГ/мм²*; ВЛ1-Д — 120 *кГ/мм²*.

Как видно из рис. 8-4, наиболее резко падает разрушающее напряжение у высокопрочной стали 4Х13, менее резко — у стали ВЛ1-Д. Во всех случаях при расположении швов перпендикулярно усилиям особенно проявляется ухудшение свойств.

Большое влияние на образование холодных трещин в конструкциях при замедленных разрушениях оказывает форма сварных конструкций и характер закреплений. Чем больше жесткость закреплений, тем более вероятно образование холодных трещин.

Для устранения холодных трещин следует правильно назначать содержание легирующих добавок, подбирать рациональные режимы, уменьшать жесткость, проводить термообработку изделий в ближайшие часы после сварки.

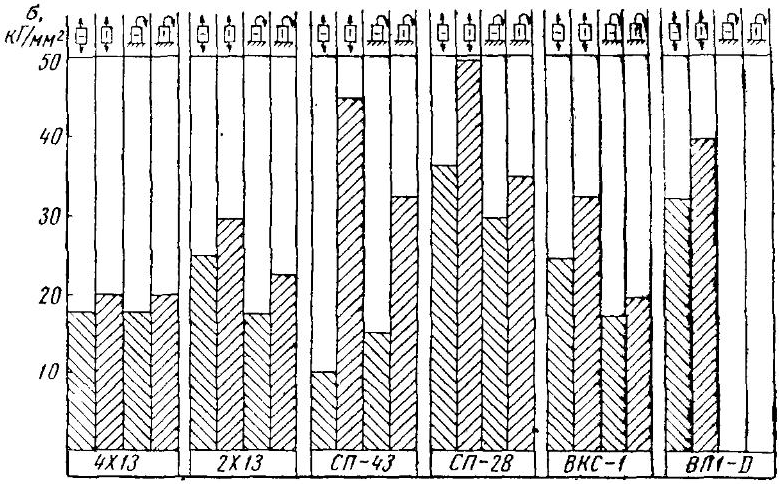


Рис. 8-4. Величины разрушающих напряжений в образцах из различных сталей после сварки в функции от расположения шва к растягивающим напряжениям

ГЛАВА IX

СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Прочность твердых тел является результатом наличия сил взаимодействия между частицами, из которых состоит тело. В инженерной практике под прочностью материалов понимают их способность сопротивляться разрушению, а в более широком смысле и способность сопротивляться наступлению пластической деформации. Количественно прочность оценивают напряжениями, при которых наступает разрушение материала. «Теоретическая» прочность, вычисленная в предположении одновременного мгновенного разрыва частиц тела, в десятки и сотни раз выше реальной прочности поликристаллических тел, какими являются большинство металлов. В действительности нарушение связей идет постепенно и разрыв частиц происходит неодновременно, поэтому прочность не только является свойством материала, но и зависит от размеров и формы образца, а также от свойств и действия нагружающего устройства.

На рис. 9-1, *а* показана диаграмма зависимости условных напряжений от удлинений при одноосном медленном растяжении образца из низкоуглеродистой стали. Распространена оценка прочности материала по так называемому пределу прочности (временному сопротивлению)

$$\sigma_в = \frac{P_{max}}{F_0},$$

где P_{max} — максимальная нагрузка, достигаемая при нагружении (точка B);

F_0 — площадь поперечного сечения образца перед испытанием.

На самом деле после начала образования шейки в точке B протекает еще значительная деформация и разрушение металла происходит в точке Z.

Предел прочности $\sigma_в$ является условной величиной.

Истинное напряжение $\sigma_д$ (рис. 9-1, *б*), которое вычисляется, как отношение усилия к действительному сечению образца, является характеристикой, более точно выражающей напряженность в зависимости от действительной деформации металла. Величина напряжений в точке *B*, соответствующая пределу прочности, существенно меньше истинного разрушающего напряжения $\sigma_{др}$ в точке *Z*. Величина деформации $\varepsilon_{др}$ к моменту достижения истинного разрушающего напряжения $\sigma_{др}$ зависит от скорости нагружения v_1. С возрастанием скорости v_2 деформация $\varepsilon_{др}$ уменьшается (рис. 9-1, *б*).

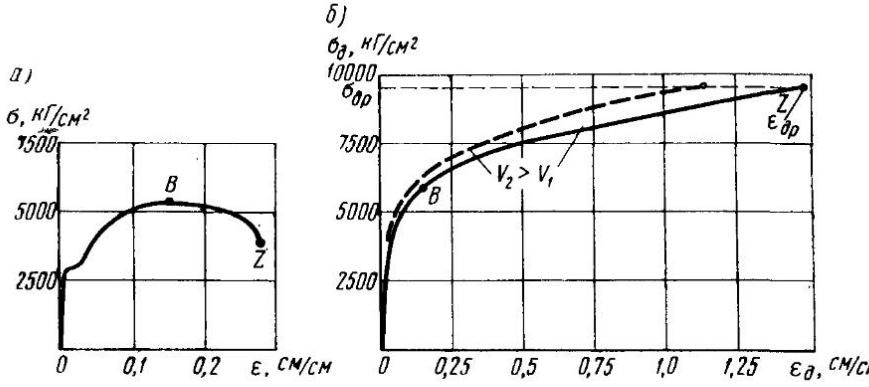


Рис. 9-1. Условная (*а*) и действительная (*б*) диаграммы растяжения для стали 30:

$\sigma_{др}$ и $\varepsilon_{др}$ — истинные напряжение и деформация в момент разрушения

Величина относительной деформации металла, достигаемая к моменту разрушения $\varepsilon_{др}$, зависит не только от свойств материала и скорости нагружения, но и от схемы напряженного состояния (двухосное, трехосное). Более жестким схемам напряженного состояния, как правило, соответствуют меньшие значения $\varepsilon_{др}$ (рис. 9-2, *а*). При трехосном равномерном растяжении следует ожидать разрушение без протекания пластической деформации (рис. 9-2, *а*).

В зависимости от свойств, выявляемых при одноосном растяжении и температуре +20° С, материалы условно подразделяют на весьма пластичные (свинец, отожженная медь), пластичные (низкоуглеродистые стали), хрупко-пластичные (закаленные углеродистые стали), хрупкие (серый чугун) и весьма хрупкие (белый чугун, керамики) (рис. 9-2, *б*). В основу этой классификации положена величина упруго-пластической деформации до разрушения.

Свойства материалов различны при различных температурах. С понижением температуры у перлитных сталей увеличивается предел текучести, возрастает сопротивление отрыву, уменьшается упруго-пластическая деформация до разрушения. Аустенитные стали, алюминиевые и титановые сплавы слабее реагируют на понижение температуры (см. табл. 9.1).

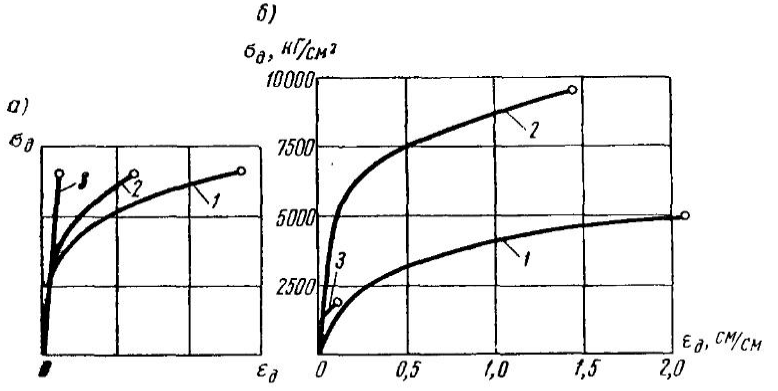


Рис. 9-2. Действительные характеристики:

а) при различных схемах напряженного состояния (*1* — одноосное; *2* — трехосное с неравными компонентами; *3* — трехосное растяжение с равными компонентами); *б)* для различных металлов (*1* — отожженная медь; *2* — сталь 30; *3* — литейный чугун)

Таблица 9.1

Механические свойства некоторых сплавов при +20° С и —70° С

Наименование сплава	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, кГ/мм²		Относительное удлинение δ_5, %	
	+20°С	—70°С	+20°С	—70°С
Сталь 25 (нормализация с 900° С)	29	44	29	25
Аустенитная сталь Х18Н9Т (закалка с 1050° С в воду)	25	28	42	37
Алюминиевый сплав АМг-5 (отожженный) . .	17	18	21	24
Титановый сплав ОТ4 (отожженный)	64	80	13	13

При наличии концентраторов характер разрушения — вязкий или хрупкий — может не соответствовать характеристике свойств металла, устанавливаемой по его пластичности. Например, низкоуглеродистые стали при температурах —40 —60° С при одноосном растяжении ведут себя как пластичные металлы. Однако

в зоне острых концентраторов участок металла, соответствующий началу разрушения, имеет при этих температурах хрупкий излом. Следует подчеркнуть, что разрушению металлов всегда предшествует пластическая деформация, и в этом смысле деление разрушений на вязкие и хрупкие является условным.

При рассмотрении статической прочности внимание в основном должно быть сосредоточено на первой стадии разрушения — стадии упруго-пластической деформации металла и перехода к зарождению трещины. Распространение трещины обычно сопровождается динамическими эффектами и рассмотрено в главе XI.

Развитие упруго-пластических деформаций металла в концентраторе отличается от деформаций металла в зонах сечения, удаленных от концентратора. Во-первых, в зоне концентратора рост деформации по мере увеличения нагрузки опережает рост деформации вне зоны концентратора. Это вызывает значительное возрастание напряжений в зоне концентратора по сравнению со средними (рис. 9-3). Во-вторых, объемный характер поля напряжений в зоне концентратора затрудняет протекание пластических деформаций. Поэтому при прочих равных условиях одинаковым деформациям в сечении будут соответствовать более высокие значения напряжений в зоне концентратора. Это приводит к тому, что разрушающие значения напряжений достигаются в концентраторе значительно раньше, чем в средней части сечения (рис. 9-3). Например, при испытании на растяжение образцов с надрезами (рис. 9-3) из низкоуглеродистой стали 22К при $T=-60°$ С разрушение наступило, когда средняя деформация образца была менее 2%, в то время как действительная деформация разрушения гладкого образца у этой стали при $T=-60°$ С составляет 150%, среднее напряжение по оси образца — около 37 *кГ/мм²* при истинном разрушающем напряжении 105 *кГ/мм²*.

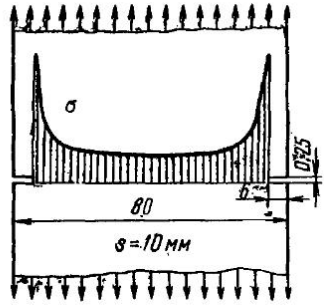


Рис. 9-3. Концентрация напряжений в пластине с надрезами

С увеличением коэффициента концентрации величины средних деформаций и напряжений, достигаемые к моменту разрушения металла, уменьшаются. В особенности резким будет уменьшение, когда $\sigma_{ср}$ понизится до величины предела текучести. В этом случае незначительное дальнейшее уменьшение средних деформаций приводит к значительному падению средних разрушающих напряжений. С понижением температуры в надрезанных образцах из низкоуглеродистых и низколегиро-

ванных сталей средняя упруго-пластическая деформация $\varepsilon_{ср}$ непрерывно уменьшается (рис. 9-4, *а*), в то время как среднее напряжение $\sigma_{ср}$ даже возрастает (рис. 9-4, *б*), что объясняется повышением предела текучести и истинного разрушающего напряжения по мере снижения температуры. Однако, когда $\varepsilon_{ср}$ достигает величины $\varepsilon_т$, происходит падение и средних напряжений $\sigma_{ср}$ (рис. 9-4, *б*).

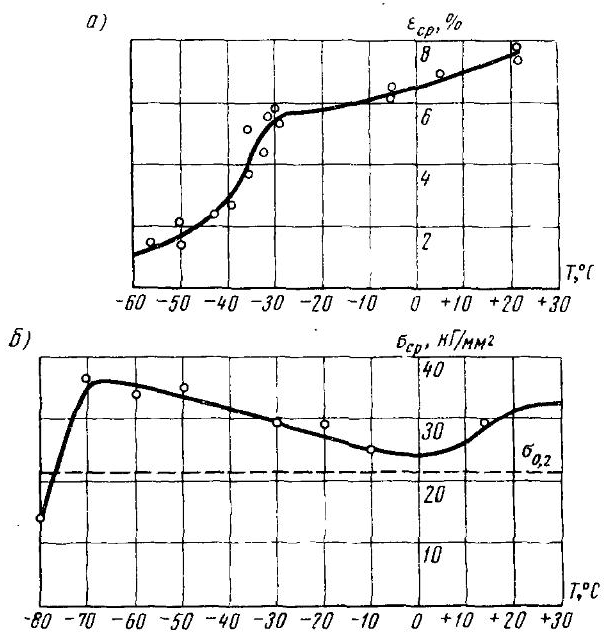


Рис. 9-4. Изменение средней деформации до разрушения $\varepsilon_{ср}$ надрезанных образцов из стали 22К (*а*) и среднего напряжения разрушения $\sigma_{ср}$ в надрезанных образцах из стали Ст. 3кп (*б*) с понижением температуры

Свойства материалов могут быть существенно изменены термической обработкой. Общая тенденция заключается в том, что с повышением предела текучести и предела прочности пластичность материалов понижается (табл. 9.2).

Специальные методы термомеханической обработки позволяют повысить прочностные показатели без снижения пластичности. Термическая обработка — закалка с последующим отпуском — положительно влияет также на сопротивляемость металла разрушению при наличии концентраторов напряжений и низких температурах.

Таблица 9.2

Механические свойства металлов при различных видах термообработки

Металл	Предел текучести $\sigma_т$, кГ/мм²	Предел прочности $\sigma_в$, кГ/мм²	Относительное удлинение δ_5, %	Коэффициент поперечного сужения ψ, %
МСт. 3 в состоянии поставки	29,3	45,5	36,7	65,9
МСт. 3 после закалки и низкотемпературного отпуска	53,2	75,2	17,8	54,7
Сталь 30ХГСА в отожженном состоянии . . .	47	64	30	—
Сталь 30ХГСА после закалки и отпуска при 520° С	85	110	10	45
Металл шва оптимального химического состава при автоматической сварке низкоуглеродистой стали под флюсом без термообработки	31,4	46,3	25,5	64,2
То же, после отпуска при 650° С	25,7	43,3	33,1	69,9
То же, после закалки с 930° С	34,9	54,2	24,4	—

§ 2. ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Наиболее характерной особенностью соединений, выполненных сваркой плавлением, является наличие зон с различными механическими свойствами. Металл шва имеет литую структуру. В общем случае его свойства зависят от химического состава металла, получающегося в результате смешивания основного металла с наплавленным, скорости охлаждения, характера кристаллизации, насыщенности газами, а также от величины и распределения различных несовершенств в металле литой структуры: мелких неметаллических включений, микропор, микротрещин, ликваций и др. Более крупные несплошности, такие как шлаковые включения, поры, трещины, несплавления, относят не к дефектам структуры, а к дефектам соединения.

К шву примыкает ряд зон, свойства и протяженность которых в каждом конкретном случае зависят от марки металла, исходного структурного состояния, теплового режима сварки, определяющего ширину зон, длительность пребывания металла при высоких температурах и скорость его охлаждения. Ввиду многообразия свариваемых материалов не представляется возможным дать общую характеристику свойств этих зон.

Свойства стыковых сварных соединений, выявляемые статическими испытаниями на растяжение поперек шва, вдоль шва или одновременно в двух направлениях, зависят от механических свойств отдельных зон, их сочетания и размеров.

При испытании поперек шва в большинстве случаев прочность сварного соединения определяется свойствами наименее прочной зоны с пониженным значением предела текучести $\sigma_т$ и временного сопротивления $\sigma_в$. В ней в первую очередь начинается пластическая деформация, возникает утонение, а затем и разрушение.

На рис. 9-5 показано распределение твердости в сварном соединении из нагартованного сплава АМг-6, $s=2{,}8$ *мм*. Нагрев при сварке вызвал разупрочнение металла в околошовной зоне шириной до 16—18 *мм*. Соответственно понизились предел текучести и предел прочности. Аналогичные явления наблюдаются в других нагартованных металлах, а также в металлах, поступающих на сварку в термически упрочненном состоянии. В табл. 9.3 приведены размеры зон разупрочнения и изменение механических свойств в нагартованных металлах. Понижение прочности сопровождается увеличением пластичности металла.

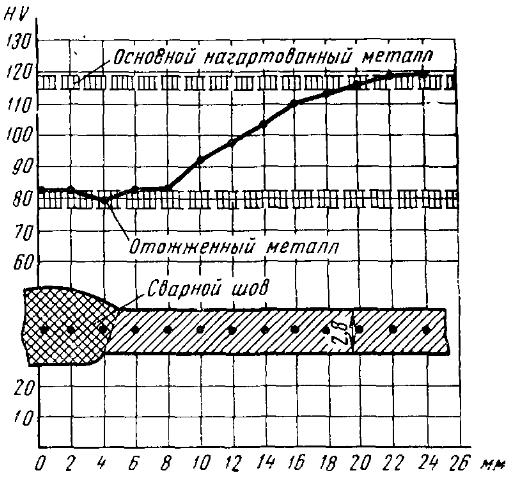


Рис. 9-5. Распределение твердости по Виккерсу в сварном соединении из нагартованного сплава АМг6 при $s=2{,}8$ *мм*

Если зона (прослойка) с низким пределом текучести имеет небольшую относительную ширину h/s (где h — абсолютная ширина прослойки) (рис. 9-6), то после протекания некоторой пластической деформации в ней возникает объемное напряженное состояние, препятствующее дальнейшей деформации. Пластическая деформация охватывает соседние более прочные зоны и разрушение в этом случае происходит при $\sigma > \sigma_{в.\,пр}$ ($\sigma_{в.\,пр}$ — временное сопротивление металла прослойки). Усилие, разрушающее образец из сварного соединения, в этом случае возрастает. Объясняется это тем, что разрушающее усилие $P_{разр}$ примерно равно произведению истинного разрушающего напряжения $\sigma_{др}$ на сечение образца в зоне утонения в момент разрушения $F_у$

$$P_{разр} = \sigma_{др} F_у.$$

Если каким-либо образом достигается увеличение $F_у$ к моменту разрушения, то возрастает $P_{разр}$; $\sigma_{др}$, разумеется, остается

Таблица 9.3

Изменение свойств нагартованного металла в сварных стыковых соединениях

Металл	Половина ширины зоны разупрочнения в сварном соединении при толщине металла s мм, мм	Основной металл в нагартованном состоянии		Сварное соединение в зоне разупрочнения	
		$\sigma_в$, кГ/мм²	угол загиба α, град	$\sigma'_в$, кГ/мм²	угол загиба α', град
Алюминиевый сплав АМг-6, $s=2{,}8$ мм; автоматическая аргонодуговая сварка	16–18	41	35	34	150
Сталь 1Х18Н9Т, $s=3$ мм; автоматическая сварка под флюсом	12—14	110	—	55	—

неизменным. В данном случае F_y возрастает из-за препятствия деформации со стороны более прочных зон. При весьма малых значениях h/s разрушение может произойти в более прочном основном металле, находящемся за пределами зоны термического влияния. На рис. 9-6 показан характер зависимости $\sigma_в$, величины пластического удлинения образца Δ и поперечного сужения ψ от относительной ширины прослойки h/s.

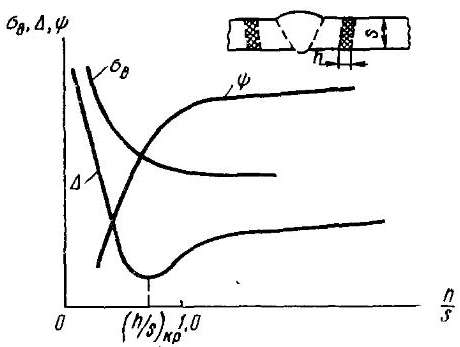


Рис. 9-6. Зависимость $\sigma_в$, Δ и ψ от относительной толщины h/s мягкой прослойки

Более прочные, но менее пластичные прослойки при испытании поперек шва могут не проявить своей низкой пластичности благодаря пластической деформации соседних зон с более низким $\sigma_т$.

Характеристика свойств сварного соединения может коренным образом изменяться при растяжении образца вдоль шва. В этом случае деформация всех зон в продольном направлении одинакова, в то время как рост напряжений в отдельных зонах происходит в соответствии с диаграммами $\sigma_1=f(\varepsilon_1)$ для металла каждой зоны (рис. 9-7). В более прочных зонах напряжения

будут выше. Момент разрушения зависит от деформационной способности наименее пластичной зоны. При низкой пластичности отдельных зон разрушение может произойти при низких средних напряжениях, так как деформации пластичных зон к моменту разрушения будут невелики, а следовательно, окажутся менее значительными и напряжения в них. Аналогичные явления наблюдаются и при двухосном растяжении.

Неоднородность в механических свойствах различных зон приводит к снижению прочности и пластичности стыковых сварных соединений. Например, при испытании сварных стыковых соединений из высокопрочных сталей, как правило, обнаруживается, что при одноосном растяжении поперек шва сварные стыковые соединения примерно равнопрочны основному металлу, а при двухосном растяжении вследствие пониженной пластичности металла шва имеет место некоторое снижение пластичности и прочности (табл. 9.4).

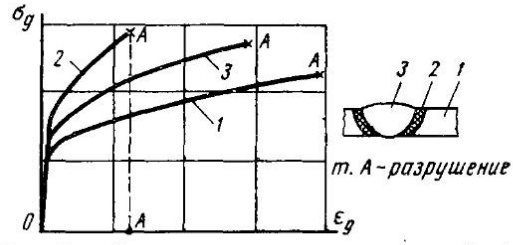


Рис. 9-7. Диаграммы зависимости $\sigma_д = f(\varepsilon_д)$ в различных зонах сварного соединения при растяжении вдоль шва:

1 — основной металл; *2* — зона термического влияния; *3* — шов

При испытании на угол загиба образцов, вырезанных поперек шва, пластическая деформация сосредоточивается в зонах с более низким $\sigma_т$, т. е. в зонах, где пластичность, как правило, выше. Это искажает результаты испытаний. Испытания на угол загиба образцов, вырезанных вдоль шва, дают обычно более низкие показатели пластичности, так как она определяется в основном свойствами наименее пластичной зоны. Степень неоднородности свойств отдельных зон, как указывалось выше, зависит от основного материала, способа сварки и качества защиты нагретого металла от воздуха.

Характеристиками механических свойств сварных швов и соединений при их работе под статической нагрузкой в соответствии с ГОСТом являются: предел прочности $\sigma'_в$, предел текучести $\sigma'_т$, относительное удлинение при разрыве δ', коэффициент поперечного сужения ψ', угол загиба α'. Испытания проводятся согласно ГОСТ 6996 — 66.

Определение предела прочности металла шва при разрыве производится на круглых выточенных образцах длиной $l = 18, 36, 60$ *мм* и т. д., разных диаметров $d_0 = 3, 6, 10$ *мм* и т. д. На рис. 9-8, *а* приведен пример одного из образцов. На таких же образцах находится величина предела текучести $\sigma'_т$, относитель-

Таблица 9.4

Механические свойства основного металла и сварных соединений высокопрочных сталей при двухосном растяжении

Материал, вид сварки и термообработка	$\sigma_{в_2}$, кГ/мм²	$\sigma'_{в_2}$ кГ/мм²	ε_i разр	ε'_i разр	$\sigma_{др}$, кГ/мм²	$\sigma'_{др}$, кГ/мм²
Сталь СП-28, s = =2,5 *мм*, аргонодуговая сварка, 1-й слой без присадки, 2-й слой с присадкой 18ХМА, закалка с 940° С (30 *мин*) в масло, отпуск с 320° С 1,5 *ч*, охлаждение на воздухе	168÷172	170	0,25	0,105÷0,21	194	186÷192
Сталь СП-43, s = =2,2 *мм*, аргонодуговая однопроходная сварка без присадки, закалка с 950° С (10 *мин*) на воздухе, отпуск 300° С 4 *ч*, охлаждение на воздухе	197÷199	198	0,29	0,2÷0,25	234	226÷231

Примечание: $\sigma_{в_2}$ и $\sigma'_{в_2}$ — временное сопротивление при двухосном растяжении;

ε_i разр и ε'_i разр — эквивалентная деформация металла в момент разрушения при двухосном растяжении;

$\sigma_{др}$ и $\sigma'_{др}$ — действительное напряжение в металле в момент разрушения при двухосном растяжении.

ного удлинения шва при разрыве δ' и коэффициента ψ'. В отдельных случаях вместо условного предела текучести $\sigma_т$ находят напряжение, вызывающее заданную относительную остаточную деформацию ε'.

Определение предела прочности сварного соединения производят на образцах, изображенных на рис. 9-8, *б*. Для толщины $s=10\div 25$ *мм*, $b=25$ *мм*, $b_1=30$ *мм*, длина $l=100$ *мм*, величина h зависит от конструкции испытательной машины.

Для низкоуглеродистых и ряда низколегированных сталей современные способы ручной и автоматизированной сварки практически обеспечивают равнопрочность сварного соединения основному металлу при пластичности металла, не уступающей исходным показателям. Для углеродистых и ряда низколегированных сталей предел прочности металла сварных швов соединений встык $\sigma'_в$, как правило, не ниже предела прочности основного металла элемента $\sigma_в$. Модуль упругости наплавленного металла шва незначительно отличается от модуля упругости основного металла. В табл. 9.5 в качестве примера приведены

механические свойства исходного металла и свойства металла швов, получаемых при сварке стыковых соединений. В табл. 9.6 согласно ГОСТ 9467 — 60 приведены механические свойства металла шва, получаемого при применении соответствующих типов электродов, а также механические свойства стыковых соединений, сваренных этими электродами.

Высокие механические свойства могут быть получены при сварке высокопрочных сталей с пределом прочности более 100—120 *кГ/мм²*. Однако при этом, как правило, необходима последующая термическая обработка. При сварке термически упрочненных сталей образуется зона высокого отпуска с пониженным пределом текучести, в то время как сам шов и примыкающая к нему зона после сварки находятся в закаленном состоянии. Если зона разупрочнения в этом случае незначительна по ширине или понижение прочности несущественно, то достаточно сварной конструкции дать

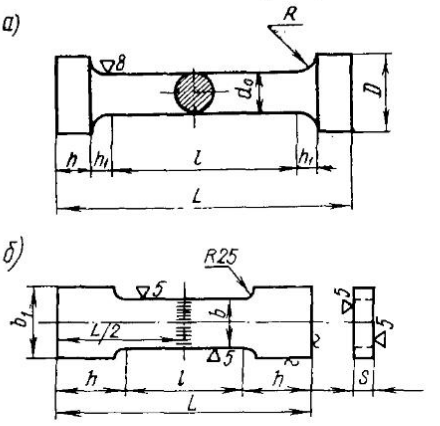


Рис. 9-8. Образцы для испытаний на растяжение:

а) из наплавленного металла; *б*) из сварного соединения

Таблица 9.5

Свойства исходного металла и металла швов в стыковых сварных соединениях

Металл или сварное соединение	Предел текучести $\sigma_т$, *кГ/мм²*	Предел прочности $\sigma_в$, *кГ/мм²*	Относительное удлинение δ_5, %	Коэффициент поперечного сужения ψ, %
МСт.3 в состоянии поставки, образцы Ø6 *мм*	29,3	45,5	36,7	65,9
Сварное соединение на стали МСт.3 под керамическим флюсом К-14, сварка в три слоя, $s=13$ *мм*, образцы Ø6 *мм* вырезаны поперек шва	32,4	47,0	22,1	62,1
Сталь 15ХСНД в состоянии поставки (без термообработки)	35	50	21	—
Металл шва, полученный при автоматической сварке в среде углекислого газа пластин из стали 15ХСНД, $s=14$ *мм*	46,0	65,0	22,2	—

Таблица 9.6

Механические свойства наплавленного металла и стыковых сварных соединений

Тип электрода	Механические свойства металла шва или наплавленного металла при применении электродов диаметром более 2,5 *мм*			Механические свойства сварного соединения при применении электродов диаметром 2,5 *мм* и менее	
	временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, *кГ/мм²*	относительное удлинение δ, %	ударная вязкость $a_н$, *кГ · м/см²*	временное сопротивление разрыву $\sigma'_в$, *кГ/мм²*	угол загиба α', *град*
	не менее			не менее	
Э34	34	—	—	34	30
Э42	42	18	8,0	42	120
Э42А	42	22	14,0	42	180
Э46	46	18	8,0	46	120
Э46А	46	22	14,0	46	150
Э50	50	16	6,0	50	90
Э50А	50	20	13,0	50	150
Э55	55	20	12,0	55	140
Э60	60	16	6,0	—	—
360А	60	18	10,0	—	—
370	70	12	6,0	—	—
Э85	85	12	5,0	—	—
Э100	100	10	5,0	—	—
Э125	125	6	4,0	—	—
Э145	145	5	4,0	—	—

Примечание. Для электродов типов Э85, Э100, Э125, Э145 механические свойства указаны после термической обработки.

отпуск для смягчения закалочных структур и повышения пластичности в шве и околошовной зоне. Нередко необходимо иметь равнопрочное сварное соединение, что достигается обычно закалкой после сварки и последующим отпуском. В этом случае целесообразно производить сварку металла в отпущенном или отожженном состоянии, так как предварительные механические операции резки, гибки, зачистки легче производить на более мягком металле. Данные, приведенные в табл. 9.4, свидетельствуют о том, что современные способы сварки обеспечивают достаточно высокую прочность сварных соединений из высокопрочных сталей.

В настоящее время сваривается большинство алюминиевых сплавов, однако механические свойства сварных соединений в зависимости от способа сварки и характера защиты оказываются различными. Алюминиевые сплавы сваривают дугой в среде защитных газов — аргона и в более редких случаях — гелия, с флюсовой защитой, специальными электродами, в очень редких случаях — газовой сваркой.

Алюминиевые сплавы в среде аргона сваривают вольфрамовым и плавящимся электродами. Последний способ производительнее, но первый позволяет в некоторых случаях получить более высокие механические свойства швов, например, при сварке элементов очень малых толщин.

Сварные соединения алюминиевых сплавов, выполненные дугой, имеют механические свойства, отличные от основного металла. В мягких сплавах, а также в сплавах, находящихся в ненагартованном состоянии, предел прочности шва приближается к пределу прочности основного металла. В алюминиевых сплавах, которые в исходном состоянии нагартованы, термически упрочнены или состарены, в зоне термического влияния имеет место значительное снижение твердости, предела прочности и предела текучести. Лишь в самом шве указанные показатели несколько повышаются.

Таким образом, пределы прочности сварных соединений в упрочненных сплавах заметно понижены, по сравнению с пределами прочности основных сплавов, и составляют 0,7—0,9 от них.

Сварные соединения полунагартованных сплавов занимают промежуточное положение. Как правило, некоторое увеличение толщины шва способствует повышению прочности сварных соединений, работающих под статическими нагрузками. Прочность сварных соединений алюминиевых сплавов может быть повышена механической или термической обработкой.

На рис. 9-9 приведены характеристики прочности стыковых сварных соединений алюминиевых сплавов при снятом и несня-том усилениях. Как видно из цифр, хорошей прочностью при снятых усилениях обладают соединения из сплава АМг-6. Существенно, что при относительно высокой прочности соединения из этого сплава пластичны, их угол загиба составляет 60—70° (что соответствует основному металлу). При правильно подобранном технологическом процессе швы получаются плотными, без пор и кристаллизационных трещин.

Значительное большинство алюминиевых сплавов хорошо сваривается контактной сваркой. В алюминиевых конструкциях широко применяют точечные и роликовые швы. Современные контактные машины обеспечивают высокое качество соединений деталей из алюминиевых сплавов малых и средних толщин: с толщиной 7+7 *мм* при постановке точек и до 4+4 *мм* при роликовых швах (рис. 9-10).

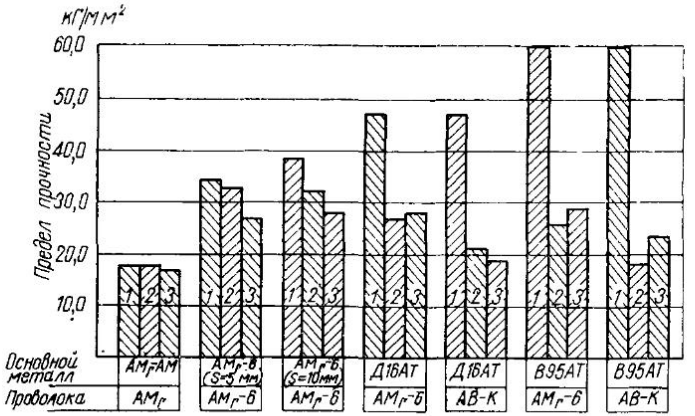


Рис. 9-9. Характеристика механических свойств соединений алюминиевых сплавов разных марок:

1 — основной металл; *2* — сварные соединения с усилением; *3* — то же, без усиления

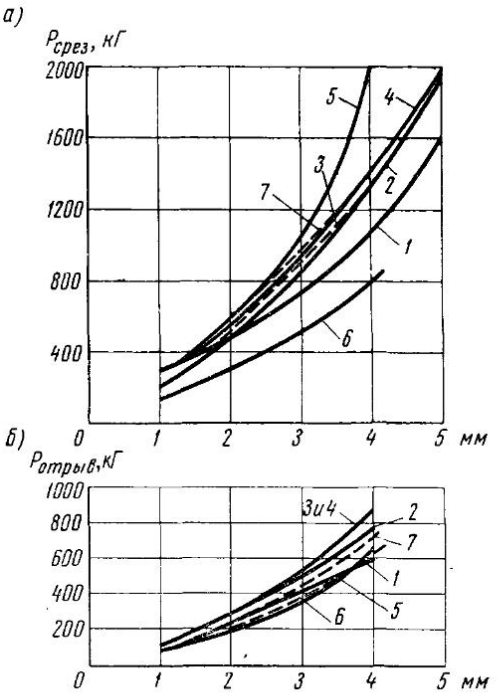


Рис. 9-10. Фактические разрушающие усилия на срез (*а*) и на отрыв (*б*) для сварных точечных соединений в зависимости от толщины металла:

1 — АМц; *2* — АМг3; *3* — АМг5; *4* — АМг6; *5* — АМг61; *6* — Д16-М; Д19-М, Д20-М; *7* — Д16-Т, Д19-Т, Д20-Т, В95-Т

При сварке аустенитных сталей, многих жаропрочных сплавов и титана механические свойства сварных соединений не уступают основному металлу.

Однако титановые сплавы обладают высоким сродством к кислороду, азоту и водороду. При высоком качестве защиты сварные соединения равнопрочны основному металлу и обладают достаточной пластичностью, по сравнению с исходным металлом. Ухудшение защиты приводит к резкому снижению пластичности и, несмотря на повышение прочности металла, сварные соединения при наличии концентраторов или нагружении вдоль шва являются неравнопрочными.

Форма различных сварных соединений неодинакова, что также оказывает влияние на механические свойства соединений. Стыковые соединения с полным проваром отличаются от других сварных соединений наименьшей концентрацией напряжений (см. главу V). В лобовых швах низкоуглеродистых, низколегированных и аустенитных сталей, а также пластичных алюминиевых сплавов при нормальной температуре, концентратор обычно не оказывает заметного влияния на прочность. В тавровых сварных соединениях концентратор ориентирован неблагоприятно относительно силового потока, что может заметно отразиться на деформационной способности при пониженных температурах. Фланговые швы при нагружении деформируются по длине неравномерно. Концентрация сдвиговых деформаций у концов шва вызывает срез участка шва еще до появления полного разрушения. При пониженных температурах, когда проявляется хрупкость металла, это приводит к распространению разрушения по основному металлу. Неравномерность распределения усилий по длине шва особенно заметна в многоточечных сварных соединениях. При числе точек в продольном ряду более пяти предельная нагрузка не возрастает, так как разрушение точек идет последовательно, начиная с крайних (рис. 9-11).

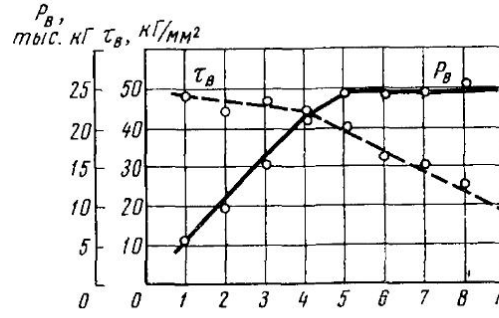


Рис. 9-11. Графики изменения предельной нагрузки $P_в$ и предела прочности $\tau_в$ двухсрезных электрозаклепочных соединений в зависимости от количества электрозаклепок в продольном ряду

Концентрация напряжений создается не только формой сварных соединений, но и возможными дефектами. Непровар, распо-

ложенный поперек силового потока, особенно в стыковых соединениях, вызывает значительную концентрацию деформаций и напряжений. Расположенный несимметрично в корне шва он создает дополнительный изгиб. На рис. 9-12, *а* показано, что при статическом растяжении сварных стыковых соединений из стали Х18Н9Т и низкоуглеродистой стали непровар в корне шва снижает прочность соединений пропорционально уменьшению рабочего сечения, а это указывает на нечувствительность этих материалов при статическом нагружении к концентрации напряжений. При тех же условиях в соединениях из стали 30ХГСНА

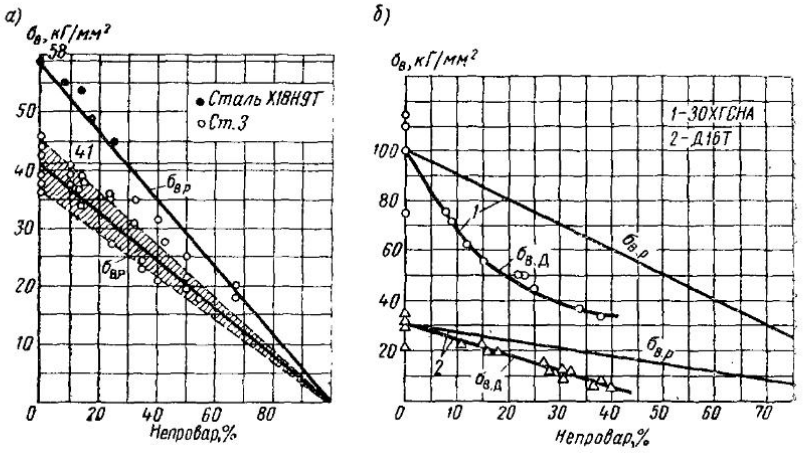


Рис. 9-12. Прочность стыковых сварных соединений без усиления с непроваром в корне шва при статическом растяжении:

а) сталь Х18Н9Т и Ст. 3; *б)* сталь 30ХГСНА; $\sigma_в = 150 \div 170$ *кГ/мм²*, флюс АН-3, проволока 18ХМА (*1*); сплав Д16Т, $\sigma_в = 42 \div 44$ *кГ/мм²*, сварка в аргоне проволокой АК (*2*); $\sigma_{в.р}$, $\sigma_{в.д}$ — пределы прочности: расчетный и действительный

и сплава Д16Т фактическое снижение прочности оказывается больше, чем это следует из расчета, учитывающего величину непровара (рис. 9-12, *б*).

В низкоуглеродистых сталях после деформационного старения в несколько раз уменьшается способность материала к упрочнению при пластической деформации. Было установлено, что в этих условиях происходит падение прочности надрезанных образцов при отрицательных температурах (рис. 9-13). Одновременно было показано, что предварительное нагружение при комнатной температуре ненадрезанных образцов с последующим нанесением надрезов повышает их прочность при отрицательной температуре.

Многочисленными экспериментами установлено, что остаточные одноосные и двухосные пластические деформации и напряжения, если они образуются в соединениях из пластичных металлов без резких концентраторов, не оказывают существенного влияния на статическую прочность. Остаточные напряжения в этом случае, суммируясь с рабочими напряжениями, вызывают пластические деформации металла. При отсутствии резких концентраторов это не представляет опасности для пластичных металлов. Сварочные деформации, составляющие на гладком металле около 1—2%, при наличии концентраторов создают существенное исчерпание пластичности металла. Помимо исчерпания пластичности в перлитных сталях, одновременно протекает деформационное старение, вызывающее повышение предела текучести металла и снижение его пластичности.

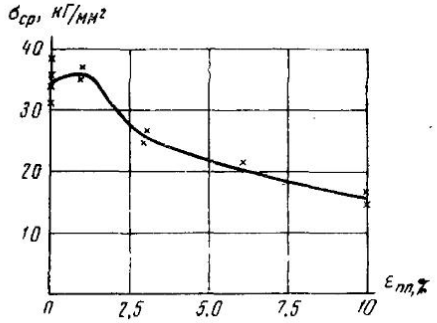


Рис. 9-13. Зависимость среднего разрушающего напряжения $\sigma_{ср}$ надрезанных образцов из низкоуглеродистой стали при $T=-50°$ С от величины пластической деформации металла $\varepsilon_{пл}$, созданной перед деформационным старением ($T=250°$ С, 2 ч) и нанесением надрезов

При отрицательных температурах прочность сварных соединений, имеющих острые концентраторы в зоне термического

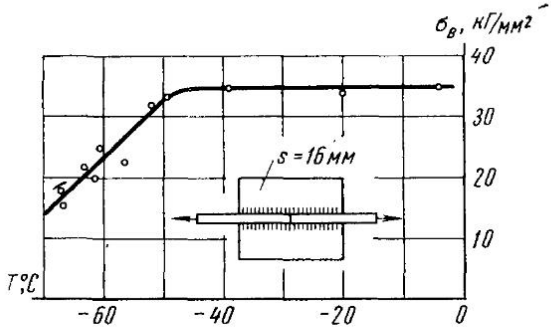


Рис. 9-14. Изменение предела прочности свободных крестовых образцов в зависимости от температуры

влияния, может существенно снижаться (рис. 9-14). Несмотря на то, что в некотором диапазоне отрицательных температур прочность сварных соединений сохраняется неизменной,

пластичность металла в зоне концентраторов, как показывают специальные исследования, непрерывно понижается (рис. 9-15, *а*, кривая 2). Когда пластичность значительно снижается, обнаруживается также резкое снижение прочности надрезанных образцов (рис. 9-15, *б*, кривая 2).

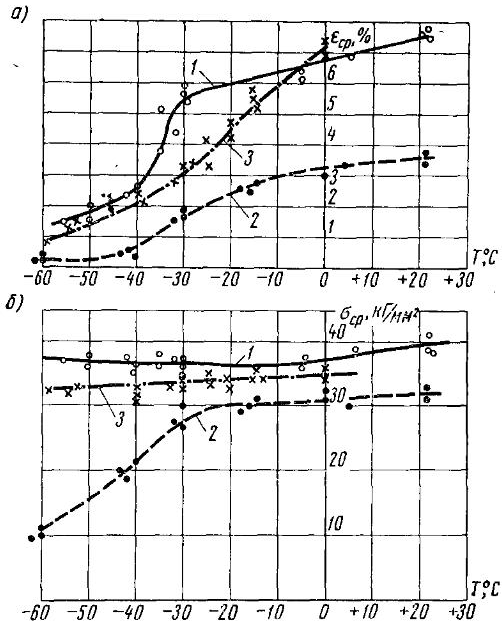


Рис. 9-15. Пластичность (*а*) и прочность (*б*) надрезанных образцов из стали 22К:

1 — в исходном состоянии; *2* — после переплавки металла по кромке с надрезом; *3* — после переплавки по кромке с надрезом и высокого отпуска

§ 3. ПОВЫШЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Основным путем повышения статической прочности сварных соединений является улучшение технологического процесса сварки, которое может осуществляться по нескольким направлениям:

а) повышение качества защиты нагретого и расплавленного металла от влияния окружающей среды;

б) получение требуемого состава металла шва;

в) регулирование теплового воздействия процесса сварки на металл;

г) отсутствие дефектов сварки и получение рациональных геометрических форм сварных соединений.

Указанными способами с применением подогрева или искусственного охлаждения удается влиять на механические свойства металла различных зон и их размеры. В частности, можно уменьшить скорость охлаждения и степень закалки металла; путем искусственного охлаждения уменьшить ширину разупрочненных зон. Любые мероприятия, направленные на уменьшение разнородности свойств металла в различных зонах, способствуют повышению статической прочности сварных соединений. В некоторых случаях, когда не удается ликвидировать зоны с низкими пластическими свойствами, шов выполняют пластичным с низким пределом текучести. В этом случае пластические деформации от нагрузок сосредоточиваются в зоне шва.

Широко распространены методы повышения прочности, основанные на использовании термической обработки (см. табл. 9.2). Отпуск сварных конструкций (общий или местный), как правило, понижает предел текучести металла в зонах закалки и концентрации пластических деформаций, но повышает пластичность металла в этих зонах. При наличии резких концентраторов напряжения в изделии, особенно, если эксплуатация ведется при низких температурах, восстановление пластичности металла приводит к повышению конструктивной прочности изделий (глава XI, § 4), несмотря на понижение предела текучести металла. Одновременно общий отпуск значительно снижает остаточные напряжения. На рис. 9-15 приведены показатели пластичности и прочности для образцов с надрезами, которые были переплавлены по кромке (кривые *2*), а затем прошли высокий отпуск (кривые *3*). Обнаруживается заметное повышение пластичности и прочности, в особенности при низких температурах.

Нормализация с отпуском или закалка с отпуском позволяют устранить последствия перегрева в перлитных сталях, повысить прочность в зонах высокого отпуска и улучшить структуру металла шва. Закалку с последующим старением используют для изделий из сталей и сплавов, которые предназначены для работы в состаренном состоянии.

Термической обработке может предшествовать пластическая деформация, осуществляемая путем прокатки роликами, в целях дробления зерен литой структуры металла. Применяют термомеханическую обработку сварных соединений, сочетая пластическую деформацию с термической обработкой.

Механические методы повышения статической прочности направлены либо на улучшение геометрических форм за счет съема металла, либо на создание пластических деформаций в целях упрочнения металла. Оба приема имеют положительное

значение и для конструкций, испытывающих переменные нагрузки (см. главу VIII).

Механическая обработка обычно снижает концентрацию напряжений. Упрочнение металла, осуществляемое прокаткой роликами или ударными инструментами, целесообразно применять для повышения статической прочности в тех случаях, когда металл достаточно пластичен и требуется повысить прочность отдельных зон, например, зоны отпуска. При наличии концентраторов или других причин, вызывающих локализацию пластических деформаций, методы механического упрочнения, основанные на создании деформаций удлинения, следует применять с осторожностью. Это замечание полностью относится также к металлам, склонным к деформационному старению.

ГЛАВА X

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МЕТОДЫ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

§ 1. ПРОЧНОСТЬ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Современные методы расчета прочности деталей основаны на гипотезах непрерывности, однородности и изотропности материала. В действительности распределение усилий между зернами металла происходит неравномерно. В некоторых зернах могут иметь место пластические деформации значительной величины, в результате которых образуются микротрещины. При переменных нагрузках они имеют тенденцию развиваться; при этом местные напряжения оказываются опасными для прочности не только хрупких, но и пластичных металлов. При достаточно больших напряжениях в кристаллитах пластичных металлов нарушается связь между атомами: сдвинутые группы атомов перестают образовывать единую атомную цепь. Указанные сдвиги сопровождаются, с одной стороны, скольжением внутри отдельных зерен, упрочнением металла, а с другой стороны, микроскопическими трещинами. При небольших переменных нагружениях образца сначала развитие трещин происходит очень медленно, далее постепенно ускоряется, а на последнем этапе происходит внезапное разрушение.

Анализ природы усталостного разрушения очень сложен, так как требует изучения неоднородной среды (кристаллиты и межкристаллические среды). В сварных соединениях конструкций задача анализа значительно осложняется наличием остаточных напряжений и неоднородностью свойств наплавленного и основного металлов.

Прочность при переменных нагрузках зависит главным образом от количества нагружений, амплитуды изменения напряжения, формы и размеров испытуемых образцов, рода их материалов, состояния поверхности, вида усилий (изгиб, кручение),

свойств среды, в которой производится испытание (воздух, вода и т. п.).

На рис. 10-1, *а* показана диаграмма прочности металла в зависимости от числа циклов нагружений N. Таким образом, $\sigma = f(N)$. Наибольшее максимальное напряжение цикла нагружения, при котором материал не разрушается при достаточно большом числе перемен напряжений, называется *пределом выносливости,* или *пределом усталости.* При испытаниях стальных образцов N принимается равным $10 \cdot 10^6$.

Величина разрушающего напряжения при меньшем числе нагружений называется *временным пределом выносливости* (уста-

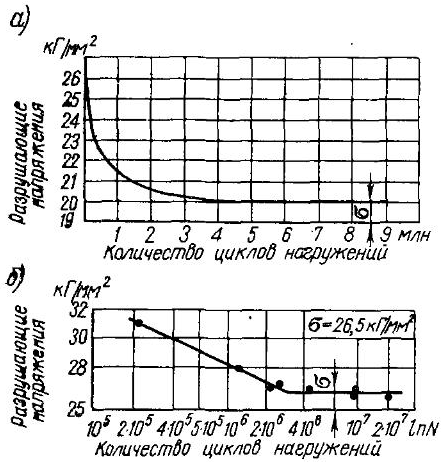


Рис. 10-1. Диаграмма прочности сталей в зависимости от числа нагружений N:

а) в декартовых координатах; *б*) в полулогарифмических координатах

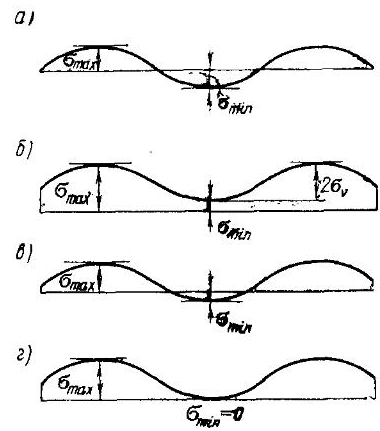


Рис. 10-2. Схема переменных нагружений с различными характеристиками циклов

лости), или условным пределом выносливости (усталости). Испытания металла на выносливость производятся на типовых образцах.

На рис. 10-1, *б* изображена диаграмма прочности металла в зависимости от количества циклов нагружения, построенная в полулогарифмических координатах. По оси абсцисс отложены $\lg N$, т. е. логарифмы количества циклов загружения, а по оси ординат — значения разрушающих напряжений σ.

Опытами подтверждено, что кривая $\sigma = f(N)$ при построении в этих координатах может быть изображена двумя прямыми: одной наклонной и другой горизонтальной. Горизонтальная прямая выражает величину предела выносливости.

Величина пределов выносливости зависит в значительной степени от характеристики цикла. *Циклом* называется совокупность всех значений напряжений за время, равное одному периоду нагружения.

Отношение $r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ называют *коэффициентом амплитуды*, или *характеристикой циклов*, где σ_{max} и σ_{min} соответственно наибольшее и наименьшее напряжения цикла.

На рис. 10-2, *а* показана схема цикла симметричного нагружения, на рис. 10-2, *б* — асимметричного знакопостоянного нагружения, на рис. 10-2, *в* — знакопеременного нагружения, а на рис. 10-2, *г* — пульсирующего. Пределы выносливости, определенные при симметричном цикле, обозначаются σ_{-1}, при пульсирующем — σ_0, при произвольном — σ_r. Наибольшую величину имеют пределы выносливости при испытаниях на изгиб, несколько меньшую — при осевом нагружении и наименьшую — при кручении.

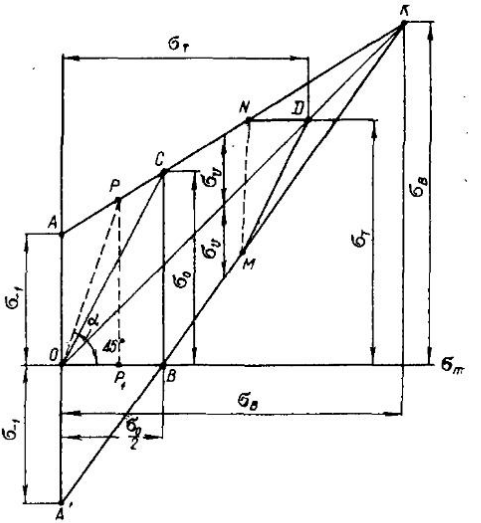


Рис. 10-3. Диаграмма прочности и усталости в координатах σ_{max}, σ_{min} и σ_m

В целях изучения пределов выносливости в зависимости от характеристики циклов строится диаграмма выносливости. Наиболее часто пользуются построением диаграммы выносливости испытуемых образцов по методу Смита, представленной в схематизированной форме на рис. 10-3. По оси абсцисс откладываются значения средних напряжений цикла

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \qquad (10.1)$$

по оси ординат — величины напряжений σ_{max} и σ_{min}. Под углом 45° к горизонту проводится прямая. Величины амплитуд

$$\sigma_v = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

откладываются симметрично относительно наклонной прямой.

Кривые пересекаются в точке K, которая характеризует цикл с бесконечно малой амплитудой. Условно принимают, что эта точка соответствует пределу прочности $\sigma_в$. Отрезок OA выражает величину предела выносливости при симметричном цикле. При этом σ_m равно нулю.

В большинстве случаев пользуются участком диаграммы с напряжениями, не превышающими предела текучести $\sigma_т$. Из точки D с координатами, равными $\sigma_т$, $\sigma_т$, проводят горизонтальную прямую до пересечения с верхней наклонной в точке N. Ее проектируют на нижнюю наклонную в точку M. Ломаная $ANDMA'$ выражает схематизированную диаграмму усталости в пределах упругих деформаций.

Отрезок BC выражает величину предела выносливости при пульсирующем цикле. Абсцисса $OB = \frac{\sigma_0}{2}$.

Проведем из точки O прямую под произвольным углом α к горизонту

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_m} = \frac{2\sigma_{max}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} = \frac{2}{1 - \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}} = \frac{2}{1 - r}. \qquad (10.2)$$

Это отношение позволяет для заданного цикла r определить $\operatorname{tg}\alpha$. Точка P пересечения прямой, направленной под углом α к горизонту, с верхней прямой диаграммы определяет величину предела выносливости при заданном цикле загружения.

Если наклонная прямая пересекает диаграмму на участке AN, то это означает, что предел выносливости имеет величину, меньшую предела текучести.

Установлено, что при значениях r, близких к единице, концентрация напряжений не оказывает существенного влияния на величину предела выносливости. При статическом нагружении предел прочности при наличии концентраторов нередко даже повышается, по сравнению с гладкими образцами. С уменьшением r влияние концентраторов на понижение предела выносливости растет и достигает наибольшего значения при $r = -1$.

Предел выносливости стали зависит от абсолютных размеров испытуемых образцов. С увеличением размеров образцов относительно стандарта предел выносливости σ_{-1} понижается.

Пределы выносливости при испытании стандартных образцов из малоуглеродистых сталей на изгиб в условиях симметричного цикла равны: $\sigma_{-1} = 0{,}50 \div 0{,}55\sigma_в$, т. е. около $18 \div 20$ $кГ/мм^2$, что составляет $\sim 0{,}75 \div 0{,}80\sigma_т$. Для низколегированных конструкционных сталей отношение $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_т}$ несколько меньше, чем для малоуглеродистых.

Прочность деталей конструкций при переменных нагрузках зависит в значительной степени от наличия концентраций напряжений.

Эффективным коэффициентом концентрации напряжения $K_э$ называется отношение предела выносливости гладкого образца к пределу выносливости образца при наличии концентраторов. $K_э$ всегда $\geqslant 1$. Чем $K_э$ ближе к 1, тем лучше работает изделие.

В хрупких материалах эффективный коэффициент концентрации близок к теоретическому, в пластичных — он значительно меньше.

Обычно пределы выносливости сталей понижаются при повышении температуры испытаний. В некоторых сталях предел выносливости растет при некотором повышении температуры. В агрессивных средах предел выносливости значительно уменьшается.

Пределы выносливости стальных образцов без концентраторов растут с понижением температуры испытаний. Например, образец из стали Ст. 3 с выточкой имел предел выносливости $\sigma_r = 14{,}5$ *кГ/мм*^{2} при комнатной температуре и $\sigma_r = 19{,}5$ *кГ/мм*^{2} при температуре $-75°$ С.

Эксперименты показывают, что предел выносливости основного металла в зоне, расположенной у швов сварных соединений, иногда повышается по сравнению с пределом выносливости образцов из основного металла, не подвергавшегося влиянию процесса сварки. После термической обработки сварного соединения структура нередко восстанавливается, металл соединения становится однородным.

Иногда около сварных швов возникает концентрация напряжений вследствие резких переходов от наплавленного металла к основному, в результате подрезов и т. п. Обработка швов фрезой или наждачным кругом создает плавный переход от наплавленного металла к основному, благодаря чему предел выносливости повышается.

Таблица 10.1

Пределы выносливости сталей

Испытуемый образец	Пределы выносливости, *кГ/мм*^{2}				
	Ст. 3 (кипящая)	Ст. 3 (спокойная)	Ст. 15	Сталь 15ХСНД	Сталь 52
Лист целый	12,1	15,8	—	18,8	—
Лист шлифованный . . .	13,4	19,8	—	—	—
Лист с отверстием . . .	8,6	11,0	—	15,0	—
Образцы круглого сечения .	16,5	16,5	18,5	20,5	21÷24

Чувствительность к концентраторам в образцах из низколегированных сталей выше, чем из малоуглеродистых.

Пределы выносливости сталей, применяемых в сварных конструкциях, испытанных при изгибающих усилиях и симметричных циклах, приведены в табл. 10.1.

Эти данные показывают, что концентраторы напряжений имеют большое влияние на пределы выносливости (усталостную прочность металла).

§ 2. ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ, ВЫПОЛНЕННЫХ ДУГОВОЙ СВАРКОЙ, ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

В сварных соединениях предел выносливости зависит от материала, технологического процесса сварки, от формы конструкции, а также от рода усилия и характеристики цикла нагружения. Влияние технологического процесса сварки на прочность при переменных нагрузках изучается на образцах стандартного типа, имеющих стыковые швы.

Прочность при переменных нагрузках соединений, сваренных встык, в зависимости от технологического процесса сварки. Дефекты технологического процесса сварки — шлаковые включения, поры, окислы в наплавленном металле, трещины, непровары и т. п.— вызывают концентрацию напряжений. Зоны с такими дефектами представляют собой очаги разрушений при переменных нагрузках. Хороший провар, плотность и однородность наплавленного металла играют существенную роль в получении высокого предела выносливости.

Как показали результаты многочисленных опытов, при сварке малоуглеродистых и ряда низколегированных конструкционных сталей отношение $\sigma'_{-1}/\sigma_{-1} = 0{,}9 \div 1$ и выше, где σ_{-1} — предел выносливости образца из основного металла при симметричном цикле; σ'_{-1} — предел выносливости сварного соединения встык. Величины предела выносливости при автоматической сварке более постоянны, чем при ручной. Это объясняется однородностью качества сварных швов.

Наивысшей прочностью при переменных нагрузках обладают соединения встык с прямыми и косыми швами. Предел выносливости соединений этого рода почти достигает предела выносливости основного металла. Прочность при переменных нагрузках стыковых швов превышает прочность при переменных нагрузках образцов из основного металла, имеющих ослабление в форме заклепочных отверстий.

На рис. 10-4 приведены сводные результаты определения $\sigma_в$ и σ_{-1} соединений сталей и алюминиевого сплава Д16Т. Вертикальной штриховкой указаны величины пределов прочности об-

разцов из основного металла, незаштрихованные полосы показывают их пределы выносливости при симметричных циклах нагружений; наклонно штрихованные указывают значения пределов выносливости сварных соединений при тех же циклах.

Видно, что высокими показателями усталостной прочности относительно предела прочности обладают стали малоуглеродистые (Ст. 3, сталь 20). Аустенитные стали, высокопрочная сталь марки 30ХГСНА, сплав марки Д16Т имеют низкие относительно $\sigma'_в$ значения σ_{-1} и σ'_{-1}.

Стали повышенного качества наиболее эффективно используются в условиях статических нагрузок и переменных при $r>0$. Если конструкция имеет высокие значения коэффициентов концентрации напряжений и r приближается к -1, то эффективность применения высококачественных сталей резко понижается.

Высокий предел выносливости имеют также соединения, сваренные контактно-стыковым методом с оплавлением, при котором σ'_{-1} приближается к σ_{-1}.

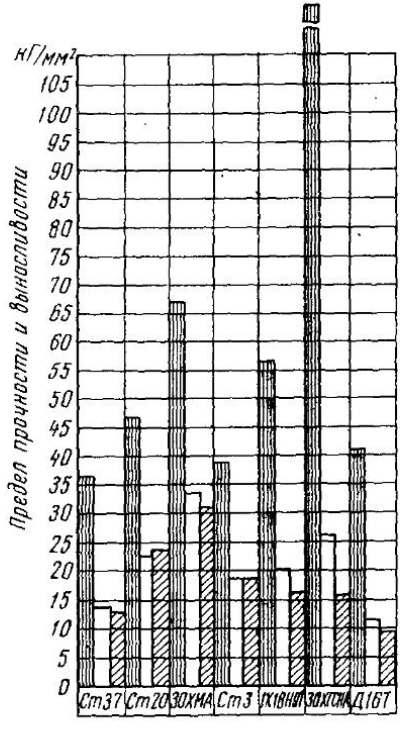


Рис. 10-4. Пределы прочности и выносливости сталей и сплава Д16Т при симметричных нагружениях:

вертикальная штриховка — $\sigma_в$ основного металла; незаштрихованные полосы — σ_{-1} основного металла; косая штриховка — σ'_{-1} сварного соединения

Если известен предел выносливости основного металла стандартного образца при симметричном цикле, то можно вычислить предел выносливости сварного соединения при произвольном цикле по формуле (если напряжение растяжения больше напряжения сжатия)

$$\sigma'_r = \frac{2\sigma_{-1}}{K_э + \psi - (K_э - \psi) r}, \qquad (10.3)$$

где

$$\psi = \sigma_{-1}/\sigma_в;$$

σ_{-1} — предел выносливости основного металла при симметричном цикле;

$\sigma_в$ — предел прочности основного металла;

r — характеристика цикла;

$K_э$ — эффективный коэффициент концентрации напряжений.

При наличии технологических дефектов в шве прочность сварных соединений при переменных нагрузках резко падает. На рис. 10-5 приведены результаты испытаний сварных соединений стали Ст. 3 с непроваром в корне стыковых швов. Даже небольшой непровар шва образует надрез и концентрацию напряжений, которые снижают прочность стыковых соединений при переменных нагрузках. Подварка корня стыкового шва повышает его усталостную прочность.

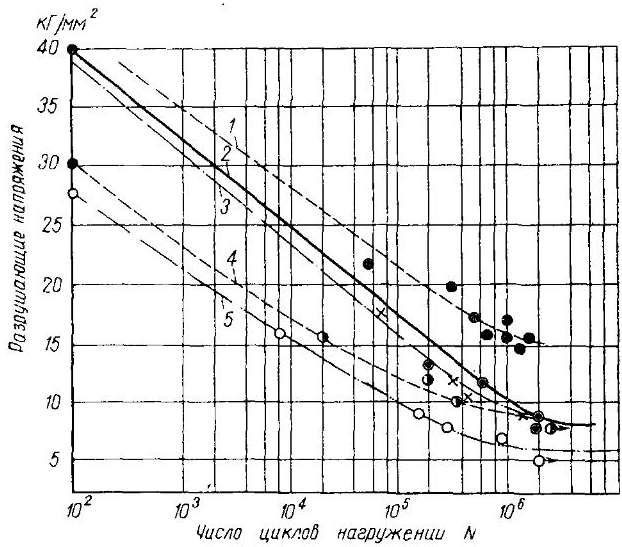


Рис. 10-5. Диаграмма выносливости сварных швов с непроварами:

1 — непровар 0%; *2* — 5 ÷ 10%; *3* — 12 ÷ 17%; *4* — 23 ÷ 25%; *5* — 45 ÷ 50%

Влияние непровара на уменьшение усталостной прочности сварных соединений зависит от рода материала. Очень чувствительны к непроварам сварные соединения из аустенитных сталей типа 1Х18Н9Т и титановых сплавов.

Кривые *1, 2* (рис. 10-5) построены по результатам испытаний стали 30ХГСНА; *3, 4* — стали 1Х18Н9Т, *5* — алюминиевого сплава Д16Т.

Выпуклые стыковые швы имеют предел выносливости более низкий, чем гладкие; весьма хорошие результаты получаются при снятии усилений стыковых швов.

Доказана возможность получения соединения с хорошей прочностью при переменных нагрузках не только при сварке прокатных элементов с прокатными, но и при сварке литых деталей с литыми или прокатных с литыми.

Прочность при переменных нагрузках соединений втавр и внахлестку. Прочность при переменных нагрузках соединений втавр зависит в значительной степени от подготовки кромок. Экспериментально доказано, что предел выносливости соединения втавр, сваренного с подготовкой кромок, выше, чем без подготовки.

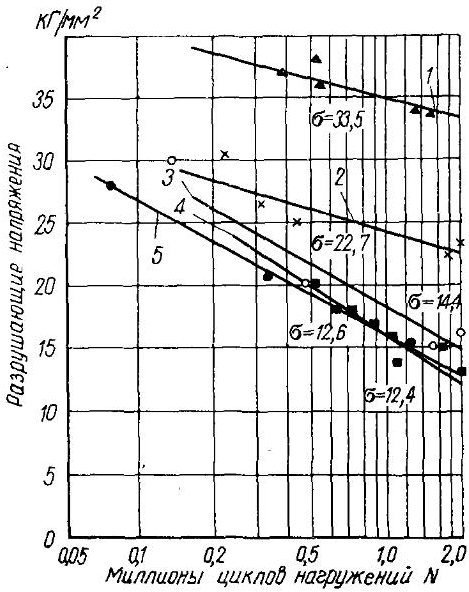


Рис. 10-6. Пределы выносливости сварных соединений втавр в зависимости от разделки кромок:

1 — основной металл; *2* — образец, сваренный на автомате с разделкой кромок; *3* — то же, сваренный вручную; *5* — то же без разделки кромок, сваренный автоматом

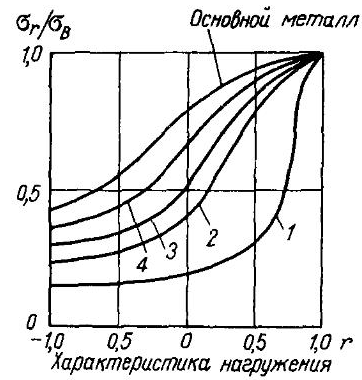


Рис. 10-7. Пределы выносливости сварных соединений в зависимости от характеристики *r*:

1, 2 — образцы с более острыми концентратами; *3, 4* — то же с менее острыми

Причиной пониженной прочности при переменных нагрузках соединений с угловыми швами является концентрация напряжений из-за непровара кромок. При сварке тавровых соединений на автоматах под флюсом глубина проплавления больше. Это обстоятельство улучшает работу соединений, подвергающихся переменным нагрузкам (рис. 10-6).

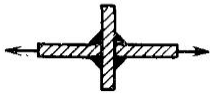
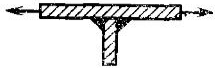
Прочность соединений внахлестку и с накладками, работающих при переменных нагрузках, низка. Причиной этого является концентрация напряжений, имеющая место в соединениях этого рода. Она образуется в основном металле вблизи угловых швов,

N	Схемы видов сварных соединений		$K_э$	
	Вид в плане	Разрезы	Ст 3	15ХСНД
I	Обработано II I	Без сварки Основной металл; Стыковое соединение; С обработкой стыкового шва	1,0	1,0
II		Технологическим путем; Осуществленный плавный переход от шва к основному металлу	1,2	1,33
III		Без механической обработки, обычного качества	1,4	1,8
IV		Ручная сварка	1,6	2,2
V		Обрыв стенки	2,0	2,8
VI		b, a; b=2a	2,3	3,2
VII			2,5	3,5
VIII	То же, что VI при a=b		3,0	4,0
IX			3,4	4,4
X		Обрыв поясов	4,0	4,9

Рис. 10-8. Эффективные коэффициенты концентрации $K_э$ сварных соединений сталей марок Ст. 3 и 15ХСНД (чем ближе $K_э$ к единице, тем лучше работает соединение)

Таблица 10.2

Эффективные коэффициенты концентрации

Схемы видов сварных соединений		$K_э$
Соединение втавр (впритык) без разделки кромок		2,2—2,8
То же, с разделкой кромок		1,6
То же, с плавным переходом		1,0
Образец с одиночным ребром жесткости		1,3
То же, с односторонним швом		1,9

Примечание. При двусторонних ребрах жесткости $K_э$ существенным образом не меняют своей величины.

между швами, в поперечных сечениях самих швов, по длине швов вследствие неравномерного распределения усилий.

Соединения, сваренные лобовыми швами, при отношении катетов 2 : 1, когда механическая обработка отсутствует, имеют предел выносливости 8,1 ÷ 10,9 *кГ/мм*^{2}, а при ее наличии — 11,3 *кГ/мм*^{2}. Соединения с фланговыми швами обычного типа имеют предел выносливости 7,6 *кГ/мм*^{2}, а в соединениях с выточками в накладках у начала фланговых швов он повышается до 9 *кГ/мм*^{2}.

Указанные выше данные получены при испытании соединений из стали марки Ст. 3 при растягивающих усилиях и характеристиках циклов, близких к пульсирующим ($r=1/7$). Эти данные указывают на низкие усталостные свойства соединений

с угловыми швами и на возможность их повышения путем применения улучшенных конструктивных форм и технологической обработки.

Влияние типа соединений на прочность при переменных нагрузках. На рис. 10-7 приведены кривые, характеризующие величины предела выносливости для разных типов сварных соединений из стали 37.

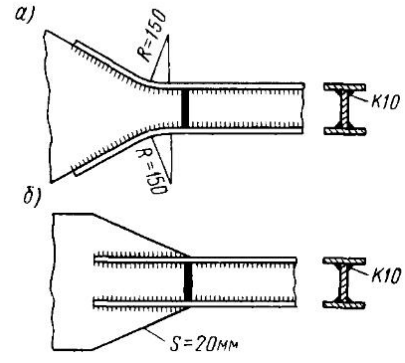
На рис. 10-7 кривая *1* получена для сварных соединений с наиболее резкими концентраторами напряжений; кривая *4* — с наиболее слабыми концентраторами; кривые *2* и *3* — с промежуточными. Экспериментально показано, что при испытании сварных соединений из более прочных сталей кривые *1—4* (рис. 10-7) падают еще более резко.

На рис. 10-8 приведены эффективные коэффициенты концентрации $K_э$, полученные опытным путем при испытаниях сварных соединений и элементов конструкции из стали марки Ст. 3 и стали 15ХСНД. Значения коэффициентов концентрации $K_э$ для сварных соединений Ст. 3 приведены в табл. 10.2. Значения эффективных коэффициентов концентрации $K_э$ для узловых переходов приведены в табл. 10.3. В рассмотренных случаях разница в значениях $K_э$ невелика.

Наименьшие значения $K_э$ имеют соединения встык, наибольшие — с фланговыми швами. В конструкциях из низколегированной стали 15ХСНД коэффициенты $K_э$ выше, чем в конструкциях из стали Ст. 3.

Таблица 10.3

Виды соединений	$K_э$
При поясах 20×100	1,0
То же, при поясах 10×130	1,26
То же, при поясах 10×130	1,0
То же, при поясах 10×210	1,49



На рис. 10-9 изображены различные виды сварных соединений и их пределы выносливости (цифры указаны на оси ординат) при испытаниях в условиях пульсирующих циклов $r=0$. В то время как предел выносливости целой полосы составляет 25 $кГ/мм^2$, стыкового шва — 23 $кГ/мм^2$, таврового соединения с необработанными угловыми швами — 7 $кГ/мм^2$.

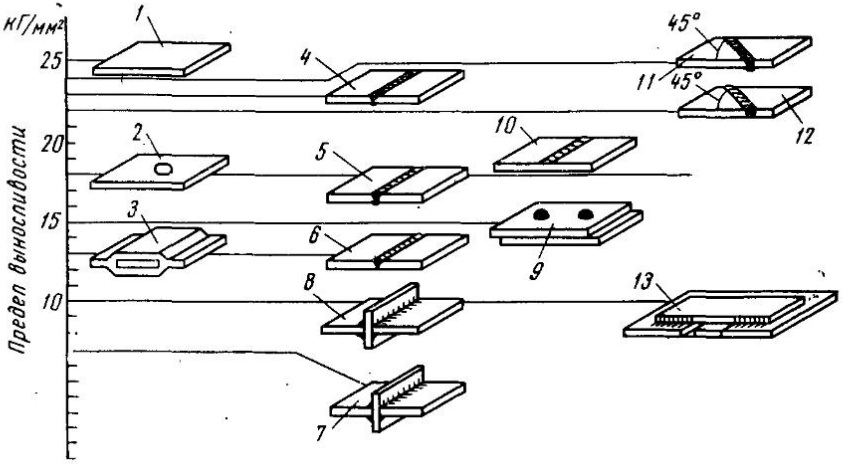


Рис. 10-9. Пределы выносливости сварных соединений из стали 37 при $r=0$:

1 — целая полоса; *2* — полоса с отверстием; *3* — модель соединения с лобовыми швами; *4* — шов обработан, подварен; *5* — шов не обработан, подварен; *6* — шов без подзара; *7* — крестовое соединение, швы не обработаны; *8* — то же, швы обработаны; *9* — соединение с заклепками; *10* — поперечный валик без обработки; *11* — косой стыковой шов обработан, подварен; *12* — то же, не обработан, подварен; *13* — фланговые швы, обработанные

§ 3. УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН

Экспериментальным путем установлено, что усталостная прочность сварных соединений элементов больших толщин, сваренных электрошлаковым способом, из котельных сталей марки 22К, а также из углеродистых, например марки 35Л, удовлетворительна. В табл. 10.4 приведены данные испытаний сварных образцов на выносливость при изгибе с симметричным циклом нагружения.

С увеличением размера сварного элемента предел усталости несколько снижается. Однако достаточная прочность сварных соединений при переменных нагрузках позволяет применять

Таблица 10.4

Предел выносливости образцов больших сечений

Диаметр образца, *мм*	Предел выносливости стали 35Л, *кГ/мм²*	
	основного металла после термической обработки	сварных соединений
20	11,5÷14,5	15,5
200	7,0÷11,0	7,5

электрошлаковую сварку в самых ответственных машиностроительных конструкциях.

Механические характеристики металла зависят от температуры испытаний. Пределы прочности и текучести образцов сечением 52×75 *мм* достигают наибольших значений при температуре, приближающейся к 300° С. Это присуще некоторым низколегированным сталям, например 16НГМ (0,17С; 0,19Si; 0,14Mn; 0,16Cr; 0,62Mo). Отношение $\sigma_{-1}/\sigma_в$ для этой стали имеет наименьшее значение при $T=100\div200$° С и наибольшее при $T=350-410$° С.

Заметное влияние на повышение усталостной прочности сварных элементов 65×75 *мм* из малоуглеродистой стали 22К оказывает термообработка сварных конструкций (табл. 10.5).

Таблица 10.5

Пределы выносливости сварных соединений элементов больших толщин

Вид соединения	Термообработка	σ'_{-1}, *кГ/мм²*
Основной металл	Состояние поставки	18,5
Сварное соединение с V-образным швом, сварка вручную	Исходное после сварки	7,5
То же	Отпуск 620°	11,5
То же, усиление шва снято	Исходное после сварки	10,5
То же	Отпуск 620°	14,5
„	Нормализация 930° и отпуск 620°	17,5—18,5

Как следует из приведенных данных, при сварке элементов больших толщин термическая обработка, особенно в сочетании со снятием усиления, приводит к заметному повышению усталостной прочности.

§ 4. УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Соединения, выполняемые контактной стыковой сваркой, обладают высокими механическими свойствами не только при статических, но и усталостных нагрузках. При сварке малоуглеродистых и многих низколегированных сталей соединения, сваренные контактным стыковым способом, имеют предел выносливости, равный пределу выносливости основного металла. Например, для соединений малоуглеродистых сталей, испытываемых при симметричном цикле ($r=-1$), предел выносливости достигает $16 \div 19$ *кГ/мм*^{2}. Большое влияние на усталостную прочность оказывает качество провара стыка, а также состояние его поверхности. При грубой обработке поверхности предел выносливости меньше; при гладкой и особенно полированной больше. Стыковые соединения, сваренные контактным способом, почти не обладают концентрацией напряжений и поэтому рациональны.

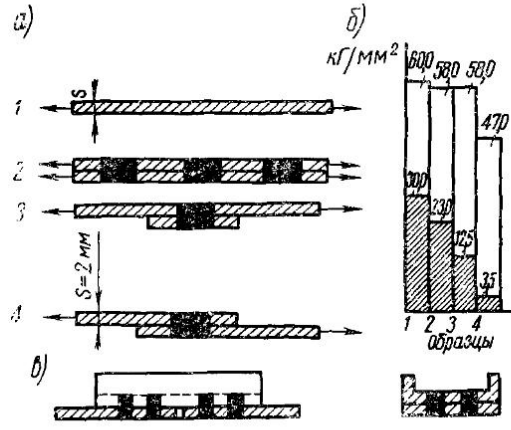


Рис. 10-10. Пределы выносливости точечных соединений из титанового сплава:

а) типы образцов 1—4; *б)* их пределы выносливости; *в)* рациональный тип соединения с жесткой накладкой

Усталостная прочность точечных соединений значительно уступает стыковым. Точечные соединения условно рассчитывают по напряжениям среза. Однако их разрушения при работе под переменными нагрузками всегда происходят в результате разрывов металла в надточечной или околоточечной зонах. Эти разрушения вызваны концентраторами напряжений. Усталостная прочность точечных соединений в очень большой степени зависит от того, являются ли они связующими или несут рабочие усилия, от рода материала и степени его чувствительности к концентраторам напряжений.

Данные экспериментов показывают, что пределы выносливости рабочих точек намного ниже, чем связующих, что наименее чувствительны к концентраторам точечные соединения из малоуглеродистых сталей, более чувствительны из аустенитных сталей 1Х18Н9Т и 30ХГСА в закаленном состоянии.

На рис. 10-10, *б* наглядно показано, как падает усталостная прочность образцов из титанового сплава ВТ1, в зависимости от вида сварного соединения (рис. 10-10, *а*). При рабочих точках (образец *4*) усталостная прочность составляет 3,5 *кГ/мм*², при связующих (образец *2*) — 23 *кГ/мм*². Верхние цифры на рис. 10-10, *б* указывают величины пределов прочности испытуемых образцов.

Усталостная прочность в сильной степени зависит от вида сварного точечного соединения. Чем больше шаг между точками в ряде, направленном перпендикулярно действующей силе, тем выше концентрация напряжений и ниже усталостная прочность. При односторонних накладках целесообразно осуществлять соединения точками с применением накладок повышенной жесткости, например, как указано на рис. 10-10, *в*. При этом уменьшается эффект изгиба и повышается сопротивление усталостным разрушениям.

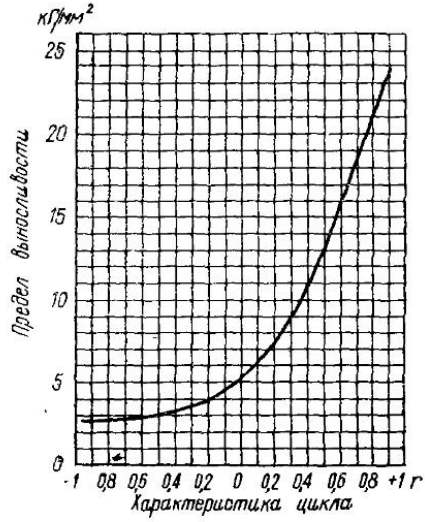


Рис. 10-11. Пределы выносливости точечных соединений в зависимости от характеристики циклов

При наличии нескольких точек, стоящих в продольном ряду, удельная усталостная прочность (разрушающая нагрузка, отнесенная к одной точке) несколько повышается по сравнению с одноточечным соединением.

В соединениях с двухсрезными точками усталостная прочность повышается почти в 3 раза по сравнению с односрезными.

Качество сварных точек, особенно рабочих, имеет также значительное влияние на усталостную прочность. Опытным путем установлено, что внутренние трещины в точке оказывают небольшое влияние на разрушающую нагрузку, наружные же трещины могут снизить ее в 3 и более раза.

Очень большое влияние на усталостную прочность точек оказывает характеристика цикла испытаний (рис. 10-11). При знакопеременных нагружениях предел выносливости снижается в несколько раз, по сравнению с пульсирующими и знакопостоянными циклами.

Технологическими мероприятиями можно значительно повысить прочность точек, работающих под переменными нагрузками. Наиболее рациональным является обжатие их в машине при остывании (при ковочном давлении). Такая операция называется *проковкой*. Она преследует две цели: образование пластической деформации и повышение предела текучести, а также создание в зоне точки сжимающих остаточных напряжений, которые являются полезными для соединения. В результате их присутствия сопротивляемость усталостным разрушениям повышается в 1,4 ÷ 2,0 раза.

При обработке специальным инструментом в результате обжатия можно повысить усталостную прочность сварных точечных соединений в 2,5 ÷ 3 раза.

Усталостная прочность соединений, выполненных роликовой сваркой, ниже, нежели стыковой, но выше, чем точечной, так как концентраторы напряжений в роликовых соединениях имеют менее острый характер.

Таблица 10.6

Коэффициенты $K_э$ точечных соединений

Марка материала	Состояние металла	Толщины соединяемых частей, *мм*	$K_э$	
			связующие точки	рабочие точки
Сталь 10	Нормализованное	3+3	1,4	7,5
Сталь 1Х18Н9Т	Нагартованное	1,5+1,5	2,0	12,0
Титановый сплав	Состояние поставки	1,5+1,5	2,0	10,0
Алюминиевый сплав Д16Т	Состояние поставки	1,5+1,5	2,0	5,0
Сталь 30ХГСА	При $\sigma_в = 65$ *кГ/мм²*	1,5+1,5	2,0	12,0

Таблица 10.7

Коэффициенты $K_э$ роликовых соединений

Марка материала	Состояние металла	Толщины соединяемых частей, *мм*	$K_э$, соединений	
			связующих	рабочих
Ст. 10	Нормализованное	3+3	1,25	5,0
Ст. 1Х18Н9Т	Нагартованное	1,5+1,5	2	7,5
Титановый сплав ВТ1	Состояние поставки	1,5+1,5	1,3	5,0
Алюминиевый сплав Д16Т	Состояние поставки	1,5+1,5	1,3	2,25

Следует отметить, что конструкции, выполненные точечной и роликовой сварками, в некоторых областях техники подвергают испытаниям при низкой частоте загружений и доводят до разрушения при нескольких десятках тысяч загружений. Такие испытания называются *повторно статическими*. Многие явления, свойственные поведению образцов под усталостными нагрузками, имеют место при повторно статических нагрузках. Прочность образцов при повторно статических нагрузках зависит от наличия концентраторов в соединениях, свойств материала и качества сварных соединений.

Примерные величины эффективных коэффициентов концентрации напряжений $K_э$ для точечных и роликовых соединений приведены в табл. 10.6 и 10.7.

§ 5. УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ, СВАРЕННЫХ ДУГОВОЙ СВАРКОЙ

Наиболее высокую усталостную прочность имеют сварные соединения встык, которые лишь незначительно уступают основному металлу. Пределы выносливости соединений с угловыми

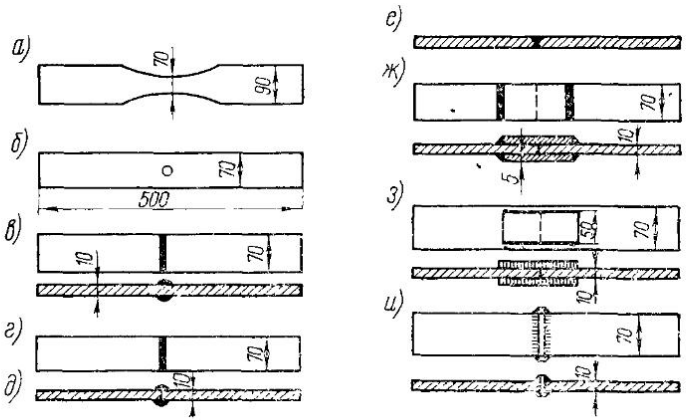


Рис. 10-12. Образцы из алюминиевого сплава АМГ-6, испытанные на усталостную прочность при переменных нагрузках

швами, а также при наличии односторонних накладок оказались значительно ниже, чем пределы выносливости стыковых.

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений $K_э$ в соединениях из алюминиевых сплавов несколько ниже, нежели у сталей, особенно легированных, что является благоприятным

для работы под переменными нагрузками алюминиевых изделий.

Величины $\sigma_в$ и коэффициентов $K_э$ сварных соединений (рис. 10-12) сплава АМг-6 приведены в табл. 10.8.

Таблица 10.8

Коэффициенты $K_э$ сварных соединений алюминиевого сплава АМг-6

Вид образца (см. рис. 10—12)	Предел прочности при растяжении $\sigma_в$, *кГ/мм²*	Предел выносливости в *кГ/мм²* при числе циклов нагружений N		Коэффициент $K_э$
		10^6 циклов	$5 \cdot 10^6$ циклов	
а	37,1	11,2	9,5	1,00
б	37,1	6,7	6,0	1,60
в	35,1÷35,5	8,8÷9,1	6,0÷6,8	1,15÷1,60
г	31,9÷32,4	7,7÷9,6	5,0÷7,5	1,25÷1,80
д	22,8	3,7	2,4	—
е	23,4	5,5	4,1	—
ж	19,2	6,0	4,5	—
з	30,3	7,0	4,6	2,00
и	22,8	5,3	3,5	—

Примечание. Все образцы, кроме *д*, *е*, имели толщину 1 *см*; образцы *д*, *е* — 2 *см*

§ 6. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

При сварке легированных термически обработанных сталей, например хромансиля и др., наименьшую прочность при переменных нагрузках в сварном соединении имеет основной металл в зоне отпуска. Аналогичное понижение предела выносливости в зоне отпуска наблюдается в сварных соединениях термически обработанных цветных сплавов (алюминиевых, магниевых и др.). Разрушение, как правило, происходит около стыковых швов при пониженных значениях предела выносливости, по сравнению с пределом выносливости основного металла в термически обработанном состоянии. Мероприятием, повышающим прочность сварных соединений легированных сталей при переменных нагрузках, является применение термической обработки изделия. Однако термическая обработка часто не восстанавливает полностью прочность элемента, которая была до сварки, но все же частично восстановление происходит. Разработан также способ повышения прочности при переменных нагрузках для соединений

из малоуглеродистых сталей. Для повышения прочности сварные соединения подвергают поверхностной механической обработке: прокатке роликами или, что является более простым и удобным, обдувке дробью, или обработке пневматическим молотком. При этом в поверхностных слоях металла происходит пластическая деформация, которая вызывает наклеп металла, сопровождающийся повышением $\sigma_т$ и, кроме того, образуются остаточные напряжения сжатия.

Указанные явления приводят к значительному повышению прочности сварных соединений при переменных нагрузках.

Характерно то обстоятельство, что чем выше коэффициент концентрации напряжений в сварном соединении, тем более эффективно применение поверхностной обработки швов.

В табл. 10.9 приведены значения пределов выносливости в сварных соединениях с остаточными напряжениями.

Таблица 10.9

Влияние остаточных напряжений на предел выносливости

Испытуемый сварной образец	Величина остаточных напряжений, $кГ/мм^2$	Предел выносливости, %
Без остаточных напряжений	0	100
С растягивающими остаточными напряжениями	+12,7	71
Со сжимающими остаточными напряжениями .	−15,3	134

Примечание. Прочность образца без остаточных напряжений принята условно за 100%.

Среди различных способов повышения усталостной прочности сварных соединений известен местный нагрев. В зоне сварных соединений, где растягивающие напряжения имеют значительные величины, добавляются напряжения сжатия от местного нагрева. Последний оказывает благоприятное влияние на результирующее поле остаточных напряжений и повышает усталостную прочность. В некоторых случаях приносят также пользу деконцентраторы. Около зон шва, где образуется высокая концентрация напряжений, вызванная сваркой, создают искусственные деконцентраторы, например, высверливают отверстия таким образом, чтобы они на наиболее напряженных растянутых зонах вызвали напряжения сжатия и уменьшили бы остроту первоначальных концентраторов. На рис. 10-13, *в* показаны деконцентраторы напряжений, полученные высверливанием отверстий. На рис. 10-13, *г* кругами показаны зоны точечного нагрева. Цифра-

ми указаны пределы выносливости. На рис. 10-13, *а, б* приведены пределы выносливости аналогичных конструкций, полученные применением выкружек при отсутствии деконцентраторов и точечного разогрева.

Формы разрушений сварных конструкций, работающих при переменных нагрузках, разнообразны. Нередко разрушения определяются наличием дефектов в сварных швах, вызывающих концентрацию напряжений.

На рис. 10-14 изображены в схематической форме возможные места разрушений различных сварных соединений при дуговой сварке малоуглеродистых и термообработанных низколегированных сталей.

Чтобы повысить прочность при переменных нагрузках, необходимо рационально спроектировать сварные конструкции, т. е. создать конструктивные формы, которые обеспечивали бы максимальное устранение концентрации напряжений.

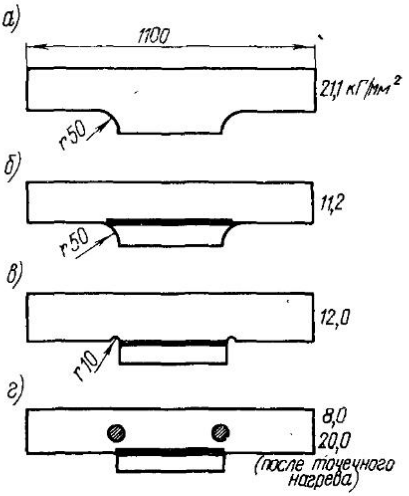


Рис. 10-13. Способы повышения усталостной прочности:

а) выкружкой в целом элементе полосы; *б)* выкружкой в приваренном элементе; *в)* с деконцентратором; *г)* при местном точечном нагреве

Многочисленные исследования показали, что отпуск при температуре 650° С, устраняющий остаточные напряжения, вызванные сваркой, не является, как правило, методом повышения усталостной прочности. Это объясняется тем, что отпуск не только устраняет остаточные напряжения, но и изменяет до некоторой степени механические свойства металла, снижает предел выносливости. Напротив, наложение швов в ряде случаев вызывает в околошовной зоне повышение предела текучести. Если в зоне наибольших растягивающих напряжений от внешних нагрузок созданы остаточные сжимающие напряжения, то последние приносят не вред, а пользу. Таким образом, следует помнить, что остаточные напряжения могут быть не только вредными, но и полезными.

Термический отпуск в одних случаях может повысить усталостную прочность, а в других он же бывает бесполезен и даже снижает сопротивление соединений переменным нагрузкам. Вопрос о целесообразности отпуска должен решаться с учетом формы сварной конструкции, принятого технологического

процесса сварки, схемы распределения остаточных напряжений и условий эксплуатации.

Аналитически величина предела выносливости в зависимости от остаточных напряжений приближенно может быть выражена следующей формулой:

$$\sigma_{-1,0} = \sigma_{-1}\left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_в}\right), \qquad (10.4)$$

где $\sigma_{-1,0}$ — предел выносливости при симметричном цикле образца с остаточными напряжениями;

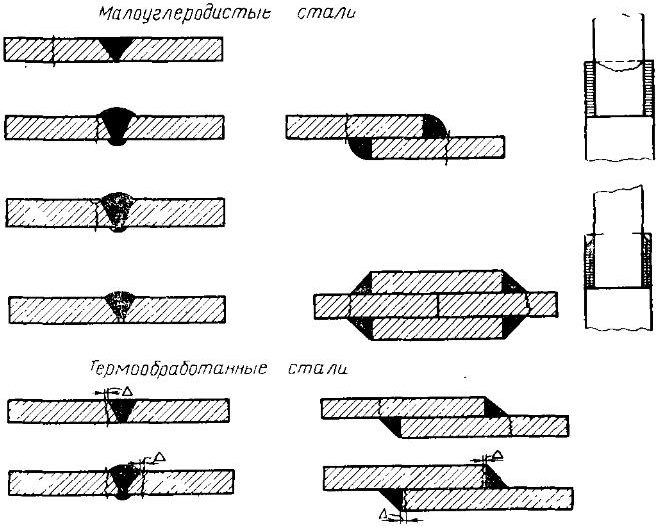


Рис. 10-14. Виды вероятных разрушений сварных соединений при переменных нагрузках

σ_{-1} — то же без остаточных напряжений;

σ_0 — величина остаточных растягивающих напряжений в зоне возможного разрушения;

$\sigma_в$ — предел прочности металла.

Остаточные напряжения нередко повышают усталостную прочность в зоне надреза. Например, предел выносливости образца из стали Ст. 3 с надрезами на кромках при действии пульсирующих нагрузок составлял 7,4 *кГ/мм*^{2}. При нагреве образца по оси и создании в надрезе остаточных сжимающих напряжений предел выносливости повышался до 11 *кГ/мм*^{2}. В то же время при проковке образца по оси и создании в надрезе растягивающих остаточных напряжений усталостная прочность понижалась до 5,6 *кГ/мм*^{2}.

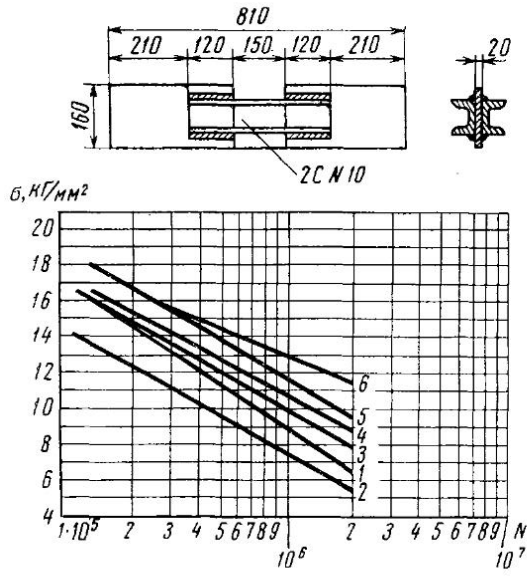


Рис. 10-15. Результаты испытаний сварных образцов с фланговыми швами при переменных нагрузках:

1 — в исходном состоянии; *2* — после высокого отпуска; *3* — при удлиненных фланговых швах; *4* — после механической обработки; *5* — после предварительного нагружения; *6* — после местного пластического обжатия

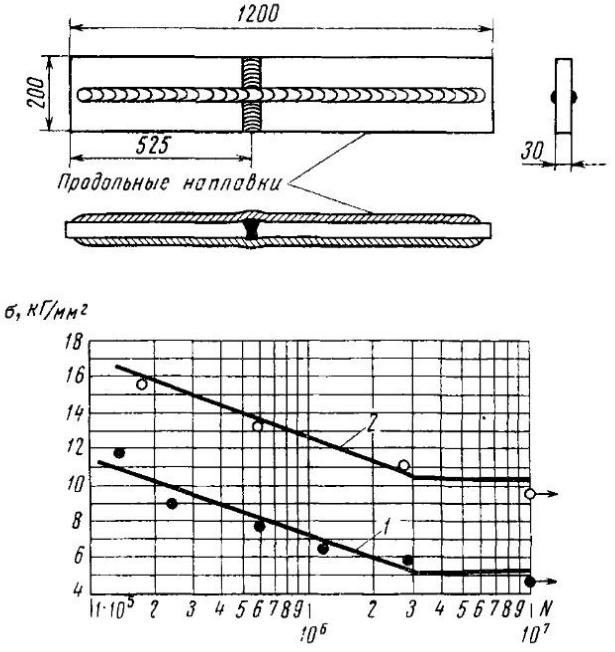


Рис. 10-16. Сопоставление результатов испытаний сварных образцов с пересекающимися швами при переменных нагружениях:

1 — в исходном состоянии; *2* — после высокого отпуска

На рис. 10-15 показаны диаграммы усталости образцов из малоуглеродистых сталей, откуда следует, что высокий отпуск не повышает предела выносливости. Усталостная прочность растет после механической обработки и обжатий.

На рис. 10-16 показаны диаграммы усталости соединений при пересекающихся швах. В этом случае высокий отпуск оказался полезным. Предел выносливости в результате высокого отпуска повысился.

§ 7. ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОД ПЕРЕМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ

В нормативных материалах различных ведомств предлагается использовать метод, при котором допускаемые напряжения или расчетные сопротивления основного металла и сварных соединений, работающих под переменными нагрузками, определяются в зависимости от допускаемых напряжений (или расчетных сопротивлений) при статических нагрузках, путем умножения последних на коэффициент $\gamma \leqslant 1$, т. е.

$$\text{допускаемое напряжение} = [\sigma]_p \gamma. \qquad (10.5)$$

При этом учитывается эффективный коэффициент концентрации напряжений $K_э$, найденный опытным путем при $r = -1$, характеристика цикла r и ряд других факторов. При расчете сварных соединений строительных конструкций коэффициент γ равен

$$\gamma = \frac{1}{(aK_э \pm b) - (aK_э \mp b) r} \leqslant 1. \qquad (10.6)$$

При определении характеристики цикла $r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ напряжения σ_{max} и σ_{min} принимают наибольшее и наименьшее по абсолютной величине, взятые со своими знаками: растяжение имеет знак плюс, сжатие — знак минус.

Коэффициенты a и b при подсчете γ по формуле (10.6) предлагается принимать в соответствии с данными табл. 10.10.

Коэффициенты $K_э$ принимаются различными (табл. 10.11) для малоуглеродистых сталей, низколегированных сталей и цвет-

Таблица 10.10

Значения a и b в формуле (10.6), устанавливаемые строительными нормалями

Материал	Вид конструкции	Коэффициенты	
		a	b
Сталь углеродистая	Подкрановые балки, фермы, балки рабочих площадок и элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад	0,75	0,3
Сталь низколегированная		0,8	0,3

Таблица 10.11

Величины эффективных коэффициентов сварных соединений

Расчетные сечения	Коэффициент $K_э$ для стали	
	углеродистой	низколегированной
По основному металлу		
Основной металл с необработанной прокатной поверхностью, с прокатными или обработанными механическим путем кромками по сечениям вне заклепок, болтов и сварных швов	1,0	1,0
То же, но с кромками, обрезанными газовой резкой:		
а) машинной	1,1	1,2
б) ручной	1,4	1,8
Основной металл в месте перехода к необработанному стыковому шву с усилением, имеющим достаточно плавный переход	1,4	1,8
Основной металл в зоне перехода к стыковому шву, обработанному в этом месте абразивным кругом или специальной фрезой:		
а) при стыковании листов одинаковой толщины и ширины	1,0	1,0
б) при стыковании листов разной ширины	1,2	1,4
в) при стыковании листов разной толщины	1,3	1,6
Основной металл в месте перехода к поперечному (лобовому) угловому шву в рабочих соединениях внахлестку:		
а) без механической обработки при отношении катетов $\kappa_1/\kappa_2=2$ (при направлении большего катета вдоль усилия)	2,3	3,2
б) то же при отношении катетов $\kappa_1/\kappa_2=1{,}5$	2,7	3,7
в) при наличии механической обработки и отношении катетов $\kappa_1/\kappa_2=2$	1,2	1,4
г) то же при отношении катетов $\kappa_1/\kappa_2=1{,}5$	1,5	1,9
Основной металл в соединениях с фланговыми швами, работающими на срез от осевой силы, в местах перехода от элемента к концам фланговых швов, независимо от наличия обработки швов	3,4	4,4
Основной металл вблизи диафрагмы и ребер, приваренных угловыми швами к растянутым поясам балки и элементам ферм:		
а) без механической обработки швов, но при наличии плавного перехода от швов к металлу:		
при ручной сварке	1,6	2,2
при полуавтоматической сварке	1,3	1,5
б) то же при механической обработке швов	1,0	1,1

Продолжение табл. 10.11

Расчетные сечения	Коэффициент $K_э$ для стали	
	углеродистой	низколегированной
Поперечные сечения сварных элементов		
Сечения элементов, сваренных из листов непрерывными продольными швами автоматической сваркой (вдали от диафрагм и ребер), при действии усилия вдоль оси шва	1,0	1,0
По металлу соединений		
Стыковые швы (по оси шва) с полным проваром корня шва:		
а) при автоматической (а также ручной) сварке и просвечивании	1,0	1,0
б) при ручной сварке без просвечивания	1,2	1,4
Угловые швы:		
а) поперечные (лобовые) швы по расчетному сечению шва:		
при ручной сварке	2,3	3,2
при автоматической сварке	1,7	2,4
б) продольные (фланговые) швы, работающие на срез от осевой силы в соединении, при проверке срезывающих напряжений по длине шва	3,4	4,4

ных сплавов. Верхние знаки в знаменателе формулы (10.6) берут в случаях, когда наибольшее по абсолютной величине напряжение является растягивающим; нижние знаки, когда наибольшее по абсолютной величине напряжение является сжимающим. Найденное по формуле (10.5) напряжение сравнивается с наибольшим по абсолютной величине расчетным напряжением (растягивающим или сжимающим).

Нередко при расчете элементов конструкций мостовых кранов пользуются формулой

$$\gamma = \frac{1}{(0{,}6\,K_э \pm 0{,}2) - (0{,}6\,K_э \mp 0{,}2)\,r} \leqslant 1. \qquad (10.6')$$

Значения коэффициентов γ, вычисляемых по формулам (10.6) и (10.6'), несколько отличаются между собой. Это различие объясняется специфическими условиями нагружений (наличием динамического эффекта, условиями эксплуатации, частотой переменных нагрузок, соотношениями величин действующих переменных нагрузок и др.).

Эффективные коэффициенты концентраций при расчете сварных конструкций кранов приведены в табл. 10.12.

Следует обратить внимание на то, что допускаемые напряжения снижаются не только в сварных швах (лобовых, фланговых), но и в основном металле, прилегающем к швам, в зоне концентраторов напряжений.

Пример расчета 1. Определить допускаемое напряжение в соединении, сваренном встык из малоуглеродистой стали при $r=-0{,}5$, $a=0{,}6$, $b=0{,}2$.

Таблица 10.12

Величины эффективных коэффициентов конструкций при расчете сварных конструкций кранов

Расчетные элементы	Эффективный коэффициент концентрации для деталей	
	из малоуглеродистой стали типа Ст. 3	из низколегированной стали 15ХСНД
Основной металл вдали от сварных швов с прокатными кромками или обработанными механическим путем	1,0	1,0
Основной металл в элементах таврового, двутаврового и других профилей, сваренных непрерывными продольными швами на автоматах. Усилия направлены вдоль швов	1,0	1,1
Основной металл в месте перехода к стыковому шву с механической обработкой	1,2	1,4
То же, без механической обработки шва	1,5	1,9
Основной металл в месте перехода к лобовому шву. Отношение катетов 1 : 1,5. Шов с механической обработкой	2,0	2,5
То же, шов без механической обработки	2,7	3,3
Основной металл в зоне перехода к фланговому шву вне зависимости от механической обработки	3,5	4,5
Основной металл у ребер жесткости; диафрагмы, приваренные к поясу лобовыми швами с плавными переходами	1,5	1,9
Основной металл у косынок, приваренных встык и втавр, при плавной криволинейной форме перехода, полном проваре и механической обработке шва	1,5	1,9
Основной металл у косынок, приваренных внахлестку с обваркой по контуру площади соприкасания независимо от наличия механической обработки	2,7	3,3
Стыковые швы с полным проваром корня	1,2	1,4
Угловые лобовые швы	2,0	2,5
Фланговые швы	3,5	4,5

По табл. 10.12, при механической обработке $K_э = 1{,}4$. Таким образом,

$$\gamma = \frac{1}{0{,}6 \cdot 1{,}4 + 0{,}2 + 0{,}5\,(0{,}6 \cdot 1{,}4 - 0{,}2)} = 0{,}73.$$

Если $[\sigma]_р = 22$ *кГ/мм²*, то в сварном соединении допускаемое напряжение равно $22 \cdot 0{,}73 = 16{,}06$ *кГ/мм²*.

Пример расчета 2. Определить допускаемое напряжение в лобовом шве при $[\tau'] = 8{,}0$ *кГ/мм²* и $r = 0$. По табл. 10.12,

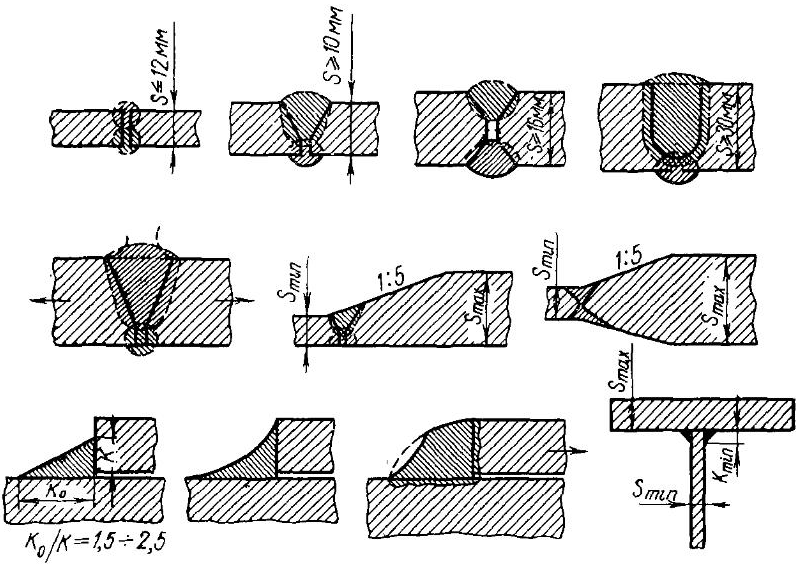


Рис. 10-17. Рекомендуемые виды и способы оформления соединений со стыковыми лобовыми и фланговыми швами при работе под переменными нагрузками

при ручной сварке коэффициент $K_э = 2{,}0$; определяем γ

$$\gamma = \frac{1}{0{,}6 \cdot 2{,}0 + 0{,}2} = 0{,}71.$$

Допускаемое напряжение в шве — $8{,}0 \cdot 0{,}71 = 5{,}64$ *кГ/мм²*.

Допускаемые напряжения в сварных соединениях, свариваемых контактной стыковой сваркой, при работе конструкций под переменными нагрузками могут устанавливаться так же, как в стыковых соединениях, свариваемых дуговой автоматической сваркой под флюсом, в среде защитных газов, электродами ма-

рок А. При расчете стыковых соединений из углеродистых сталей принимают $K_э = 1{,}2$, из высоколегированных и алюминиевых сплавов — $K_э = 1{,}2 \div 1{,}5$. Коэффициент γ определяют по формуле (10.6).

Допускаемые напряжения на основной металл в точечных соединениях, свариваемых контактной сваркой, определяют при значении коэффициентов $K_э$, приведенных в табл. 10.6. Коэффициенты концентрации напряжений $K_э$ в рабочих точечных соединениях имеют очень большие значения, а следовательно, коэффициенты γ очень малы.

Например, при $K_э = 5$ и $r = 0$ (пульсирующий цикл) по формуле (10.6)

$$\gamma = \frac{1}{0{,}6 \cdot 5 + 0{,}2} = 0{,}31.$$

Допускаемые напряжения на основной металл в роликовых соединениях, выполненных контактной сваркой, определяют в функции коэффициентов $K_э$. Приведенные в табл. 10.7 коэффициенты концентраций напряжений $K_э$ для рабочих роликовых соединений ниже, нежели для точечных, а коэффициенты γ — соответственно выше.

На рис. 10-17 приведены рекомендуемые виды и оформление стыковых, лобовых и фланговых швов для работы под переменными нагрузками.

ГЛАВА XI

ХРУПКИЕ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Хрупкость — это способность тел разрушаться без заметной пластической деформации. В определенных условиях хрупкость свойственна и металлам.

Характерной особенностью хрупких разрушений является то, что они происходят при весьма незначительной пластической деформации материала, расположенного вблизи поверхности разрушения. Причинами хрупкости металлов являются: структура и свойства материала, вид напряженного состояния, скорость деформирования и другие причины, которые являются разновидностями основных причин и создаются при определенных условиях нагружения, формах тела, низкой температуре и т. д.

Типичный пример хрупкости, зависящей от свойств материала, можно наблюдать при разрушении белого чугуна. Даже гладкие образцы, в которых имеются лишь одноосные растягивающие напряжения, разрушаются при почти полном отсутствии пластической деформации.

Более пластичные металлы при одноосном растяжении разрушаются после заметной пластической деформации. Хрупкое разрушение таких металлов при статическом нагружении можно получить только при трехосном растяжении, которое делает невозможной сколько-нибудь значительную пластическую деформацию вплоть до разрушения. Этот случай указывает на роль напряженного состояния в появлении хрупкого разрушения.

Пластичные в обычных условиях статического нагружения металлы могут вести себя как хрупкие при больших скоростях их деформирования, например при ударе или распространении трещины. Трещины в металле распространяются с большими скоростями (до нескольких сот метров или даже нескольких километров в секунду). Очевидно, что металл перед фронтом

движущейся трещины в момент ее подхода подвергается быстрому нагружению и, как показывает опыт, может разрушаться хрупко, хотя при медленном нагружении ведет себя как пластичный металл. Типичный пример такого поведения дает смола, которая раскалывается хрупко на куски при ударе, а при медленном нагружении деформируется пластически.

Перечисленные основные случаи хрупких разрушений могут создаваться различными условиями и приемами. Например, наличие острых надрезов (концентраторов) в детали приводит к образованию в корне надреза трехосного растяжения и разрушению при незначительной пластической деформации, что характерно для хрупкого разрушения.

Другим, часто встречающимся примером хрупкого разрушения, является разрушение сталей при низких температурах. В обычных условиях положительных температур большинство перлитных сталей является достаточно пластичными металлами. При низких температурах свойства сталей изменяются. При этом обнаруживается, что острота концентратора и скорость нагружения, которые при положительных температурах являются недостаточными для хрупкого разрушения, при низких температурах вызывают разрушения с типичными признаками хрупкости.

Распространенным случаем проявления хрупкости у металлов является изменение свойств под влиянием технологических операций: изменение химического состава при расплавлении, закалка металла, рост зерна, значительные пластические деформации, старение и др. Изменения свойств оказываются столь значительными, что хрупкость может ярко проявиться даже при положительных температурах.

Таким образом, всякое уменьшение способности металла пластически деформироваться при нагружении независимо от того, какими причинами оно вызвано, приводит к менее вязким формам разрушения, а в ряде случаев и к хрупким разрушениям.

Деление разрушений на хрупкие и вязкие в инженерной практике является условным и основывается на результатах испытаний металлов по различным методикам. Резкой границы между вязкими и хрупкими разрушениями не существует. При переходе от вязкого разрушения к хрупкому, например, при понижении температуры постепенно возрастает роль хрупкой составляющей в виде кристаллического излома. Имеются разрушения промежуточного типа, которые называются квазихрупкими, или хрупко-пластичными.

Почему хрупкие разрушения в промышленных объектах и машинах считаются наиболее опасными? Причина заключается в том, что хрупкие разрушения, протекающие с малой пластической деформацией металла, обладают существенными небла-

гоприятными особенностями, по сравнению с вязкими разрушениями. Эти особенности состоят в следующем. При статическом нагружении и наличии концентраторов напряжений величина разрушающей нагрузки зависит главным образом от равномерности распределения напряжений по сечению детали. Эта равномерность при наличии концентраторов может быть достигнута только вследствие протекания значительной пластической деформации металла в концентраторах. В противном случае разрушение в концентраторе наступает при низках средних напряжениях в детали, что означает уменьшение несущей способности конструкции. Можно было бы учесть ожидаемое снижение несущей способности, но большинство современных методов расчета на прочность при статических нагрузках не учитывает концентрацию напряжения, т. е. фактически предполагает возможность протекания в концентраторах пластической деформации. Если такая пластическая деформация в концентраторе на самом деле не протекает, а наступает хрупкое разрушение, то оказывается, что элемент конструкции не выдержал расчетного значения нагрузки.

Вторая причина, по которой хрупкие разрушения считаются наиболее опасными, состоит в том, что распространение хрупких разрушений ввиду малой пластической деформации металла происходит при незначительных затратах энергии. Следовательно, разрушение может распространяться при низких напряжениях в металле и малой накопленной энергии в конструкции. Хрупкие трещины при этом, как правило, пересекают все сечение детали, и конструкция может разрушиться на несколько частей, что приводит обычно к крупным авариям. При вязком характере наступившего разрушения оно идет только в зоне весьма высоких напряжений и прекращается вследствие большой затраты энергии на продвижение трещины.

Наличие хрупких зон металла, возникших под влиянием технологических операций, опасно тем, что в этих зонах не могут протекать значительные пластические деформации, а наступившее хрупкое разрушение сообщает трещине скорость, достаточную для ее дальнейшего продвижения как квазихрупкой трещины по зоне вязкого металла. Хрупкие разрушения нередко являются завершающей стадией разрушений, начавшихся от различного рода причин, например усталостных нагрузок, ударов, коррозионного растрескивания и т. п.

Рассмотрим более подробно физические причины хрупкости.

При одноосном растяжении образцов без концентраторов хрупкое разрушение наблюдается в металлах, диаграмма $\sigma_1 = f(\varepsilon_1)$ которых почти не имеет пластического участка (рис. 11-1, *а*). В сварных конструкциях материалы с подобными свойствами почти не применяются (за исключением особых случаев).

Разрушения без заметной пластической деформации могут возникать в концентраторах, если металл обладает малым упрочнением в процессе пластической деформации (малым показателем степени упрочнения n, рис. 11-1, *б*). У таких материалов разрушающее напряжение $\sigma_{разр}$ превосходит предел текучести не более чем в 1,5—2 раза.

Объемный характер напряженного состояния в концентраторе приводит к тому, что максимальное напряжение существенно превосходит эквивалентное напряжение σ_i, от величины которого зависит наступление пластической деформации. Может оказаться, что максимальное напряжение достигнет величины разрушающего напряжения раньше, чем σ_i величины $\sigma_т$. Тогда

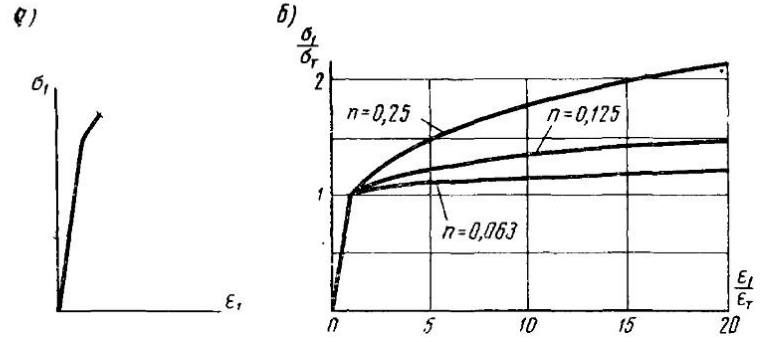


Рис. 11-1. Диаграммы зависимости напряжений от деформаций для хрупкого материала (*а*) и для материалов с различными показателями степени упрочнения (*б*)

разрушение произойдет без пластической деформации. Например, если $\sigma_1 = \sigma_{max}$, а $\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\sigma_{max}}{2}$, то $\sigma_i \approx 0{,}35\sigma_{max}$, т. е. разрушение произойдет без пластической деформации, если $\sigma_{разр}/\sigma_т$ будет примерно менее 3.

Влияние скорости нагружения металла на характер разрушения можно объяснить изменением вида диаграммы $\sigma_1 = f(\varepsilon_1)$ (рис. 11-2). При статическом нагружении, осуществляемом с малыми скоростями деформации, пластическая деформация начинается при напряжениях, равных пределу текучести. При быстром нагружении пластическая деформация «запаздывает» и начинается при напряжениях, существенно больших $\sigma_т$. Может оказаться, что напряжение достигнет разрушающего уровня раньше, чем начнется пластическая деформация. Тогда разрушение будет протекать как хрупкое без заметных следов пластической деформации. Наиболее отчетливо влияние напряженного состояния и скорости нагружения обнаруживается при распрост-

ранении трещин. У конца трещины одновременно возникают трехосные растягивающие напряжения и происходит быстрое нагружение металла.

Многие перлитные стали при одноосном нагружении ведут себя как материалы пластичные, но при распространении трещин разрушение носит нередко хрупкий характер.

На использовании концентраторов напряжений и быстром нагружении, например при ударе, основана значительная часть методов испытания материалов для определения их склонности

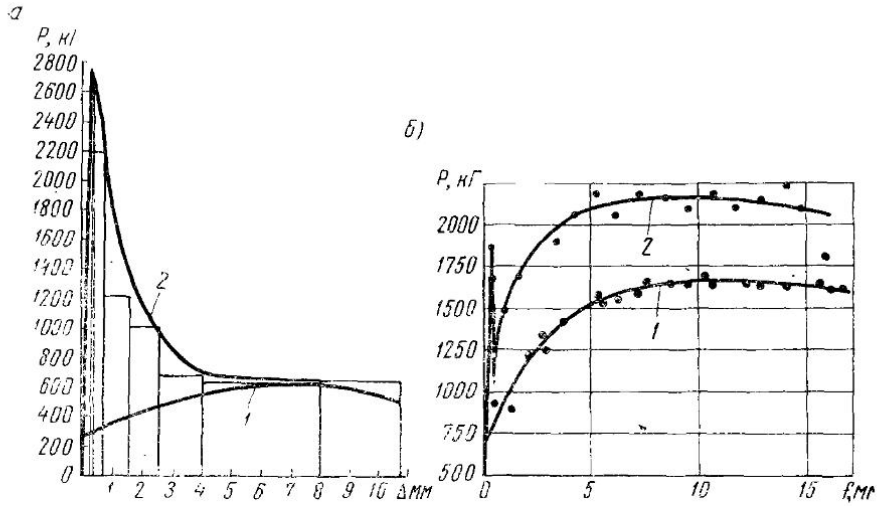


Рис. 11-2. Диаграммы растяжения (*а*) и изгиба (*б*) стали:
1 — статического; *2* — динамического; Δ — удлинение; *f* — стрела прогиба

к хрупким разрушениям. Наиболее распространено испытание металлов на ударную вязкость, когда по образцу с надрезом наносится удар маятником копра и определяется работа разрушения на 1 $см^2$ сечения образца. Строго говоря, величина ударной вязкости, выражаемая в $кГ \cdot м/см^2$, включает как работу изгиба образца, так и собственно работу разрушения металла, причем последняя нередко составляет меньшую часть величины полной работы.

Испытание на ударную вязкость широко используется для определения хладнохрупкости металлов (рис. 11-3). Падение ударной вязкости ниже 3 $кГ \cdot м/см^2$ в ряде нормативов устанавливается как недопустимое для надежной эксплуатации конструкции. По результатам ударных испытаний устанавливают так называемую критическую температуру $T_{кр}$, когда величина

ударной вязкости $a_н$ значительно уменьшается по сравнению с $a_н$ при комнатной T. На рис. 11-3 обе стали имеют четко выраженный диапазон температур, где наблюдается резкое падение $a_н$. Для сталей *1* и *2* они различны. В большинстве случаев спокойные стали менее склонны к хрупким разрушениям, чем кипящие, и имеют более низкую $T_{кр}$.

Имеется значительное количество других методов определения сопротивляемости сталей хрупкому разрушению; в большинстве своем они оценивают свойства металлов на стадии распространения трещины, а не в период ее образования (зарождения). Между тем в сварных конструкциях, для которых харак-

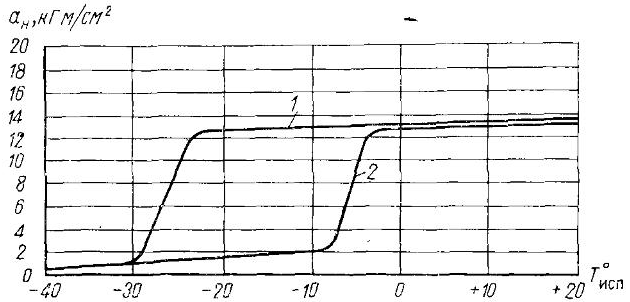


Рис. 11-3. Ударная вязкость стальных образцов в зависимости от температуры испытания:

1 — сталь спокойная; *2* — кипящая

терно локальное изменение свойств металла, важное значение имеют методы оценки сопротивляемости металла разрушению в период зарождения трещины от концентратора.

§ 2. ПРИЧИНЫ ХРУПКИХ РАЗРУШЕНИЙ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Очевидно, что сварным конструкциям свойственны те же причины хрупких разрушений, которые наблюдаются в металлоконструкциях вообще. Однако сварка вносит много специфического в хрупкие разрушения и процесс их распространения.

Наиболее характерными особенностями соединения сварных конструкций являются: а) изменение свойств металла под воздействием термического цикла сварки в сочетании с пластической деформацией; б) наличие концентраторов напряжений. Кроме того, значительное влияние на состояние металла оказывают остаточные напряжения.

Воздействие термического цикла сварки на металл многообразно. В зоне шва, где металл расплавляется, его свойства после сварки существенно зависят от химического состава образующе-

гося сплава. Он может изменяться за счет легирования, попадания вредных примесей и насыщения газами. Кристаллизация шва создает ориентированное расположение зерен металла, что оказывает, как правило, отрицательное влияние при разрушении. В процессе охлаждения возможен как рост зерна при медленном, так и закалка при быстром охлаждении. Механические свойства наплавленного металла зависят от совокупного воздействия этих факторов. В случае получения хрупкой наплавки сопротивляемость конструкции хрупкому разрушению может резко снизиться, так как наплавка может явиться началом разрушения всего сечения, включая и пластичные объемы металла. Хрупкие разрушения в виде горячих трещин могут возникнуть в процессе сварки (см. глава VIII).

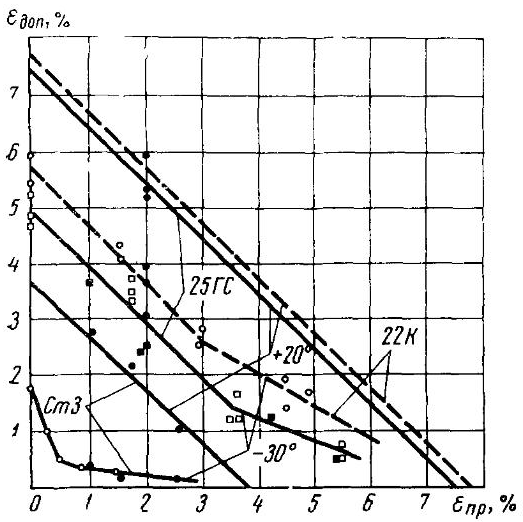


Рис. 11-4. Зависимость дополнительной деформации надрезанных образцов $\varepsilon_{доп}$ при температуре испытания от предварительной деформации $\varepsilon_{пр}$, созданной при температуре +20° С

светлые кружки и квадратики — предварительное нагружение в машине без последующей разгрузки, темные — предварительное нагружение путем создания пластических остаточных деформаций прокаткой

Во время остывания металл сокращается и в зоне пластических деформаций вследствие препятствия со стороны холодного металла возникают пластические деформации удлинения. Вне концентраторов пластические деформации в сталях обычно не превышают 1,5—2%. Если концентратор находится в зоне пластических деформаций, то величина деформации может возрасти в десятки и сотни раз. В этом случае даже при отсутствии других причин, снижающих пластичность металла, одна только пластическая деформация повышает напряжение в концентраторе до уровня, близкого к разрушающему. Вследствие объемности напряженного состояния в концентраторе для достижения разрушающих напряжений требуется меньшая деформация, чем на гладком образце. Таким образом, вследствие значительной деформации, вызванной концентрацией, а также вследствие объемности напряженного состояния бывает достаточно небольшого прираще-

ния деформации, например, от рабочих нагрузок, чтобы произошло разрушение без заметной пластической деформации.

На рис. 11-4 показана зависимость дополнительной деформации, которую необходимо сообщить образцу с надрезом при $T=20°$ С или $T=-30°$ С, от величины предварительной деформации, созданной при температуре $+20°$ С. Оказывается, что предварительная деформация при комнатной температуре существенно снижает деформацию, необходимую для разрушения образца при пониженной температуре.

Перлитные стали склонны к деформационному старению, которое сильно изменяет свойства металла, снижая его пластичность. Так как металл при сварке испытывает пластическую деформацию и в течение некоторого времени пребывает при температурах 150—300° С, когда интенсивно протекают процессы старения, то пластичность металла в концентраторах понижается еще заметнее. Нередко процессы старения играют решающую роль в наступлении хрупких разрушений.

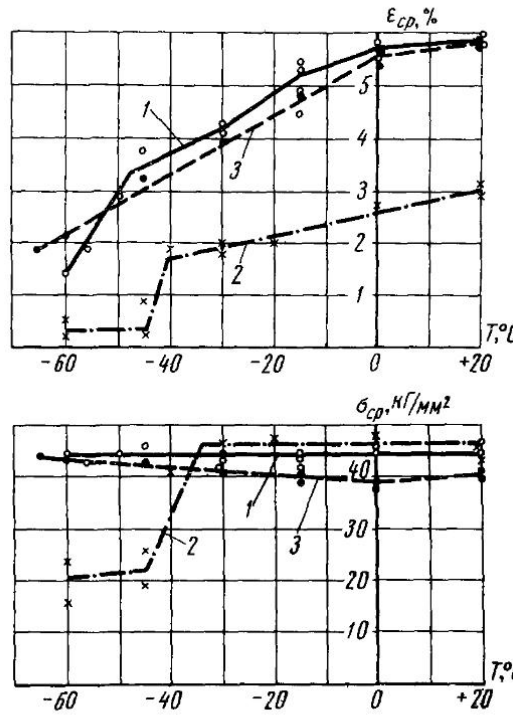


Рис. 11-5. Влияние деформационного старения и высокого отпуска на прочность и пластичность образцов с надрезами из стали 15ХСНД.

1 — исходное состояние, *2* — деформационное старение в течение 3 *ч* при $T=250°$ С после предварительной средней деформации 1% на образцах с надрезом, *3* — после деформационного старения и последующего отпуска в течение 3 *ч* при $T=650°$ С

На рис. 11-5 представлены результаты испытаний специальных образцов с надрезами (см. рис. 9-3) в исходном состоянии и после предварительной пластической деформации металла около 1% в зоне концентратора и деформационного старения при $T=250°$ С в течение 3 *ч*. Старение вызвало дополнительное снижение средней пластичности примерно на 2% и хрупкие разрушения при температурах ниже $-40°$ С при средних напряжениях, меньших предела

текучести. Очевидно, что в зоне, где протекают пластические деформации удлинения, одновременно действуют и растягивающие собственные напряжения. Значение их при возникновении хрупкого разрушения состоит в том, что во-первых, при добавлении малых нагрузок возникает дополнительная пластическая деформация вследствие суммирования напряжений, а, во-вторых, после наступления разрушения собственные напряжения, снимаясь, освобождают накопленную энергию, необходимую для распространения разрушения.

Известны многочисленные примеры разрушений сварных конструкций, когда по достаточно пластическому металлу разрушение распространялось лишь потому, что началось от концентратора, находившегося в зоне пластических деформаций, и растягивающих остаточных напряжений. Сферический резервуар (газгольдер) диаметром 11,7 *м* с толщиной стенки 16,5 *мм* был рассчитан на рабочее давление 50 *ат*, а разрушился при 3,5 *ат* при резком снижении температуры воздуха до —12° С, одна сторона газгольдера была освещена солнцем. Считают, что разрушение, вероятно, началось от места перехода сферической части к смотровому люку в связи с большой концентрацией напряжений. Известны также случаи разрушения сварных станин прессов, которые начинались от различных концентраторов (места остановки электрошлакового процесса, непровары, резкие закругления от газовой резки). Разрушения происходили в сварных судах, резервуарах, трубопроводах и вагонах.

Распространенной причиной начала хрупких разрушений сварных конструкций является усталость металла в зоне концентраторов напряжений. Для сварных конструкций вообще характерны более резкие конструктивные очертания, чем, например, для литых или для конструкций, полученных путем механической обработки. Усталостные трещины, образующиеся в вязком металле, распространяются медленно. При низкой температуре, когда сталь обладает бóльшей хрупкостью, усталостное разрушение, возникшее от концентратора, может распространиться как хрупкое на значительные расстояния.

По количеству хрупких разрушений, зарегистрированных в сварных конструкциях, на первом месте находятся разрушения, возникшие от концентраторов, расположенных в зоне сварки, где протекали значительные пластические деформации, возникали трехосные остаточные напряжения и происходило старение металла. Значительная часть хрупких разрушений была вызвана усталостными трещинами, возникшими от различных концентраторов, характерных для сварных конструкций, в период, когда металл находился при пониженных температурах и обладал пониженной сопротивляемостью распространению хрупких разрушений.

Некоторая часть разрушений зарегистрирована как возникшая от участков металла с низкими пластическими свойствами вследствие загрязнения металла и плохой защиты его в нагретом состоянии.

Распространение разрушений на значительные расстояния (за пределы зон пластических деформаций от сварки), как правило, происходило вследствие недостаточно высоких механических свойств металла в отношении хрупкости и в какой-либо зависимости от условий сварки не находилось. Наоборот, известны многочисленные случаи, когда хрупкая трещина останавливалась, встречая на своем пути вязкий наплавленный металл шва.

Хрупкие разрушения с трещинами, протяженность которых была значительна и определялась влиянием сварки, сравнительно малочисленны. Это разрушения вдоль сварных соединений, выполненных электрошлаковой сваркой, по зоне крупного зерна, разрушения вдоль швов, выполненных в жестком контуре, когда от поперечной усадки возникали значительные растягивающие напряжения, так называемые холодные трещины (отколы), располагающиеся вдоль сварных соединений легированных сталей.

Остаточные растягивающие напряжения оказывают отрицательное влияние главным образом при наличии концентраторов. При разгоне и распространении трещины в пределах зоны пластических деформаций потенциальная энергия остаточных напряжений переходит в кинетическую.

В подавляющем большинстве случаев надлежащее конструктивное оформление сварных соединений, достаточно высокое качество наплавленного металла и технологического процесса сварки в целом обеспечивают отсутствие хрупких разрушений сварных конструкций. Современные технологические процессы позволяют получать высокую ударную вязкость металла шва и околошовных зон. В некоторых случаях это достигается дополнительной нормализацией и высоким отпуском сварных конструкций.

§ 3. ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ УДАРЕ

Хрупкость металлов наиболее сильно проявляется при ударных нагрузках. Поэтому большинство методов для оценки сопротивляемости сварных соединений хрупким разрушениям основано на применении удара. Распространено испытание металла шва и зон сварных соединений на ударную вязкость. Надрез располагается в зоне, где производится определение свойств металла. Применение сварочных проволок соответствующего химического состава, защитных инертных газов, флюсов и обмазок при электродуговой и электрошлаковой сварке позволяют практически получать наплавленный металл шва, не

уступающий по ударной вязкости основному металлу, а нередко и превосходящий его. Таких результатов удается достигнуть при сварке низкоуглеродистых, низколегированных и аустенитных сталей, а также специальных сталей и сплавов. Ударная вязкость швов колеблется при комнатных температурах в пределах от 8 до 25 $кГ \cdot м/см^2$.

Ударная вязкость околошовных зон зависит от химического состава и свойств основного металла, а также от термического цикла сварки. Наиболее распространенными случаями снижения ударной вязкости околошовных зон в сварных соединениях являются перегрев металла, вызывающий рост зерна, закалка и старение. Перегрев чаще наблюдается в электрошлаковых сварных соединениях и может вызвать весьма значительное понижение ударной вязкости. Восстановление ударной вязкости достигается применением закалки или нормализации сварного соединения. Для повышения пластических свойств металла в зонах закалки назначают отпуск сварных конструкций. Одновременно достигается снижение остаточных напряжений.

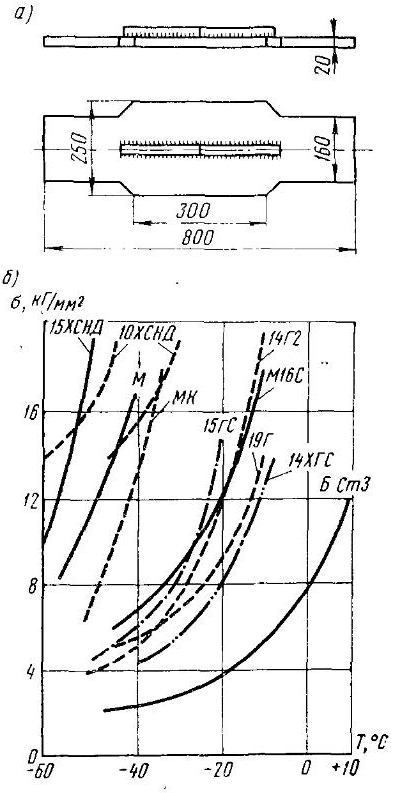


Рис. 11-6. Завнсимость напряжений, вызывающих хрупкие разрушения, от температуры:

а) образец для испытаний; *б*) результаты испытаний

Сварные соединения и конструкции без значительных концентраторов напряжений хорошо сопротивляются ударным нагрузкам, в том числе и при отрицательных температурах, при условии достаточно высокого качества исходного основного металла и соответствующего технологического процесса сварки. Для оценки качества сварных соединений при низких температурах и ударных нагрузках разработаны различные специальные методы испытаний. В частности, на рис. 11-6, *а* представлен образец Института электросварки им. Е. О. Патона. Ребро образца состоит из двух частей, приваренных угловыми швами к целой пластине. Наличие узкой щели

в ребре приводит к концентрации напряжений, а процесс сварки создает ряд дополнительных неблагоприятных влияний, связанных с наличием концентратора. При растяжении до определенного напряжения и дополнительном ударе со стороны, противоположной ребру, образцы хрупко разрушались. Причем в зависимости от температуры и марки стали разрушения происходили при различных растягивающих напряжениях (рис. 11-6, *б*). Результаты испытаний указывают на существенную зависимость прочности сварных образцов при ударе от марки стали.

Различные испытания сварных образцов при ударе свидетельствуют о значительном влиянии состояния и свойств зоны, где ожидается начало разрушения, на прочность конструкции в целом. Если основной металл при температуре испытания имеет свойства, при которых возможны хрупкие и квазихрупкие формы его разрушения, то зона начала разрушения имеет решающее значение для прочности конструкции. Хрупкие локальные зоны, острые концентраторы, являясь очагами начала разрушений, резко понижают прочность сварных конструкций в таких условиях. При их отсутствии вызвать начало разрушения даже при ударных нагрузках удается лишь после значительных пластических деформаций металла.

Если основной металл при температуре испытания разрушается вязко, то отрицательное влияние хрупких зон и острых надрезов ослабевает. Начавшиеся разрушения, как правило, останавливаются, входя в вязкий основной металл.

В инженерной практике ударный характер приложения нагрузок учитывается путем введения в расчет различных динамических коэффициентов, устанавливаемых специальными испытаниями или на основе эксплуатации опытных конструкций. Такой метод расчета прочности весьма условный.

§ 4. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ХРУПКИХ РАЗРУШЕНИЙ

Очевидно, что предупреждение хрупких разрушений может быть осуществлено устранением причин, их вызывающих. По отношению к сварным конструкциям основными путями повышения их сопротивляемости хрупким разрушениям являются следующие:

1. Конструктивное оформление отдельных элементов, уменьшающее концентрацию как рабочих напряжений в процессе эксплуатации, так и остаточных в процессе изготовления сварных конструкций.

На рис. 11-7, *а* дан пример двутавровой балки из стали ВСт. 3кп, в которой после заварки стыкового шва самопроизвольно разрушилась стенка. Концентратор напряжений в виде угла выреза располагался на расстоянии 15 *мм* от шва и попадал в зону пластических деформаций и повышенных температур.

Между тем оформление выреза, как показано на рис. 11-7, *б*, позволило бы избежать концентрации пластических деформаций.

2. Назначение последовательности сборочно-сварочных операций и технологических приемов выполнения сварных соединений, исключающих резкие концентраторы напряжений в зоне пластических деформаций, в том числе дефекты в виде непроваров, трещин, несплавлений, подрезов и т. п. На рис. 11-8 приведен пример сопряжения двух уголков анкерной опоры электропередачи, которая разрушилась при $T = -50°$ С. Сопрягаемые уголки своими торцами плотно примыкали друг к другу и перекрывались уголковой накладкой. Стык уголков имел непровар, от которого и началось разрушение. Аналогичное пересечение швов

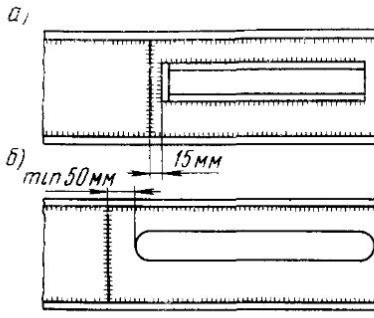


Рис. 11-7. Узел несущей балки двутаврового сечения:
а) нерациональный; *б*) рациональный

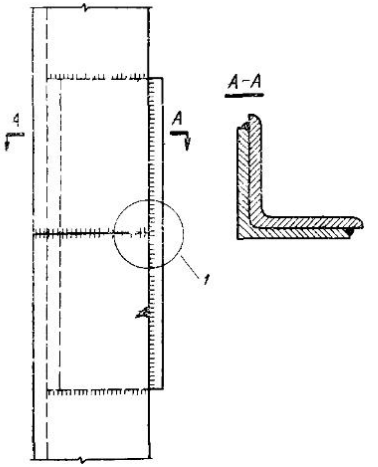


Рис. 11-8. Монтажный стык анкерной угловой опоры:
1 — очаг разрушения

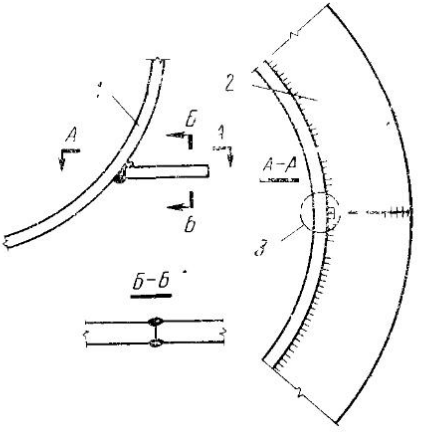


Рис. 11-9. Узел крепления горизонтального ребра жесткости к обечайке резервуара:
1 — оболочка резервуара; *2* — упорное кольцо; *3* — очаг разрушения

(рис. 11-9), из которых один шов в кольце имел непровар, явилось очагом разрушения сферического резервуара. При понижении температуры воздуха были обнаружены трещины, иду-

щие от непроваренных стыков кольца. Обеспечение полного провара устраняло опасные концентраторы напряжений.

3. Применение присадочных металлов и режимов сварки, обеспечивающих высокую пластичность и вязкость металла швов при низких температурах.

4. Выбор основного металла для сварных конструкций, работающих при низких температурах, исходя из двух главных условий: слабой склонности металла к деформационному старению и достаточно высокой его сопротивляемости распространению разрушений при температурах эксплуатации изделия.

5. Применение термической обработки сварных деталей после сварки.

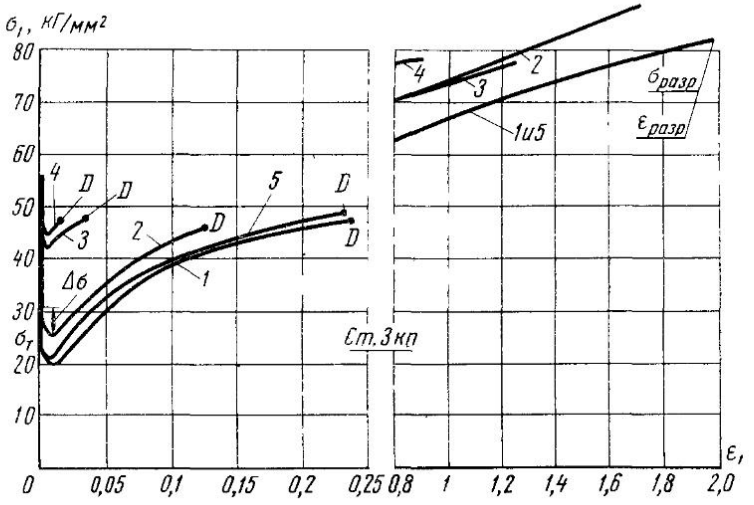


Рис. 11-10. Диаграммы зависимости действительного напряжения σ_1 от действительной деформации ε_1 для стали Ст. 3кп:

участок до точки *Д* — равномерная пластическая деформация; *1* — исходное состояние после горячей прокатки; *2* — то же, при температуре испытания — 60° С; *3* — деформационное старение (пластическая деформация 10%, выдержка при T=250° С 3 *ч*, температура испытания +20° С; *4* — то же, что и 3, при температуре —60° С; *5* — после деформационного старения и высокого отпуска

Применение высокого отпуска. Высокий отпуск является эффективным средством, позволяющим восстановить пластические свойства металла, утраченные в результате закалки, протекания пластических деформаций или старения металла. При этом происходит выравнивание пластических свойств по сечению детали. Одновременно общий высокий отпуск значительно снижает остаточные напряжения и тем самым устраняет потенциальную энергию, накопленную конструкцией при сварке.

Снимая остаточные растягивающие напряжения, отпуск в некоторой мере может повысить сопротивляемость конструкций началу хрупких разрушений, возникающих вследствие усталости, а также повысить сопротивляемость распространению разрушений вследствие уменьшения потенциальной энергии. Местный отпуск применяется главным образом как средство восстановления пластичности металла.

Положительное влияние высокого отпуска можно проследить на примере восстановления вида диаграммы $\sigma_1 = f(\varepsilon_1)$ после того, как был проведен высокий отпуск металла, прошедшего перед этим деформационное старение (рис. 11-10), а также на примере восстановления прочности и пластичности после отпуска надрезанных образцов, прошедших деформационное старение (см. рис. 11-5).

Применение нормализации или закалки с отпуском. Использование указанных операций оправдывается тем, что они заметно повышают сопротивляемость перлитных сталей хрупким разрушениям при низких температурах. В табл. 11.1 приведены значения ударной вязкости ряда сталей в трех состояниях: горячекатаном, нормализованном и закаленном при положительных и отрицательных температурах. Металл, прошедший закалку с отпуском, обладает наибольшей величиной ударной вязкости при отрицательных температурах.

Таблица 11.1

Величина ударной вязкости для некоторых сталей в различном состоянии

Марка стали	Состояние стали	Ударная вязкость $a_н$, кГ · м/см² при температуре испытания, °С		
		+20	−40	−60
Сталь 20	Горячекатаная;	11,0	3,0	0,5
	нормализованная;	18,0	11,0	3,0
	закалка с отпуском	24,0	20,0	16,0
Сталь 45	То же	1,5	0,5	0,4
		5,0	3,5	1,5
		11,0	7,0	4,5
Сталь 15ХСНД	"	11,0	1,0	0,5
		15,0	12,0	9,0
		18,0	14,0	10,0

ГЛАВА XII

КОНСТРУКТИВНАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

§ 1. ПОНЯТИЕ О КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ

Вопрос о том, какое явление следует принимать в качестве признака наступления предельного состояния при оценке прочности конструкции, в научной литературе освещен слабо. При расчетах на прочность могут быть приняты следующие предельные состояния: а) наступление текучести металла, б) нарастание пластических деформаций без повышения нагрузки (для одноосного растяжения гладкого стержня это соответствует достижению $\sigma_в$), в) наступление разрушения (появление первых трещин и макронесплошностей в металле), г) распространение разрушения с разделением конструкции на части, д) потеря устойчивости и некоторые другие.

Расчет на прочность при статической нагрузке, когда сопоставляют $\sigma_т$ с напряжениями, действующими в конструкции, строго говоря, не является расчетом на прочность, так как он не рассматривает разрушение металла, а ограничивает наступление текучести в нем. Тем не менее, наступление текучести в элементе весьма часто принимается как предельное состояние при оценке прочности конструкций, работающих под статическими или мало изменяющимися нагрузками.

Естествен вопрос, для каких материалов и типов конструкций следует использовать те или иные предельные состояния при оценке статической прочности сварных конструкций. Для конструкций из пластичных металлов, если пластичность не утрачивается в результате технологических операций, процессов старения, напряженного состояния или снижения температуры, предельным состоянием обычно считают наступление текучести в расчетном элементе без учета концентрации напряжений. Такой подход является оправданным потому, что пластичный металл оказывается способным воспринять значительную

пластическую деформацию в концентраторах без разрушения, прежде чем наступит текучесть элемента в целом. Например, расчет комбинированных сварных соединений (с лобовыми, фланговыми и тавровыми швами) предполагает, что металл швов способен перенести без разрушения такие пластические деформации, благодаря которым сварное соединение передает нагрузку равномерно через все свои составные элементы.

Для конструкций и отдельных элементов из пластичных металлов, не имеющих значительных концентраторов напряжений, для которых изменение начальных размеров в результате пластических деформаций допустимо, в качестве предельного состояния иногда принимают $\sigma_в$ (для одноосных растяжений) или максимально возможное давление p_{max} (в сосудах), когда пластические деформации нарастают без повышения нагрузки. Это возможно потому, что при достаточной пластичности металла и незначительных концентраторах напряжения в основном несущем элементе могут достигнуть $\sigma_в$ прежде, чем в зоне концентрации будет достигнуто истинное разрушающее напряжение $\sigma_{др}$ и наступит разрушение. Такой метод оценки предельной прочности применяется иногда для стержней и сосудов, работающих под внутренним давлением.

Оценка прочности конструкций из металлов малопластичных и непластичных является более сложной задачей. Для таких металлов характерно сближение величин $\sigma_в$ и $\sigma_т$ и резкое повышение чувствительности металла к концентрации напряжений. Становится весьма существенным влияние на прочность таких факторов, как конструктивные формы, технология изготовления и условия нагружения конструкции. Попытки использовать для малопластичных металлов в качестве предельных состояний наступление текучести или тем более достижение $\sigma_в$ неоднократно приводили к крупным просчетам в оценке действительной прочности конструкций из подобных материалов. Разрушения в концентраторах наступали до того, как в основных несущих сечениях конструкции достигалось $\sigma_т$, не говоря уже о $\sigma_в$. При оценке прочности конструкций из малопластичных металлов предельным состоянием следует считать наступление разрушения в наиболее опасной точке конструкции. Величина средних напряжений в расчетных сечениях при этом может оказаться существенно меньше $\sigma_т$, если в конструкции имеются острые концентраторы или зоны с резко пониженными пластическими свойствами металла.

Аналогичное положение наблюдается при работе конструкций под переменными нагрузками. Разрушение металла в зоне концентрации напряжений наступает при средних напряжениях, меньших $\sigma_т$. Попытки расчета конструкций под переменную нагрузку по предельному состоянию наступления текучести при статическом нагружении оказались несостоятельными: конструк-

ции, рассчитанные по такому методу, нередко разрушались, вызывая аварии.

Лишь переход к предельному состоянию, при котором используется наступление разрушения от переменных нагрузок (появление усталостной трещины), вывел конструкторов на правильный путь оценки действительной прочности. Аналогичная картина наблюдается в настоящее время при расчете конструкций, работающих при низких температурах, когда пластичный при комнатных температурах металл становится малопластичным при отрицательных температурах.

Сварные конструкции обычно содержат различные по форме и остроте концентраторы, имеют зоны с разнообразными свойствами металла. Учет всего многообразия указанных факторов чрезвычайно усложняет расчеты. Во внимание принимаются лишь основные из них. Поэтому оказывается, что даже при правильно выбранном для расчета конструкции предельном состоянии реальная или конструктивная прочность изделия может отклоняться в ту или иную сторону от расчетной. Под *конструктивной прочностью* обычно понимают прочность конструкции, получаемую в результате испытания при конкретных формах изделия, свойствах материала, характере действия нагрузок, среды и технологии изготовления.

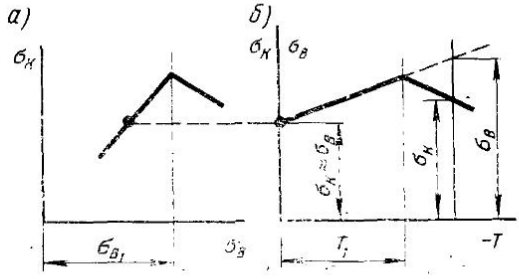


Рис. 12-1. Схематическая зависимость $\sigma_к$ от временного сопротивления $\sigma_в$ (*а*) и от температуры испытания T (*б*)

Стремление уменьшить вес конструкций заставляет создавать все более прочные материалы и использовать их при высоком уровне рабочих напряжений. При этом в качестве предельного состояния часто принимают такую нагрузку, когда дальнейшее нарастание пластических деформаций происходит без ее увеличения. (В случае одноосного нагружения это соответствует временному сопротивлению $\sigma_в$). Практика изготовления таких конструкций показала, что в ряде случаев имеется существенное расхождение между расчетной и конструктивной прочностью.

На рис. 12-1, *а*, составленном на основе опытных данных, показана зависимость прочности конструкции $\sigma_к$ от σ . Повышение прочности материала достигнуто различной термообработкой. Из рисунка видно, что зависимость $\sigma_к = f(\sigma_в)$ имеет максимум, и увеличение предела прочности сверх величины $\sigma_{в1}$ вызывает уже не возрастание, а резкое уменьшение прочности

конструкции $\sigma_к$. Это можно объяснить тем, что с ростом $\sigma_в$ растет чувствительность материала к концентрации напряжений, причем более резко это проявляется в условиях нагружения конструкции, а не образца, так как в конструкции неблагоприятное сочетание факторов, снижающих прочность, более вероятно, чем в образце.

Нечто аналогичное наблюдается для некоторых материалов с понижением температуры T (рис. 12-1, *б*). Несмотря на рост временного сопротивления при снижении температуры, конструктивная прочность падает. Это означает, что расчет по $\sigma_в$ теряет смысл, так как свойства материала конструкции, уровень примененной технологии и конструктивные формы изделия не обеспечивают достижения в конструкции этого уровня напряжений.

Если бы во внимание были приняты реальные свойства металла и концентраторы напряжения, а расчет был выполнен по предельному состоянию наступления разрушения, то столь значительного противоречия между расчетной и конструктивной прочностью не обнаружилось бы. Следует однако заметить, что расчет на прочность с учетом концентрации напряжений и локального изменения свойств материала в настоящее время разработан в незначительной мере и, по-видимому, на первых порах будет пригодным только для простейших конструкций.

Нередко возникает необходимость в определении запаса конструктивной прочности, найденной путем испытаний, по сравнению с нормальными эксплуатационными условиями нагружения до наступления предельного состояния. Этот запас может быть определен двумя способами. Первый способ заключается в сравнении напряжений или нагрузок, вызывающих наступление предельного состояния, с действующими в конструкции напряжениями или нагрузками при ее эксплуатации. Этот способ оценки наиболее распространен. Он отражает традиционный прием сравнения действующего напряжения с допускаемым напряжением или с пределом текучести металла и может использоваться, когда в качестве предельного состояния принимается наступление текучести в несущем расчетном элементе.

Однако, если в качестве предельного состояния при испытании конструкции принимается наступление разрушения или достижение $\sigma_в$, такой способ количественной оценки запаса конструктивной прочности оказывается малопригодным. Объясняется это тем, что зависимость между деформациями и напряжениями (рис. 12-2) за пределами упругости имеет нелинейный характер и сравнение напряжений между собой не отражает способности конструкции выдерживать пластические деформации без разрушения.

Более объективной является оценка запаса конструктивной прочности вторым способом — путем сравнения величины дефор-

мации несущего элемента, которая достигается в момент наступления предельного состояния, с деформацией металла в этом элементе, возникающей от действующих или расчетных нагрузок. Обоснованность такого подхода вытекает из того факта, что зависимость между напряжениями и деформациями имеет нелинейный характер и при $\sigma > \sigma_т$ большим изменениям деформаций соответствуют малые приращения напряжений (рис. 12-2).

Если в этой области производить оценку запаса по напряжениям, то окажется, что конструкции, разрушающиеся при

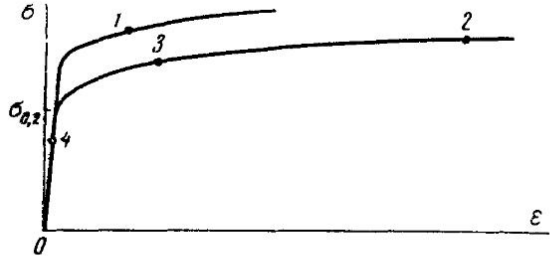


Рис. 12-2. Диаграммы зависимости σ от ε для различных металлов

напряжениях, соответствующих точкам *1* и *2*, имеют примерно одинаковый запас конструктивной прочности. Между тем известно, что конструкции, разрушающиеся после малой пластической деформации (точка *1*), обладают значительно меньшей надежностью, чем конструкции, разрушающиеся после большой пластической деформации (точка *2*).

Ухудшение свойств металла, переход к неблагоприятным схемам напряженного состояния, накопление повреждений в металле приводят, в первую очередь, к уменьшению деформационной способности и лишь затем к заметному падению разрушающих напряжений или нагрузок. При этом, как следует из рис. 12-2, переход из точки *2* в точку *3* вследствие уменьшения деформационной способности конструкции не вызывает заметного понижения напряжений, но приближает конструкцию к тому моменту, когда она будет разрушаться при напряжениях, меньших $\sigma_т$ (точка *4*). Сравнение между собой средних деформаций в несущем элементе конструкции отражает реальный запас деформационной способности, а следовательно, и конструктивной прочности.

Следует различать между собой такие понятия, как *предельное состояние, расчетное предельное состояние* и *предельное напряженное состояние.*

Расчетные предельные состояния могут включать несколько предельных состояний. Классификация, принятая в строительных нормах и правилах (СНиП), вводит три расчетных предельных состояния (см. главу IV).

Предельным напряженным состоянием называется такое напряженное состояние металла, которое соответствует либо началу его разрушения, либо наступлению текучести, либо возникновению иного физического процесса, почему-либо недопустимого, нежелательного или опасного.

§ 2. ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Экспериментальными исследованиями установлено, что для изотропных металлов зависимость истинного напряжения σ_i от истинной относительной деформации $*e_i$, полученная при одноосном растяжении, оказывается близкой к обобщенной зависимости $\sigma_i = f(e_i)$, не зависящей от схемы главных напряжений. Эквивалентное напряжение σ_i выражается через компоненты главных напряжений σ_1, σ_2, σ_3 следующим образом:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}. \qquad (12.1)$$

Соответственно эквивалентная деформация e_i может быть выражена через компоненты упругих и пластических составляющих, как

$$e_i = e_{i\,\text{упр}} + e_{i\,\text{пл}} = \frac{\sigma_i}{E} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{1\,\text{пл}} - e_{2\,\text{пл}})^2 + (e_{2\,\text{пл}} - e_{3\,\text{пл}})^2 + (e_{1\,\text{пл}} - e_{3\,\text{пл}})^2} \qquad (12.2)$$

Величина истинного напряжения $\sigma_{\text{разр}}$, при котором наступает разрушение металла при осевом растяжении, также может быть принята за характеристику прочности металла в данном состоянии вне зависимости от схемы напряженного состояния. Поэтому при анализе поведения металла при различных схемах напряженного состояния будем считать, что разрушение должно наступать тогда, когда наибольшее главное напряжение σ_1 достигнет величины $\sigma_{\text{разр}}$, вызывающей разрушение при осевом растяжении.

---

* Истинная относительная деформация $e_1 = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0}$ обладает свойством аддитивности (сложения) и удовлетворяет условию постоянства объема, т. е.

$$e_{1\text{пл}} + e_{2\text{пл}} + e_{3\text{пл}} = 0.$$

Влияние схемы главных напряжений на поведение металла можно проследить, используя зависимости $\sigma_i = f(e_{i\text{пл}})$, представленные сплошными линиями на рис. 12-3, *а*. Кривые выражают результаты испытаний высокопрочной стали при осевом растяжении, термически обработанной на различные $\sigma_в$ (*1* — после отжига; *2* — после закалки и низкого отпуска). Считая, что эти зависимости совпадают с обобщенными зависимостями $\sigma_i = f(e_{i\text{пл}})$, рассмотрим поведение металла в условиях двухосного растяжения при $\sigma_1 = 2\sigma_2$ и $\sigma_3 = 0$. Наибольшее главное напряжение σ_1 в этом случае согласно выражению (12.1) будет

$$\sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}\,\sigma_i.$$

Пластическая составляющая деформации того же направления $e_{1\,\text{пл}}$ может быть определена из выражения (12.2). Так как в пластической области изменение объема практически отсутствует, т. е.

$$e_{1\,\text{пл}} + e_{2\,\text{пл}} + e_{3\text{пл}} \approx 0 \text{ и } \mu = 0{,}5, \text{ то}$$

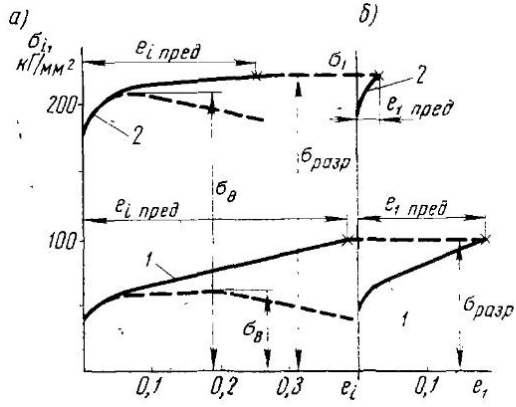


Рис. 12-3. Диаграммы зависимости напряжений от деформаций:

а) осевое растяжение; *б*) двухосное растяжение при $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0{,}5$

$$e_{2\,\text{пл}} \approx \frac{1}{E'}\,(\sigma_2 - \mu\sigma_1) = 0;\; e_{1\,\text{пл}} = \frac{\sqrt{3}}{2}\,e_{i\,\text{пл}},$$

где E' — секущий модуль.

Каждой точке на кривой $\sigma_i = f(e_{i\,\text{пл}})$ с координатами σ_i и $e_{i\text{пл}}$ соответствует точка на кривой $\sigma_1 = \varphi(e_{1\text{пл}})$ с координатами σ_1 и $e_{1\,\text{пл}}$ (рис. 12-3, *б*). С помощью такого пересчета на рис. 12-3, *б* построены зависимости $\sigma_1 = \varphi(e_{1\,\text{пл}})$ для состояний металла *1* и *2* при двухосном растяжении $\sigma_1 = 2\sigma_2$. Развитие пластических деформаций в этом случае начинается при более высоком напряжении, чем при осевом растяжении. Следовательно, вся кривая $\sigma_1 = \varphi(e_{1\text{пл}})$ пройдет выше, чем кривая $\sigma_i = f(e_{i\,\text{пл}})$. А так как разрушение должно наступать при одном и том же уровне истинного напряжения $\sigma_{разр}$, то предельная пластическая деформация $e_{i\,\text{пред}}$ окажется меньше, чем пластическая деформация $e_{i\,\text{пред}}$, получаемая при осевом растяжении. На рис. 12-3, *а, б* можно видеть, что при обработке стали на низкую прочность (кривая *1*) величины $e_{i\,\text{пред}}$ и $e_{1\,\text{пред}}$ различаются примерно

в 2 раза, тогда как при обработке на более высокую прочность (кривые 2) они различаются уже в 10 раз. Данные, получаемые путем такого аналитического построения зависимостей $\sigma_1 = f(e_{1\,пл})$, подтверждаются измерениями величин $e_{i\,пред}$ и $e_{1\,пред}$ при нагружении образцов осевым растяжением и тонкостенных цилиндрических сосудов внутренним давлением.

Рассмотренный пример наглядно показывает, что уменьшение пластичности металла, вызываемое более жесткой схемой главных напряжений, существенно зависит от характера диаграммы $\sigma_i = f(e_i)$. Для рассмотрения этого вопроса в более общем виде используем апроксимацию зависимости $\sigma_i = f(e_{i\,пл})$ в виде степенной функции

$$\sigma_i = A e_{i\,пл}^{n}, \tag{12.3}$$

где A и n — коэффициенты, постоянные для данного состояния металла.

Графическое изображение зависимостей $\frac{\sigma_i}{A} = e_{i\,пл}^{n}$ для различных n дано на рис. 12-4.

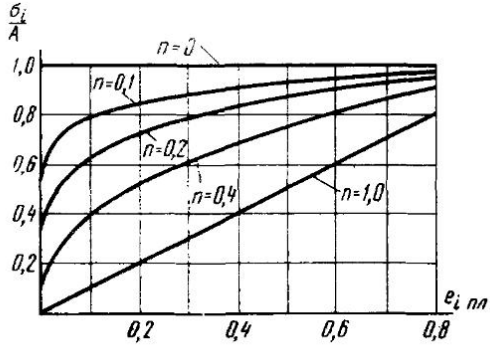


Рис. 12-4. Зависимость $\frac{\sigma_i}{A}$ от $l_{i\,пл}$ для различных n

Показатель степени упрочнения n углеродистых и низколегированных сталей имеет значения 0,25÷0,3 для состояния отжига, а после обработки на высокую прочность (закалка и низкий отпуск) снижается до 0,05÷0,03. Таким образом, для конкретного материала повышение прочности обычно сопровождается уменьшением величины показателя n.

Рассмотрим общий случай двухосного растяжения ($\sigma_3 = 0$), обозначив отношение компонентов напряжений $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = m$ при $0 \leqslant m \leqslant 1$. Из уравнения (12.1) получим

$$\sigma_i = \sigma_1 \sqrt{1 - m + m^2}. \tag{12.4}$$

В пластической области $\mu = 0{,}5$

$$e_{i\,пл} \approx \frac{\sigma_i}{E'} = \frac{\sigma_1}{E'} \sqrt{1 - m + m^2};$$

$$e_{1\,пл} \approx \frac{1}{E'} (\sigma_1 - 0{,}5\,\sigma_2) = \frac{\sigma_1}{2E'} (2 - m),$$

откуда

$$e_{i\,\text{пл}} = \frac{2e_{1\,\text{пл}}}{2-m}\sqrt{1-m+m^2}.$$

Подставив это выражение в уравнение $\sigma_i = Ae_{i\,\text{пл}}^{n}$ и приравняв его выражению (12.4), получим

$$\sigma_1\sqrt{1-m+m^2} = A\left(\frac{2}{2-m}\right)^n (1-m+m^2)^{n/2} e_{1\,\text{пл}}^n,$$

откуда

$$\sigma_1 = A\left(\frac{2}{2-m}\right)^n (1-m+m^2)^{\frac{n-1}{2}} e_{1\,\text{пл}}^n. \qquad (12.5)$$

При $\sigma_1 = \sigma_{\text{разр}}$ пластическая деформация достигнет предельного значения $e_{1\,\text{пл}} = e_{1\,\text{пред}}$. Такому же напряжению при осевом растяжении этого материала соответствует деформация $e_{i\ \text{пред}}$. Приравнивая выражения $\sigma_{\text{разр}} = Ae_{i\ \text{пред}}^n$ и (12.5), имеем

$$A\left(\frac{2}{2-m}\right)^n (1-m+m^2)^{\frac{n-1}{2}} e_{1\,\text{пред}}^n = Ae_{i\ \text{пред}}^n,$$

откуда

$$\frac{e_{1\,\text{пред}}}{e_{i\ \text{пред}}} = \frac{2-m}{2}(1-m+m^2)^{\frac{1-n}{2n}}. \qquad (12.6)$$

Графическое изображение зависимости (12.6) в координатах $\frac{e_{1\,\text{пред}}}{e_{i\ \text{пред}}}$ и m дано на рис. 12-5 для трех значений n. Можно видеть, что в зависимости от состояния металла, характеризуемого показателем степени упрочнения n, реакция металла на двухосное растяжение оказывается различной. Если при $n=0{,}3$ двухосное растяжение существенного снижения пластичности не вызывает, то при $n=0{,}05$ резкое снижение величины $\frac{e_{1\,\text{пред}}}{e_{i\ \text{пред}}}$ имеет место в широком интервале соотношений компонентов напряжений σ_1 и σ_2. Изменение отношения $\frac{e_{1\,\text{пред}}}{e_{i\ \text{пред}}}$ в зависимости от величины показателя степени упрочнения n можно получить, подставляя в выражение (12.6) конкретное значение m. Например, в случае нагружения цилиндрического тонкостенного сосуда внутренним давлением, когда $m=0{,}5$, получаем зависимость

$$\frac{e_{1\,\text{пред}}}{e_{i\ \text{пред}}} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^{\frac{n+1}{n}}, \qquad (12.7)$$

показанную на рис. 12-6. Из рисунка видно, что с уменьшением n величина отношения $\frac{e_{1\text{ пред}}}{e_{i\text{ пред}}}$ резко падает и в интервале $0 \leqslant n < 0{,}05$ становится ничтожно малой. Это означает, что обработанный на высокую прочность материал (n мало) в значительной степени теряет способность пластически деформироваться перед разрушением в условиях двухосного растяжения, когда $\sigma_1 = 2\sigma_2$, $\left(\frac{e_{1\text{ пред}}}{e_{i\text{ пред}}}\right.$ ничтожно$\left.\right)$, даже если он имеет высокую пластичность при осевом растяжении ($e_{i\text{ пред}}$ велико). С появлением третьего растягивающего компонента напряжений σ_3 снижение способности материала пластически деформироваться перед разрушением проявляется еще сильнее.

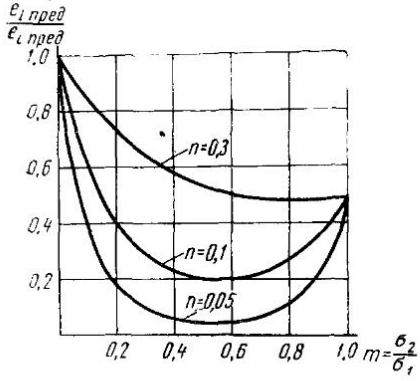


Рис. 12-5. Зависимость $\frac{e_{1\text{ пред}}}{e_{i\text{ пред}}}$ от соотношения компонентов $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ при двухосном растяжении для различных n

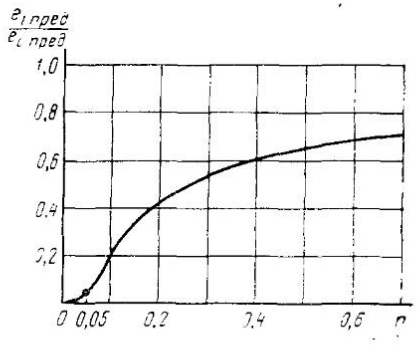


Рис. 12-6. Зависимость $\frac{e_{1\text{ пред}}}{e_{i\text{ пред}}}$ от n для цилиндрического сосуда, работающего под внутренним давлением, когда $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0{,}5$

На рис. 12-7 в пространственных координатах представлены зависимости величины $\frac{e_{1\text{ пред}}}{e_{i\text{ пред}}}$ от отношений σ_2/σ_1 и σ_3/σ_1, построенные для значений $n = 0{,}3$, $n = 0{,}1$ и $n = 0{,}05$. Как видно из рисунка, при $n = 0{,}3$ разрушение без пластической деформации может возникать только при максимально жесткой схеме напряжений с равными растягивающими компонентами $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (разумеется, упругая деформация при этом возникает). Однако по мере снижения величины n (обработка на более высокую прочность) область соотношений компонентов напряжений, спо-

собных вызвать хрупкое разрушение, существенно расширяется (на рис. 12-7 заштрихована). Так, при $n=0{,}05$ наличие даже небольшой величины третьего растягивающего компонента может предопределить хрупкий характер разрушения. Таким образом, неблагоприятное изменение деформационной характеристики металла $\sigma_i=f(e_i)$ в условиях двухосного и трехосного растяжения может проявляться весьма резко.

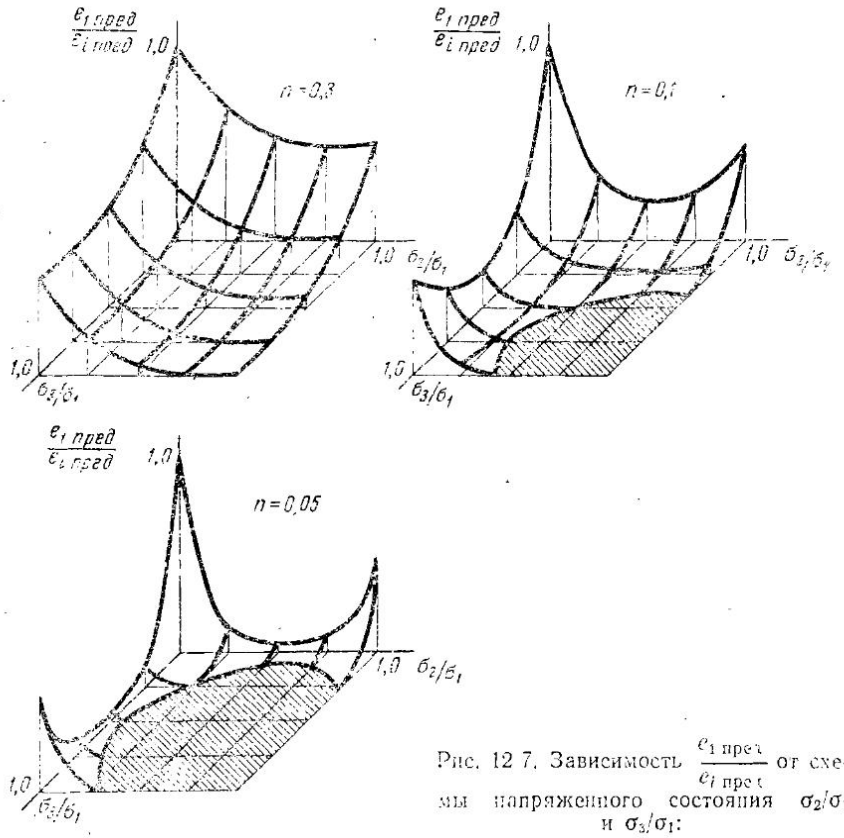


Рис. 12-7. Зависимость $\frac{e_1\,пред}{e_i\,пред}$ от схемы напряженного состояния σ_2/σ_1 и σ_3/σ_1:
а) при $n=0{,}3$; *б*) при $n=0{,}1$; *в*) при $n=0{,}05$

§ 3. ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

Схема напряженного состояния и характер зависимости $\sigma_i=f(e_i)$ влияют на изменение величины пластической деформации металла, предшествующей разрушению. При этом во всех случаях величина максимального разрушающего напряжения оказывается неизменной, и казалось бы конструктивная

прочность не должна снижаться. Это было бы справедливо, если бы в конструкциях совершенно отсутствовали различного рода концентраторы напряжений. В реальных конструкциях, в том числе и в сварных, имеются многочисленные концентраторы.

Допустим, что имеется концентратор, острота которого при пластической деформации оценивается коэффициентом K_e, указывающим, во сколько раз величины деформации металла у вершины концентратора больше величины средней пластической деформации металла в зоне без концентратора. Тогда разрушение металла в концентраторе произойдет при средней деформации металла вне зоны концентратора $\frac{e_{разр}}{K_e}$. При этом очевидно, чем меньше пластичность металла, т. е. $e_{разр}$, тем меньше $\frac{e_{разр}}{K_e}$. Последняя величина может оказаться, например, меньше $e_т$, и тогда разрушение будет происходить, когда среднее напряжение еще не достигнет $\sigma_т$.

Как указывалось выше, уменьшение величины предельной упруго-пластической деформации $e_{пред}$, по сравнению с одноосным растяжением, зависит от схемы напряженного состояния и показателя степени упрочнения n.

При наличии концентраторов в конструкции разрушение будет наступать при значениях средней деформации $\frac{e_{пред}}{K_e}$, что фактически означает понижение запаса конструктивной прочности, по сравнению с одноосным нагружением. Например, при испытании внутренним давлением цилиндрических обечаек диаметром 120 *мм* без концентраторов из стали СП-28 толщиной $s=1$ *мм* разрушение происходит при окружной упруго-пластической деформации $e_{пред}=0{,}015—0{,}018$. После того как в трех цилиндрических обечайках были просверлены круглые сквозные отверстия диаметром 1,85 *мм*, значение равномерной упруго-пластической окружной средней деформации к моменту разрушения обечаек упало в 1,5 раза *.

Неоднородность механических свойств обычно способствует локализации пластических деформаций. Ее влияние по форме своего проявления иногда сходно с действием концентраторов.

§ 4. ВЛИЯНИЕ ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

При понижении температуры происходит изменение диаграммы $\sigma_i=f(e_i)$. В частности, у низкоуглеродистых и низколегированных сталей с понижением T повышается предел текуче-

* Перед испытанием обечаек внутренним давлением отверстия заклеивались резиной.

сти металла, уменьшаются величина предельной деформации до разрушения, величина равномерной деформации до образования шейки и показатель степени упрочнения (рис. 12-8). Все указанные изменения диаграммы $\sigma = f(\varepsilon)$ приводят при наличии концентраторов к уменьшению запаса конструктивной прочности, если его оценивать по величине упруго-пластической деформации металла до разрушения. С понижением температуры увеличивается так называемый зуб текучести, величина $\Delta\sigma$ (см. рис. 11-10). Углеродистые стали становятся чувствительными к скорости нагружения. Не учитывать этот фактор нельзя, так как это может привести к понижению конструктивной прочности.

В главе XI были приведены примеры отрицательного влияния пониженной температуры при наличии концентраторов на-

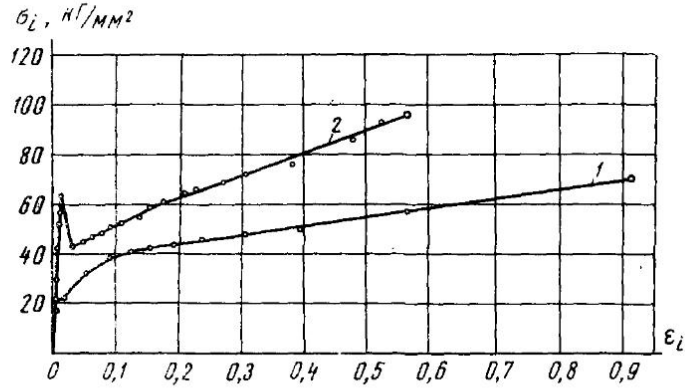


Рис. 12-8. Диаграммы зависимости напряжений от деформаций при различных температурах у стали Ст. 3:
1 — при $T = 20°$ С; *2* — при $T = -196°$ С

пряжений (см. рис. 11-5). Характерно, что в исходном состоянии и после отпуска величина $\varepsilon_{ср}$ с понижением температуры непрерывно падает, хотя среднее разрушающее напряжение $\sigma_{ср}$ сохраняется неизменным или даже повышается.

В образцах, прошедших деформационное старение (см. рис. 11-5), прочность до некоторой температуры сохраняет свое значение, хотя деформация непрерывно уменьшается. Когда средняя деформация становится соизмеримой с величиной, соответствующей пределу текучести металла, происходит также заметное снижение прочности.

Известны многочисленные случаи разрушений сварных конструкций (сварных судов, резервуаров, мостов), которые проис-

ходили под влиянием нескольких неблагоприятных факторов, но непосредственной причиной таких разрушений, как правило, оказалась пониженная температура.

§ 5. ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ

Как указывалось в главе IX, упруго-пластическая деформация в концентраторах, вызванная технологическими операциями, суммируется с упруго-пластическими деформациями, возникающими при нагружении конструкции рабочими нагрузками (см. рис. 9-4). Очевидно, что с увеличением предварительной деформации металла, возникающей до приложения рабочих нагрузок, уменьшается запас конструктивной прочности изделия, оцениваемый по величине упруго-пластической деформации до разрушения.

В случае пластичных металлов с достаточно высокими значениями показателя степени упрочнения n предварительная деформация от технологических операций обычно не снижает разрушающих нагрузок, если они прикладываются при положительных температурах. Предварительная деформация, если она возникает в металлах с неблагоприятным видом диаграммы $\sigma_i = f(e_i)$, может в ряде случаев вызвать также и снижение средних разрушающих напряжений. Однако пластическая деформация в сварных конструкциях из низкоуглеродистых и низколегированных сталей без сочетания с другими неблагоприятными факторами обычно не представляет серьезной опасности для прочности. Основное отрицательное влияние пластической деформации проявляется при наличии концентраторов и в особенности тогда, когда пластическая деформация является предпосылкой для интенсивного протекания процессов старения.

Деформационное старение приводит к коренным изменениям деформационной характеристики металла $\sigma = f(e)$. На рис. 11-10 (левая часть) сравниваются характеристики Ст. 3кп на участке до образования шейки (до точки D) в исходном состоянии при температурах $+20°$ С и $-60°$ С и после деформационного старения (пластическая деформация — 10%, выдержка при $T = 250°$ С в течение 3 ч) при тех же температурах. Предел текучести после указанного деформационного старения возрастает при $T = 20°$ С примерно вдвое, а показатель степени упрочнения уменьшается с $0{,}23 \div 0{,}25$ до $0{,}05 \div 0{,}06$. Весьма значительно уменьшается равномерная деформация до образования шейки и предельная деформация металла до разрушения; разрушающее истинное напряжение практически не изменяется. Изменение характеристики $\sigma = f(e)$ после деформационного старения приближает Ст. 3кп к высокопрочным сталям по ее чувствительности к концентраторам, в то время как величина разрушающих напряже-

ний сохраняется невысокой. К аналогичным изменениям диаграммы приводит деформационное старение на сталях 22К, 15ХСНД и 10ХСНД.

Пластическая деформация при комнатных температурах и деформационное старение могут существенно понизить запас конструктивной прочности. На рис. 11-5 был приведен пример влияния деформационного старения на снижение прочности и пластичности надрезанных образцов из стали 15ХСНД. При температуре минус 40—45° С наблюдается резкое снижение средних разрушающих напряжений. Аналогичные результаты получены на сталях 30Л, 10ХСНД, 15Г2СМФ, 15ГН4М.

Отрицательное влияние на свойства металлов оказывает также рост зерна, например, в зоне перегрева при электрошлаковой сварке.

В процессе термопластического цикла сварки осуществляется довольно сложное изменение свойств металла под влиянием термического воздействия, пластической деформации и старения металла. Особенно значительными могут оказаться изменения свойств металла, если эти процессы протекают в зоне концентратора деформаций (см. рис. 9-14).

§ 6. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ

Пути повышения конструктивной прочности могут быть различными в зависимости от того, какое предельное состояние ограничивает работоспособность сварной конструкции.

Например, если предельным состоянием является наступление текучести в расчетном сечении элемента, то следует стремиться к обеспечению так называемой равнопрочности, т. е. сварные соединения должны иметь достаточные сечения и высокие механические свойства, чтобы общая текучесть в них наступала не ранее, чем в основных элементах.

Распространенным случаем неравнопрочности сварных соединений является пониженное значение предела текучести металла шва или околошовной зоны, по сравнению с исходным основным металлом. Устранение такой неравнопрочности достигается различными способами. Возможно некоторое увеличение сечения стыкового шва за счет величины усиления. Такой путь иногда используют в алюминиевых сплавах. В угловых швах это осуществляется простым увеличением катета шва. Неравнопрочность шва или околошовной зоны может быть устранена за счет так называемого контактного упрочнения. Если при сварке получить незначительную, по сравнению с толщиной металла, ширину разупрочненной зоны, то при совместном деформировании этой зоны с более прочными соседними участками металла в ней появляются (благодаря касательным напряжениям) трехосные напряжения, затрудняющие пластическую деформацию.

Распространен способ термической обработки сварных соединений в целях повышения предела текучести слабых зон. Если разупрочнение наступило при снятии наклепа основного металла во время сварки, то возможно его восстановление путем холодной пластической деформации (прокатка, проковка). В некоторых случаях, когда расчет изделий из малопластичных металлов произведен по предельному состоянию наступления текучести, следует для обеспечения необходимой конструктивной прочности устранять концентраторы или уменьшать их остроту. В противном случае прежде, чем в расчетном сечении наступит текучесть, может произойти разрушение металла в концентраторе.

Снижение концентрации напряжений в сварных соединениях может быть осуществлено на различных этапах создания сварной конструкции. На стадии проектирования это достигается назначением рациональных сопряжений элементов, преимущественным использованием стыковых соединений, выбором материалов, мало чувствительных к различным концентраторам. В процессе изготовления сварных конструкций решающее значение имеет культура производства и качество использованных технологических процессов. Отсутствие в конструкции различного рода дефектов в виде непроваров, трещин, несплавлений и т. п. практически обеспечивает снижение опасной для прочности концентрации напряжений. Послеоперационный контроль сварных соединений и качественное устранение замеченных дефектов также являются важным этапом снижения концентрации напряжений в изделиях.

Наиболее жесткие требования к качеству технологических процессов и конструктивному оформлению изделия должны предъявляться, если в качестве предельного состояния принимается достижение σ при одноосном нагружении или давлении p_{max} в сосудах давления. Аналогичные требования должны предъявляться также, если нормальная работа изделия ограничена предельным состоянием наступления разрушения в какой-либо отдельной зоне конструкции. В этом случае мерой запаса прочности, т. е. мерой способности конструкции сопротивляться наступлению разрушения, является величина упруго-пластической деформации основных несущих элементов, предшествующая моменту разрушения.

Основные пути повышения конструктивной прочности для таких изделий должны быть направлены на увеличение способности конструкции пластически деформироваться без разрушения. Они заключаются в следующем:

1. Получение сварных соединений с наименьшим различием механических свойств в отдельных зонах. Например, недостаточная пластичность металла шва или околошовной зоны может явиться причиной разрушения сварной конструкции при значениях нагрузок, меньше расчетных.

2. Всемерное уменьшение остроты концентраторов. Данное требование особенно существенно для конструкций, работающих при переменных нагрузках или в условиях низких температур. Уменьшение остроты концентраторов может быть достигнуто рациональной формой сварных швов и соединений, механической обработкой, прокаткой швов в целях их заглаживания.

3. Устранение вредного влияния пластической деформации и деформационного старения. Это может быть достигнуто путем правильного назначения величины пластической деформации при холодной гибке и штамповке, выполнением пластических деформаций при высоких температурах, выбором последовательности сборочно-сварочных операций, исключающих попадание резких концентраторов в зону пластических деформаций от сварки; проведением высокого отпуска после сварки.

4. Снятие растягивающих остаточных напряжений и создание благоприятных полей сжимающих напряжений. Данные меры особенно полезны для конструкций, работающих при переменных нагрузках.

5. Конструктивное оформление сварных изделий, обеспечивающее снижение рабочих напряжений в зонах концентраторов и в зонах с пониженными прочностными и пластическими свойствами металла. Например, создание в зоне стыкового шва в сосудах местного утолщения основного металла.

6. Устранение сварочных деформаций (перемещений), искажающих проектные формы изделий. Например, в сосудах давления нарушение правильных геометрических форм приводит при повышении давления к преждевременной пластической деформации металла.

В некоторых сварных конструкциях стремятся устранить возможность распространения разрушения, вызывающего разделение конструкции на части. Такие меры принимаются в сварных судах, крупных емкостях для хранения различных продуктов, магистральных трубопроводах. Чтобы предотвратить наступление такого предельного состояния, заканчивающегося обычно крупной аварией, в конструкциях на пути возможного разрушения создают участки с повышенными вязкими свойствами металла. Работа, необходимая для продвижения трещины по такому участку, значительно больше, чем в остальных зонах. Поэтому запас накопленной в конструкции энергии, частично освобождающейся при разрушении, оказывается недостаточным и трещина останавливается. Возможно также использование клепаных соединений, расположенных на пути предполагаемого распространения трещины. Опыт показывает, что трещина, достигнув заклепочного шва, в этом случае не переходит с одного листа на другой.

Основными путями повышения гарантии от сквозных разрушений являются:

а) устранение причин, вызывающих начало разрушений (см. выше);

б) применение материалов, разрушение которых происходит с большими затратами энергии;

в) понижение энергоемкости конструкций, например, путем снятия остаточных напряжений или уменьшением допускаемых напряжений.

Имеется также ряд других приемов, обеспечивающих повышение устойчивости сварных элементов: изменение частоты собственных колебаний конструкций, повышение коррозионной стойкости и т. п.

При определении конструктивной прочности изделий путем их испытаний в первую очередь необходимо четко регистрировать наступление тех предельных состояний, на которые рассчитана сварная конструкция. Например, при испытании сварных соединений, расчет которых произведен по предельному состоянию наступления текучести, необходимо определять нагрузки, вызывающие наступление текучести расчетного элемента. В качестве дополнительных характеристик часто регистрируют разрушающие нагрузки или величину пластической деформации.

При испытании сварных конструкций, работоспособность которых ограничена разрушением, за основную характеристику их качества должна приниматься величина средней упруго-пластической деформации расчетного элемента, предшествующая разрушению.

В случае испытаний при переменных нагрузках работоспособность также ограничивается разрушением, поэтому за характеристику качества конструкции должно приниматься количество циклов до появления трещины при заданных уровне и характере изменения напряжений.

Испытания на конструктивную прочность должны по возможности проводиться в условиях, наиболее полно отражающих реальные условия эксплуатации: температуру, характер действия нагрузок, качество изготовления сварной конструкции. В тех случаях, когда не представляется возможным осуществить полную идентичность конструктивного оформления испытуемого образца и реального изделия, а также условий нагружения, должна быть разработана специальная система расчленения конструкции на узлы с поэтапным исследованием их прочности в условиях, близких к реальным. Испытанию сложных и дорогих натурных изделий должны предшествовать испытания отдельных конструктивных элементов.

ГЛАВА XIII

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 1. РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

Проектные организации и заводы проводят работы по совершенствованию методов проектирования и изготовления сварных конструкций. Основными тенденциями их развития являются следующие:

а) осуществление принципов комплексного решения: выбор рациональной схемы конструкции, материала, ее конструктивного оформления с применением прогрессивных технологических процессов при снижении трудоемкости и уменьшении стоимости. Как правило, стоимость сварной конструкции определяется единицей веса. На стоимость влияют цена материала, объем затрат труда, основных фондов и т. п. Следует стремиться производить конструкции высокого качества и предельно дешевые;

б) смелое внедрение прогрессивных форм инженерных сооружений для получения конструкций прочных, жестких, устойчивых, эстетичных и минимальных по весу;

в) при проектировании должно осуществляться бережное отношение к расходуемому металлу. С этих позиций использование высокосортных сталей рентабельно, так как нередко незначительное удорожение единицы веса металла позволяет в значительной мере повысить несущую способность конструкции, снизить вес и стоимость (см. § 2 этой главы);

г) типизация проектирования в целях сокращения типоразмеров и возможности использования в цехах поточно-механизированных линий. Очень целесообразно при проектировании использование унифицированных блоков, т. е. таких узлов элементов, которые входят в состав различных сварных конструкций;

д) широкое использование разнообразного ассортимента: проката, в частности тонкого листа, гнутых и штампованных элементов — тонкостенных труб. При проектировании конструкций из алюминиевых сплавов полезно применять прессованные элементы; при проектировании тяжелых конструкций использовать комбинацию проката, отливок, поковок, штамповок в целях получения объектов, хорошо конструктивно оформленных и удовлетворяющих принципу технологичного изготовления;

е) осуществление мероприятий, обеспечивающих надежность и долговечность конструкций при их работе под интенсивным динамическим воздействием, в условиях агрессивных сред, низких температур и т. д. Применение для этой цели наиболее высококачественных стабильных по свойствам материалов и сварных соединений. Обеспечение при проектировании сварных соединений таких условий, при которых отрицательное влияние термического действия сварки на конструкции было бы минимальным; при дуговой сварке укладывать во всех видах изделий лишь строго необходимое количество швов; для конструкций, работающих в условиях весьма низких температур, а также толстостенных конструкций, свариваемых электрошлаковым способом, предусматривать термическую обработку — общую для всего изделия, отдельных его блоков, местную — для сварных соединений и т. д.;

ж) проектируемая конструкция должна быть технологичной, т. е. удобной в исполнении. В процессе проектирования крупногабаритных изделий предусматривается максимальное выполнение работы на заводе и минимальное на монтаже. Предусматривать возможно более широкое использование в заводских условиях контактной стыковой сварки и, в частности, по методу непрерывного оплавления для толстостенных труб, валов и др., контактную точечную и рельефную сварку, автоматическую и полуавтоматическую под флюсом и в среде углекислого газа для сварки сталей, аргоно-дуговую — для соединений алюминиевых и титановых сплавов, высокочастотную и особенно радиочастотную,— например, при изготовлении труб и других профильных элементов, холодную сварку — для стыковых соединений деталей, сварку трением и т. д. Следует расширить использование в строительных конструкциях и машиностроении производительных методов пайки, газовой и плазменной резки сталей и других металлов. Особенно предусматривать на монтаже применение разных полуавтоматических методов сварки дугой, а также контактной сварки с применением легкой переносной аппаратуры и газопламенной резки;

з) использование передовых методов расчета прочности сварных конструкций, например, учета термического влияния сварки на околошовную зону, влияния концентраторов в сварных соединениях на долговечность и усталостную прочность при перемен-

ных нагрузках, образования общих и местных остаточных деформаций при дуговой и контактной сварках различных металлов и применение мероприятий для их устранения и т. д.;

и) использование методов повышения прочности сварных конструкций путем общей и местной термической обработки, создание термическим способом полезных остаточных напряжений, прокатка швов тонколистовых изделий, применение ковочного давления в машинах при контактной сварке, механическая обработка швов;

к) проектирование рациональной технологической оснастки при изготовлении жестких балочно-рамных систем, шарнирных стержневых систем (ферм), оболочковых конструкций, в частности труб, каркасов сборного железобетона, а также микрогабаритных объектов, применяемых в приборостроении. Проектирование стеллажей, сборочных приспособлений и другого технологического оборудования и аппаратуры, составление экономического расчета производства изделий;

л) при проектировании строительных конструкций учитывать возможность облегчения их веса путем применения пространственных форм, в частности оболочковых; путем создания в конструкциях предварительных полезных остаточных напряжений, как, например, в шпренгельных балках, где затяжка шпренгеля создает напряжения от изгиба, обратные по знаку тем, которые вызваны приложением полезных нагрузок (см. § 16 этой главы). При проектировании машиностроительных объектов, изготовляемых из толстого металла, учитывать целесообразность электрошлаковой сварки для оформления комбинированных изделий из прокатных, литых и штампованных заготовок.

§ 2. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Правильный выбор материала представляет собой трудную задачу для проектанта. Для уменьшения веса конструкции целесообразнее применять стали, обладающие высокими значениями предела текучести и прочности. Однако разные стали по-разному работают в условиях различных нагружений и сред. Высокопрочные стали, как правило, обладают повышенной чувствительностью к концентраторам напряжений. Поэтому многие высокопрочные стали, например 30ХГСА, плохо работают при усталостных нагрузках, а также при ударах. Их следует подбирать умело.

Имеются низколегированные конструкционные стали, принадлежащие к категории трудно свариваемых; они требуют строгого соблюдения правил технологического процесса. Незначительные отклонения ведут к перегреву и росту зерна в зоне соединений или, напротив, к образованию закалочных структур. В обоих случаях резко понижается сопротивление ударным

нагрузкам. Аустенитные нержавеющие стали, которые не стабилизированы введением титана или ванадия, при сварке значительно понижают свои антикоррозионные свойства; наличие стабилизаторов устраняет это явление.

Имеются стали, обладающие хорошей прочностью и пластичностью при работе в условиях одноосных напряжений, но работающие менее удовлетворительно в конструкциях при двухосных напряжениях. Их конструктивная прочность оказывается недостаточной. Многие сорта сталей, обладающие хорошими механическими свойствами при комнатных температурах, оказываются неудовлетворительными при низких, например, кипящие малоуглеродистые стали и т. п.

Проектанты должны предвидеть условия работы конструкции и в соответствии с ними сделать рациональный выбор материала. В последние годы стремятся выбирать материал с учетом его достаточно хорошего сопротивления хрупким разрушениям при статических нагрузках, в особенности при низких температурах. Освещению вопроса рационального выбора металла с указанных позиций посвящено много исследований, проведенных в СССР и за рубежом. При выборе материала следует учитывать ряд факторов: условия эксплуатации, форму конструкций, технологическую обработку и т. д.

Материал, работающий удовлетворительно при более легких условиях, может оказаться непригодным при более тяжелых. Выработаны методы оценки пригодности металла для использования в конструкциях с позиций его сопротивляемости образованию трещин. Считают, что факторами, оказывающими влияние на сопротивление хрупких разрушений сварных конструкций, являются следующие:

1. Химический состав основного металла. Наиболее хорошо свариваются стали с химическим содержанием:

$$C \leqslant 0{,}22\%;\ Mn \leqslant 1{,}5\%;\ Si \leqslant 0{,}5\%;\ C + \frac{Mn}{6} \leqslant 0{,}4\%.$$

К ним относятся малоуглеродистая сталь, стали, модифицированные ниобием, ванадием, никелем и др.

При сварке низколегированных сталей следует учитывать химические и механические свойства основного металла и околошовной зоны, а также характеристику сопротивляемости образованию кристаллизационных и холодных трещин.

2. Температура эксплуатации. По этому признаку конструкции делят на четыре группы, работающие в пределах $T \geqslant 15°$ С; $T \geqslant -10°$ Т, $T \geqslant -30°$ С и $T < -30°$ С. Последний случай является наиболее опасным.

3. Толщина соединяемых элементов s.

4. Начальные пластические деформации в зоне холодной обработки гнутьем, штамповкой и т. д. При этом изделия разде-

ляют на две группы, у которых пластические деформации менее 2,5%, и те, у которых они находятся в пределах от 2,5 до 5%;

5. Жесткость напряженного состояния конструкции, которая учитывается одним из трех коэффициентов: $K_1=1$; $K_2=1{,}4$; $K_3=2$.

Конструкция является наиболее жесткой при применении отливок, проката больших толщин без последующей термической обработки, при наличии многоосных полей остаточных напряжений, вызванных пространственным расположением швов; при резком изменении геометрических размеров частей, создающих зоны высокой концентрации напряжений.

Степень опасности распространения трещин может быть оценена коэффициентом S, который принимает значение от 0,5 до 1. Чем больше вероятность, что образовавшаяся в процессе сварки или эксплуатации трещина вызовет разрушение всего отрезка, тем выше должен быть принят коэффициент S.

Таким образом, опасность хрупких разрушений для сварных конструкций может определяться произведением коэффициентов K и S, которое принимается равным 0,5; 1,0; 1,4; 2.

На рис. 13-1 приведены примеры конструкций, в которых по степени их жесткости коэффициенты KS могут быть приняты равными: 1,0; 1,4; 2,0. На рис. 13-1, *а* приведены узлы с соединениями встык и внахлестку. Наиболее опасно загружение при двухосных напряжениях, наименее — при усилиях, параллельных швам. На рис. 13-1, *б* приведены примеры тавровых соединений, а на рис. 13-1, *в* — балки, работающие на поперечный изгиб, а также узлы рам и ферм, работающих при изгибе и продольных силах.

Проф. Биретом предложена классификация (рис. 13-2), в которой на основе приведенных показателей даны рекомендации для выбора марки стали. Сталь А — наивысшая марка с позиции пластичности и вязкости при низких температурах; сталь Б — спокойная, малоуглеродистая сталь, раскисленная кремнием и алюминием; сталь В — успокоенная; сталь Г — кипящая.

На рис. 13-2 рекомендованы стали в зависимости от температуры T эксплуатации, толщины металла s и от фактора KS. При малых KS, например, 0,5, для толщины $\leqslant 16$ *мм* можно применять сталь марки Г, для толщины 20 *мм* — улучшенную Г или В; при $s=20\div 35$ *мм* — только В, при $s>35$ *мм* — марку Б. При наличии только сжимающих напряжений, вне зависимости от температуры эксплуатации при $s>16$ *мм* применяют сталь Г, при $s=16\div 30$ *мм* — сталь Г или В, при $s>30$ *мм* — сталь В.

Напряжения сжатия благоприятны для конструкций: при них хрупкие разрушения почти не наступают. Если сжатый элемент подвергнуть холодному деформированию с радиусом изгиба r так, чтобы $\varrho/s\geqslant 19$ или соответственно деформация $\delta\leqslant 2{,}5\%$,

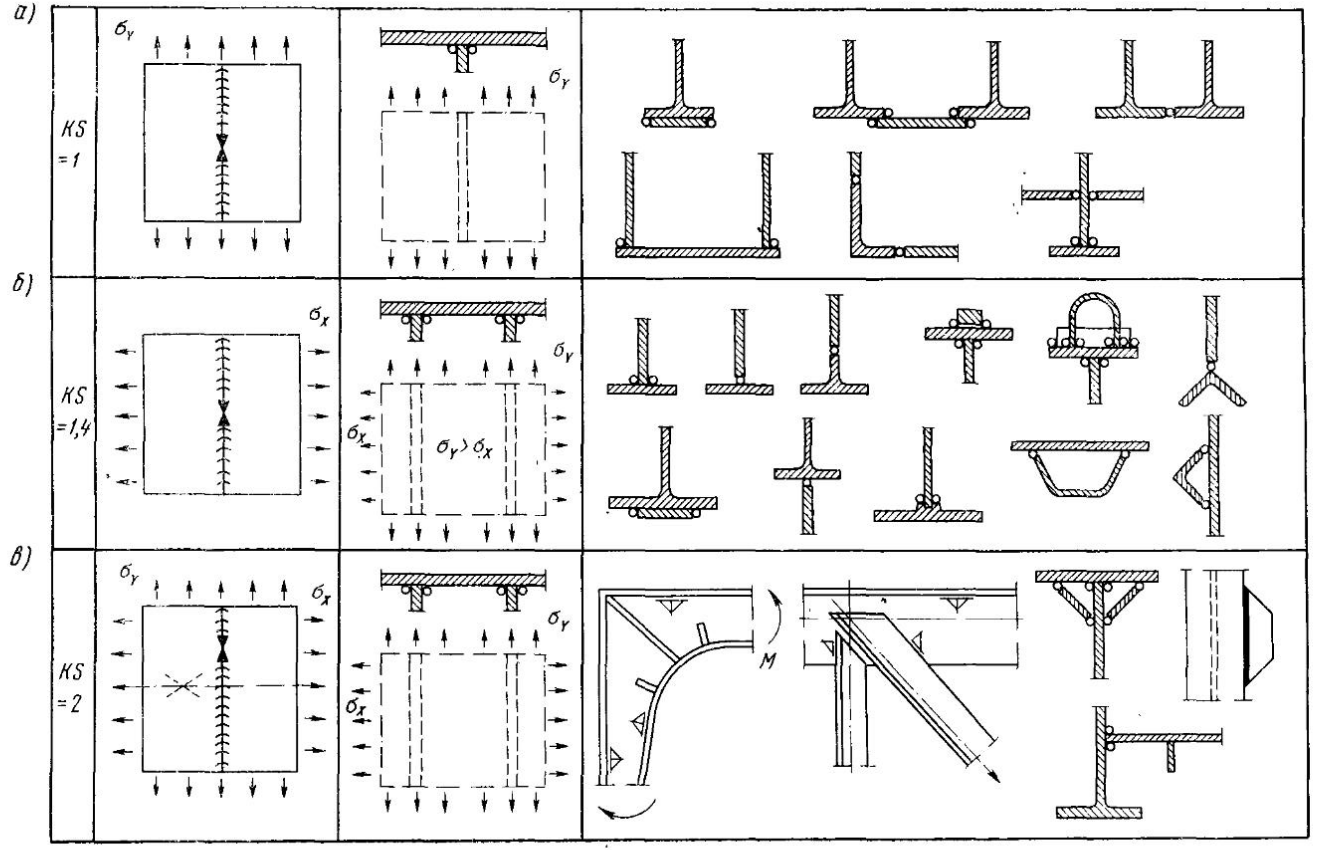


Рис. 13-1. Примеры мягких (*а*), средних (*б*) и жестких (*в*) нагружений в элементах конструкций.
В типах конструкций (*в*) $\sigma_y \approx \sigma_x$

то учет толщин производится не по верхней, а по нижней шкале 0—35 *мм*. Во всем остальном использование таблицы не меняется.

Если холодное деформирование значительно $\rho/s \geqslant 10$ или деформация $\delta \geqslant 2{,}5\%$, то учет толщин производится по самой нижней шкале 0—30 *мм*. При этом требования к марке стали становятся жестче. Например, при $T = -30°$ С и $KS = 2$, уже́ при $s = 30$ *мм* необходимо применение сталей наивысшего класса А.

Приведенная таблица (рис. 13-2) предназначена для правильного ориентировочного выбора металла проектантами, в за-

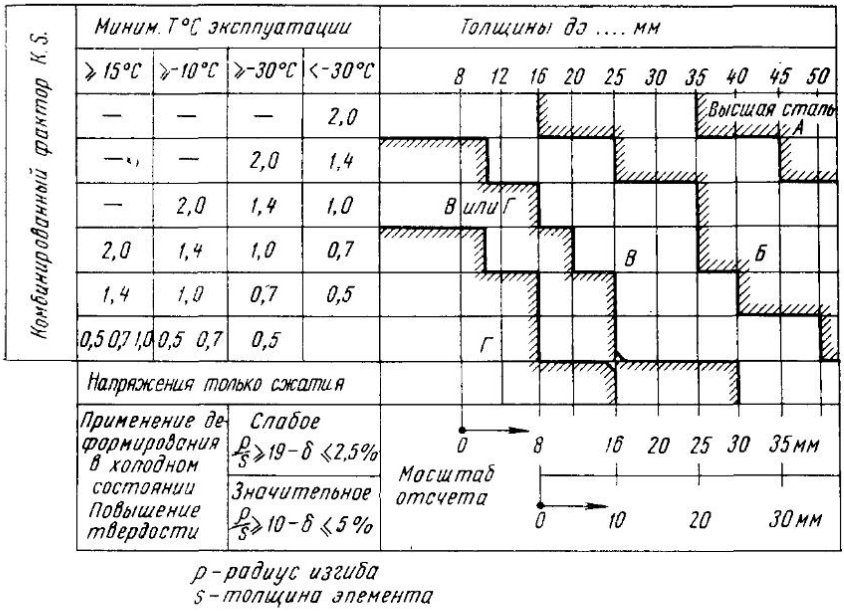


Рис. 13-2. Рекомендация Бирета в выборе марок сталей, обеспечивающих отсутствие хрупких разрушений:

А — сталь высшей марки; *Б* — сталь хорошей марки; *В* — сталь средней марки; *Г* — сталь низшей марки

висимости от условий эксплуатации, формы конструкций и технологии изготовления.

§ 3. РАЦИОНАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для проектирования технологического процесса исходными данными являются: чертеж изделия, технические условия на его изготовление и планируемая программа выпуска.

В процессе создания конструкции и оформления чертежей конструктор решает ряд вопросов технологического характера. Прежде всего это — расчленение сварного изделия на отдельные элементы, выбор материалов и методов получения заготовок. При этом учитываются данные о свариваемости выбранных материалов, возможности использования того или иного способа

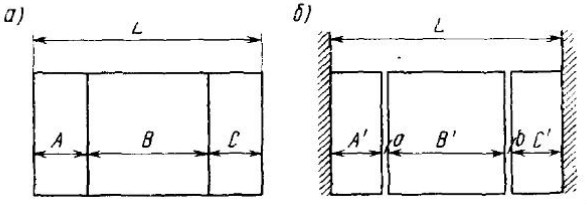


Рис. 13-3. Схемы сборки узла из трех деталей

сварки, а также доступность сварного соединения и удобство его выполнения. Конструктивное оформление сварных соединений конкретизирует решения конструктора в части выбора метода и приемов сборки и сварки. Так, данные чертежа о разделке кромок под сварку предопределяют метод сварки, положение изделия при сварке, допустимые зазоры при сборке под сварку и т. п. Указанные на чертежах величины допусков на размеры отдельных деталей и готового изделия, а также величины припусков на обработку после сварки определяют требования к точности сборки и ограничению деформаций от сварки. Насколько существенно такие данные чертежа могут изменять условия сборки, сварки и последующей обработки, можно видеть на следующем примере. Пусть требуется собрать три детали A, B и C встык и сварить их с определенным допуском на окончательный размер L (рис. 13-3). Если соединения предполагается выполнять автоматической сваркой, то стыки следует собирать без зазора, путем плотного прижатия деталей друг к другу (рис. 13-3, *а*). В этом случае величина припуска на окончательную обработку определяется суммой допусков всей цепи размеров и ее ограничение требует повышения точности размеров каждой детали и учета деформаций от сварки. Требования к точности размеров деталей A, B и C могут быть значительно снижены, если сборку вести по базовым поверхностям приспособления (рис. 13-3, *б*) и использовать ручную сварку, допускающую наличие зазоров a и b между отдельными деталями. При этом величина припуска на окончательную механическую обработку может быть сведена к минимуму, если задать расстояние между опорными базовыми поверхностями L с учетом усадки от сварки.

Содержащиеся в чертежах решения определяют технологичность конструкции. Поэтому эти решения на всех стадиях про-

ектирования от разработки эскизного проекта до выпуска рабочих чертежей должны быть согласованы со сварщиками-технологами. Возможность иного, более рационального конструктивного оформления сварных соединений может быть обнаружена при разработке технологии изготовления изделия. В этом случае для изменения чертежа требуется согласие конструктора.

Технические условия на изготовление определенного типа конструкций (ТУ) содержат перечень требований, которые следует предъявлять к материалам, оборудованию и выполнению технологических операций на разных стадиях процесса производства. ТУ являются кратким изложением опыта проектирования, изготовления и эксплуатации, накопленного в данной отрасли производства. Поэтому проектирование технологических процессов изготовления должно выполняться, как правило, в соответствии с требованиями ТУ. Необходимость отклонения от них в каждом отдельном случае должна быть достаточно обоснована.

Программа выпуска содержит сведения о количестве изделий, которые надо изготовить в течение конкретного срока (например, за год). Эти цифры дают представление об объеме производства, что позволяет обоснованно выбирать оборудование, технологическую оснастку и средства механизации и автоматизации. Кроме того, знание количества выпускаемых изделий обеспечивает возможность оценки экономической эффективности этого выбора.

При проектировании технологических процессов изготовления сварных конструкций следует иметь в виду следующее.

1. На монтажной площадке условия труда, возможности применения высокопроизводительной оснастки и средств контроля качества менее благоприятны, чем на заводе. Поэтому изделия больших габаритов целесообразно расчленять на такие транспортабельные узлы, которые можно полностью изготовить в условиях завода, сводя к минимуму работы на монтаже.

2. С позиции доступности сварных соединений, удобства их выполнения и последующего пооперационного контроля сборочно-сварочные работы целесообразно выполнять путем последовательного укрупнения отдельных элементов в подузлы и узлы с последующей сборкой всего изделия. Такое чередование сборочных и сварочных операций облегчает использование высокопроизводительной сварочной оснастки, но, в случае малой жесткости отдельных узлов, может приводить к возрастанию деформаций от сварки. С позиции уменьшения сварочных деформаций сборка всей конструкции сразу часто оказывается более целесообразной.

3. В процессе изготовления сварных изделий сварочные работы обычно не превышают 30% общих трудовых затрат. Поэтому высокая производительность может быть достигнута только при

комплексной механизации всего процесса изготовления, когда механизируются не только сварочные, но и сборочные, транспортные и другие вспомогательные работы.

4. Решение вопросов о целесообразности проектирования и изготовления технологической оснастки и средств механизации и автоматизации должно подкрепляться экономическими расчетами с учетом программы выпуска однотипных изделий.

5. Для оценки ожидаемых сварочных деформаций и выбора рациональной последовательности сборочно-сварочных операций целесообразно использование расчетных методов.

6. Требуемую точность размеров и формы сварного изделия следует обеспечивать путем рационального построения технологического процесса и применения правочных работ на стадии заготовки элементов, сборки и сварки отдельных узлов. Правка готового изделия является, как правило, крайне трудоемкой.

7. Термообработка конструкции после сварки существенно усложняет процесс изготовления, особенно в условиях серийного и массового производства. Необходимость этой операции определяется с позиции улучшения механических свойств, снятия остаточных сварочных напряжений и уменьшения сварочных деформаций как в процессе механической обработки, так и при вылеживании или эксплуатации.

§ 4. СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Сборочная операция обеспечивает правильное взаимное расположение и закрепление деталей. Сборку производят на плите, стеллаже, стенде или в специальном приспособлении. В условиях индивидуального производства расположение деталей в узле в большинстве случаев задается разметкой, для их закрепления используют струбцины, планки, скобы с клиньями и другие простейшие универсальные приспособления.

Использование специальных сборочных приспособлений позволяет повысить производительность труда и улучшить качество сборки. Основой сборочного приспособления является жесткий каркас, несущий упоры, фиксаторы и прижимы (рис. 13-4). При сборке детали заводятся в приспособление, укладываются по упорам или фиксаторам и закрепляются прижимами. Винтовые, рычажные или эксцентриковые прижимы с ручным приводом просты, но требуют непосредственного воздействия сборщика (рис. 13-5). Использование пневматических (рис. 13-6), гидравлических (рис. 13-7), электромагнитных (рис. 13-8) или вакуумных прижимов (рис. 13-9) значительно сокращает вспомогательное время, особенно, если требуется зажать изделие одновременно в нескольких местах. Широкое применение получили пневматические прижимы, приводимые в действие сжатым

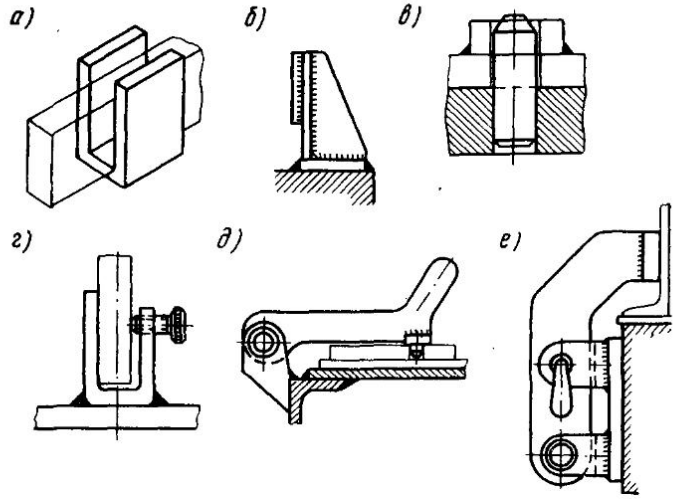


Рис. 13-4. Элементы сборочных приспособлений:
а) карман; *б*) упор; *в*) палец жесткий; *г*) зажим; *д*) палец откидной; *е*) упор откидной

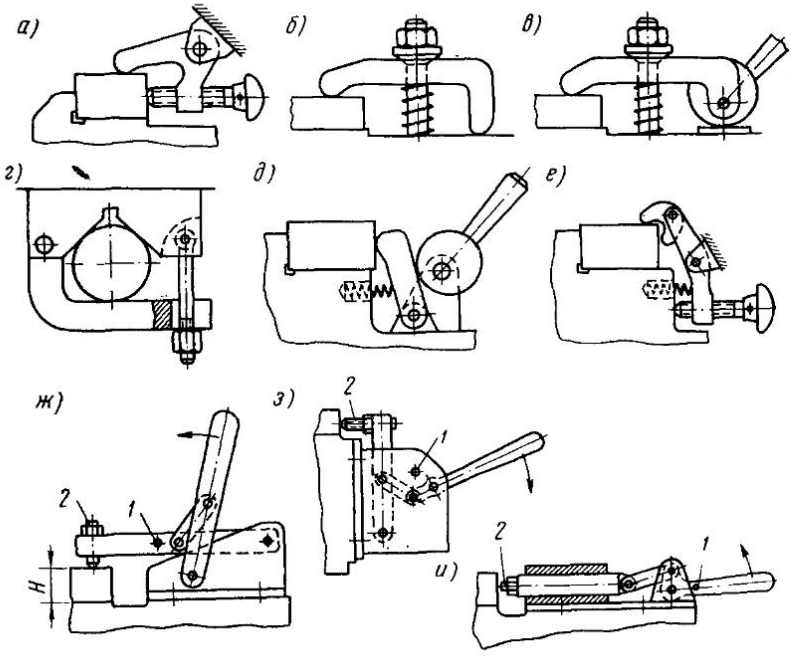


Рис. 13-5. Схемы механических зажимных устройств:
а), *б*), *г*), *е*) винтовые; *в*), *д*) эксцентриковые; *ж*), *з*), *и*) рычажные

воздухом малого давления (в среднем 4 *ат*). Однако при таком давлении размеры цилиндров, требуемые для обеспечения заданного усилия зажатия, могут оказаться значительными. Для их уменьшения часто прибегают к дополнительному использованию рычажной или клиновой системы прижатия. В некоторых

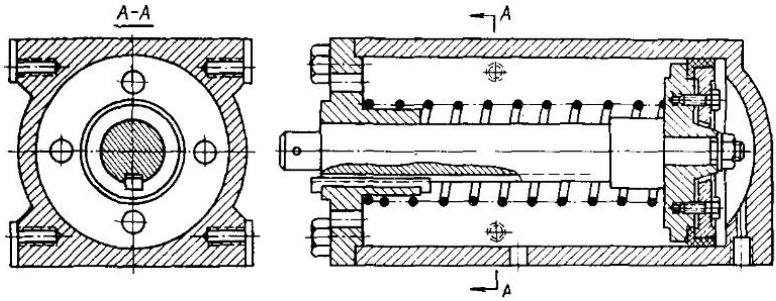
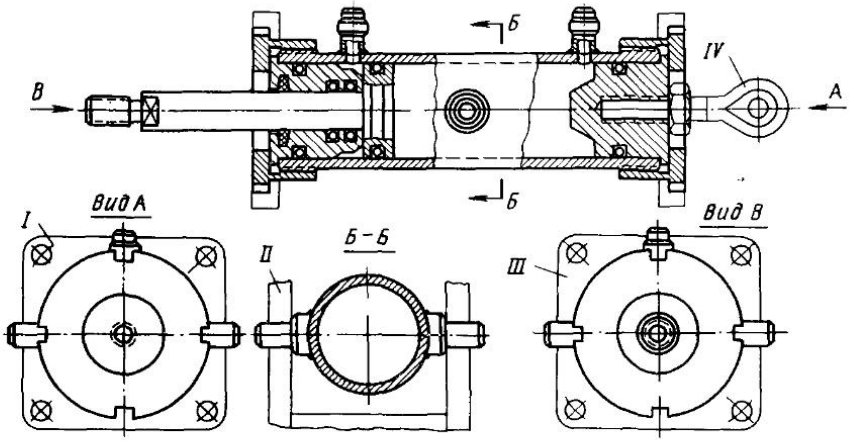


Рис. 13-6. Пневмоприжимы с возвратом поршня пружиной



I, II, III, IV – типы креплений цилиндра

Рис. 13-7. Гидравлический прижим двустороннего действия

случаях более рациональным оказывается использование гидравлических или пневмогидравлических устройств (рис. 13-10).

Собранный узел должен обладать жесткостью и прочностью, необходимой как при извлечении его из сборочного приспособления и транспортировке к месту сварки, так и для уменьшения

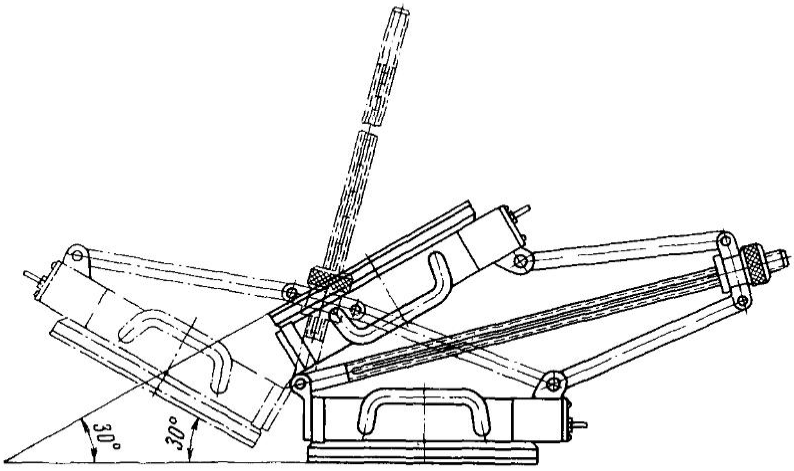


Рис. 13-8. Универсальный электромагнитный фиксатор

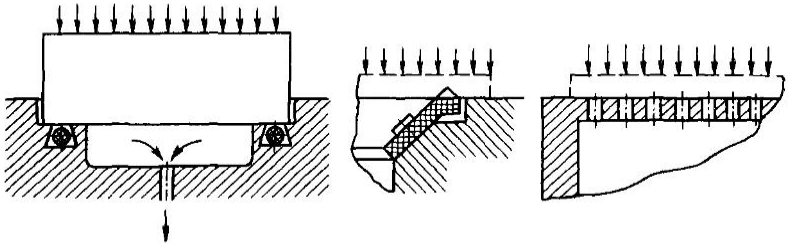


Рис. 13-9. Схемы вакуумных зажимов

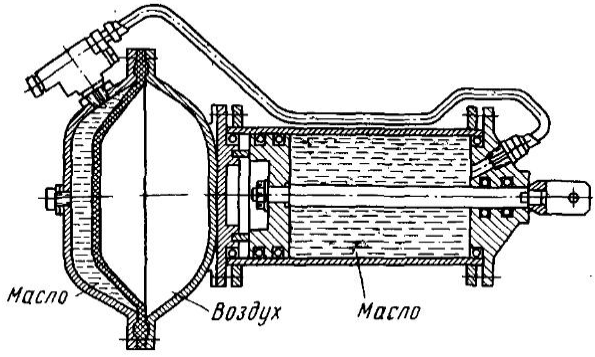


Рис. 13-10. Пневмогидравлический прижим

сварочных деформаций. Поэтому фиксация собранных деталей наиболее часто осуществляется на прихватках. Размеры и расположение прихваток определяются не только из условий прочности и жесткости, но и с позиции предотвращения их вредного влияния на качество выполнения сварных соединений и работо-

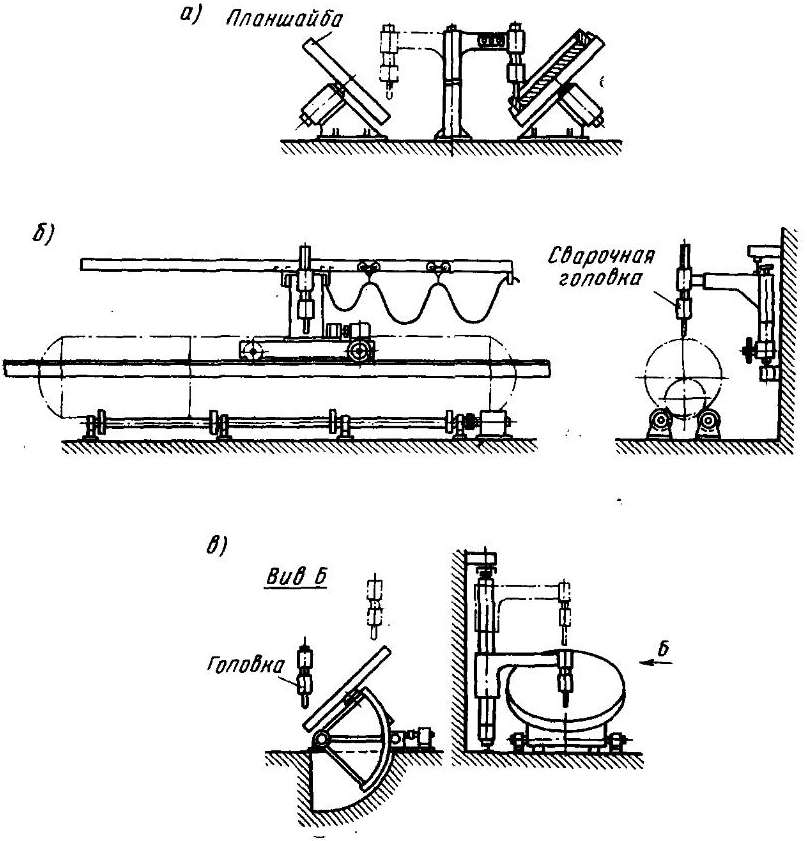


Рис. 13-11. Основные типы сварочных приспособлений:
а) вращатель; *б*) роликовый стенд; *в*) манипулятор

способность конструкции. Поэтому прихватки должны иметь ограниченное поперечное сечение и располагаться в местах, обеспечивающих их полную переварку при укладке основных швов. Если же прихватки приходится накладывать в местах, где швы отсутствуют, то после завершения сварки такие прихватки следует удалить, а поверхность тщательно зачистить.

Последовательность выполнения сборочно-сварочных операций может быть различной. Наиболее часто встречающимися случаями могут быть:

1. Сварка производится после полного завершения сборки.

2. Сборка и сварка выполняются попеременно; например, при изготовлении конструкции путем наращивания отдельных элементов.

3. Общей сборке и сварке конструкции предшествует сборка и сварка подузлов и узлов.

Каждый из этих приемов имеет свои достоинства и недостатки в зависимости от характера производства, типа конструкции, ее габаритов и требуемой точности размеров и формы. В дальнейшем при рассмотрении процессов изготовления конструкций эти приемы будут рассмотрены более конкретно.

Для удобства выполнения тех или иных швов изделие в процессе сварки приходится устанавливать в различные положения. Это осуществляется с помощью приспособлений: позиционеров, вращателей, кантователей, роликовых стендов, манипуляторов (рис. 13-11). Подобного рода приспособления могут быть как установочные, предназначенные только для поворота изделия в положение, удобное для сварки того или иного шва (рис. 13-12), так и сварочные, обеспечивающие, кроме установки изделия, его вращение с заданной скоростью, равной скорости сварки. С этой целью для вращения стола часто используют электродвигатели постоянного тока, позволяющие регулировать число оборотов, тогда как привод наклона и подъема стола осуществляют от электродвигателей асинхронных (рис. 13-13). Помимо этого, в задачу сварочного приспособления обычно входит направление движения сварочной головки (см. рис. 13-11, *б*).

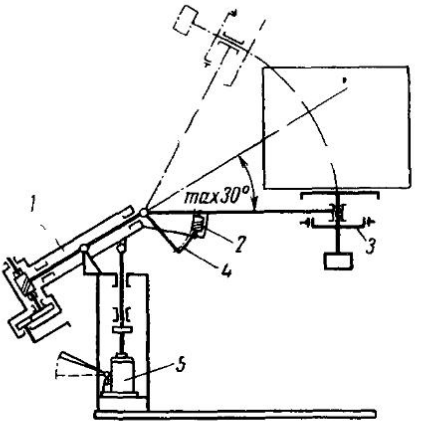


Рис. 13-12. Кинематическая схема универсального установочного манипулятора:

1 — главный вал с ручным приводом; *2* — червяк поворота консоли; *3* — поворотный стол с тормозом; *4* — червячный сектор; *5* — ручной гидродомкрат

Эффективность использования сборочно-сварочной оснастки во многом определяется ее соответствием конструкции изделия, принятой технологии изготовления и программе выпуска.

Универсальные приспособления общего назначения (сборочные плиты, манипуляторы, кантователи, роликовые стенды)

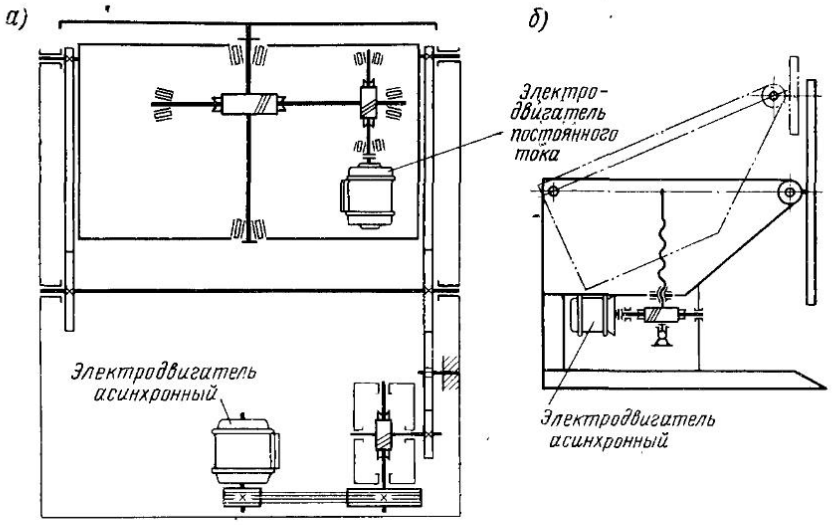


Рис. 13-13. Кинематические схемы приводов универсального сварочного манипулятора:

а) вращения и наклона стола; *б*) подъема стола

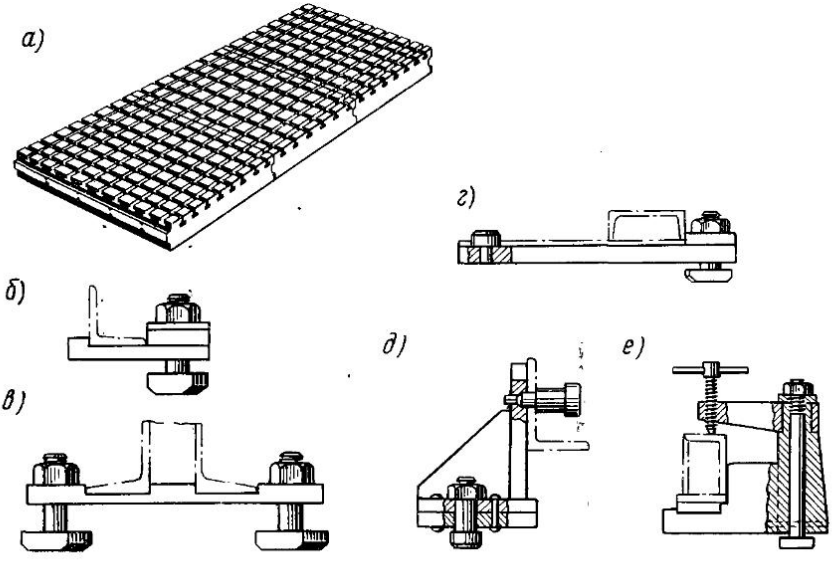


Рис. 13-14. Конструктивные элементы сборных приспособлений:

а) универсальная плита; *б*) упор; *в*) карман; *г*), *д*) упор с фиксатором; *е*) поворотный прижим

используются для сборки и сварки изделий широкой номенклатуры и различных размеров. Они изготавливаются в централизованном порядке и могут быть приобретены в готовом виде. Для изделий определенного типа, но разных размеров, могут использоваться универсальные приспособления специального назначения. Их конструируют и строят в индивидуальном порядке. Область применения универсальных приспособлений — индивидуальное и мелкосерийное производство.

Специальные приспособления имеют одноцелевое назначение и используются для выполнения определенных операций применительно к конкретному изделию. Обычно такие приспособления применяют в условиях крупносерийного и массового производства, их проектирование и изготовление осуществляется в индивидуальном порядке.

Помимо универсальных и специальных приспособлений, в мелкосерийном и индивидуальном производстве используются универсально-сборные приспособления. Комплект оснастки такого типа представляет собой набор различных конструктивных элементов: универсальных плит с продольными и поперечными пазами, типовых сменных упоров, фиксаторов, штырей, прихватов, планок, крепежных деталей и т. п. (рис. 13-14). Для каждой собираемой сварной конструкции разрабатывается схема настройки сборного приспособления (рис. 13-15, *б*). Общая сборочная плита, в зависимости от размеров собираемого изделия, может составляться из отдельных плит стандартного размера. Сборщик отбирает необходимые элементы оснастки и согласно схеме устанавливает и закрепляет их на плите (рис. 13-15, *а*). После окончания сборки требуемого количества изделий приспособление разбирается, и его элементы используются для сборки других изделий. Многократное использование элементов для сборки большого количества разнообразных сварных узлов резко сокращает сроки подготовки производства и дает значительную экономию, особенно в условиях индивидуального производства.

Применительно к выпуску конкретного изделия перечень необходимых сборочно-сварочных приспособлений составляется в процессе проектирования технологии изготовления этой конструкции. При этом решается вопрос, какие из приспособлений могут использоваться в готовом виде, а какие намечаются к проектированию и изготовлению. Так как обычно применение приспособлений имеет целью не только улучшить качество выпускаемых изделий и повысить производительность труда, но и снизить себестоимость продукции, то целесообразность проектирования и изготовления приспособления должна обосновываться экономическими подсчетами.

При проектировании сборочно-сварочных приспособлений исходными данными служат чертежи деталей и узла

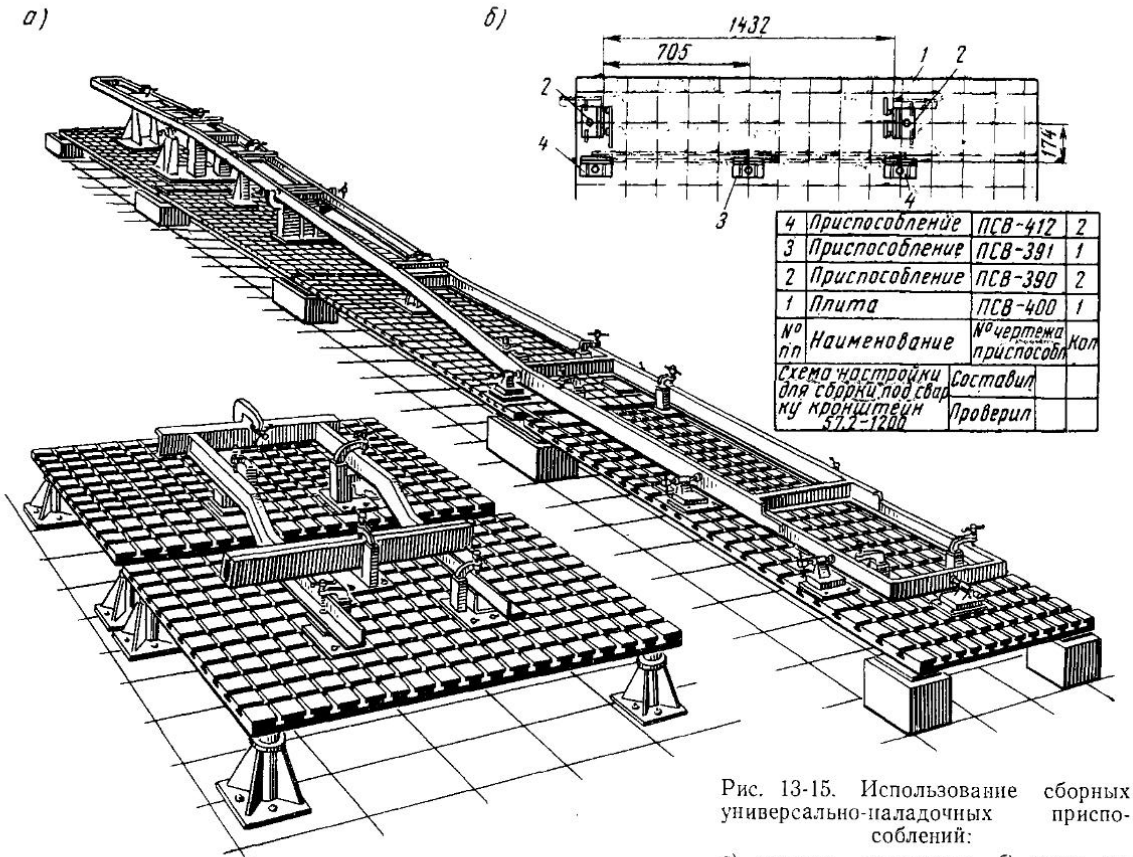


Рис. 13-15. Использование сборных универсально-наладочных приспособлений:

а) примеры компоновки; *б*) схема настройки

в сборе, технические условия на изготовление и приемку изделия и программа намечаемого выпуска.

На основе этих данных составляется задание на проектирование, содержащее перечень основных принципиальных положений, которым должно удовлетворять приспособление. К ним прежде всего следует отнести:

а) назначение приспособления, т. е. должно ли оно быть сборочным, сварочным или сборочно-сварочным;

б) тип приспособления — универсальное, переналаживаемое или специальное;

в) перечисление требований, предъявляемых к приспособлению с конструктивных и технологических позиций;

г) требуемое повышение производительности труда и снижение себестоимости.

Наиболее заметно производительность труда повышается при применении специальных приспособлений. Однако в производствах с малой программой выпуска изделий проектирование и изготовление таких приспособлений узкоцелевого назначения экономически оправдывается далеко не всегда, и более эффективным может оказаться использование универсальной оснастки. Целесообразность того или иного решения в каждом случае должна подтверждаться экономическими расчетами.

Следующий этап проектирования — выбор конструктивной схемы приспособления. Помимо требований задания на проектирование, при выборе схемы необходимо обеспечить возможность механизации транспортных операций, быстроту и надежность базирования и закрепления деталей в приспособлении, удобство выполнения сборочных и сварочных операций. В зависимости от назначения приспособления основные вопросы, требующие проработки на этом этапе проектирования, могут быть сформулированы следующим образом.

Для сборочного приспособления:

а) подача элементов в приспособление и придание им проектного положения;

б) расположение опорных баз и прижимов;

в) обеспечение удобства постановки сборочных прихваток;

г) освобождение от закреплений и съем узла.

Для сварочного приспособления:

а) подача узла в приспособление;

б) базирование узла в приспособлении и закрепление;

в) перемещение узла или сварочной головки в процессе сварки или при переходе от одного шва к другому;

г) освобождение от закрепления и съем узла.

В случае проектирования сборочно-сварочного приспособления первые два пункта будут такими же, как для сборочного приспособления, а последние два,— как для сварочного. Кроме

Рис. 13-16. Схема процесса проектирования сборочно-сварочных приспособлений

того, существенным становится обеспечение требуемой последовательности сборочно-сварочных операций. В соответствии с выбранной схемой и требованиями задания на проектирование производится конструктивная разработка приспособления. Она включает необходимые расчеты на прочность и жесткость и завершается созданием рабочих чертежей.

При проектировании оригинального приспособления, как и при создании любой новой машины, не все конструктивные решения могут оказаться достаточно удачными. Большинство недостатков обнаруживают и устраняют непосредственно в процессе изготовления и отладки приспособления, но некоторые из них выявляются только в эксплуатации.

Рассмотренный процесс проектирования приспособлений для сборочно-сварочных операций представлен на рис. 13-16 в виде схемы. Применительно к различным типам сварных конструкций примеры проектирования приспособлений будут рассматриваться в соответствии с этой схемой.

Расчеты на прочность и жесткость должны отражать специфику работы приспособления в зависимости от его назначения.

Для сборочного приспособления необходим учет силы веса приспособления и изделия и усилий от прижимов. Расчет должен обеспечивать прочность конструкций приспособления и ограничение искажений базовых размеров в пределах заданных допусков. Если в процессе сборки изделие подвергается кантовке, то расчет следует производить для наиболее неблагоприятного положения с учетом усилий от механизма вращения.

Для сварочного приспособления необходим учет дополнительных усилий, которые могут возникнуть в результате усадки изделия от сварки. При этом существенными являются требования, предъявляемые к приспособлению в части снижения сварочных деформаций в изделии. Если не ставится цель уменьшить деформации, то следует либо предусмотреть возможность смещения изделия относительно приспособления в процессе сварки и остывания, либо допустить упругую деформацию приспособления совместно с изделием. В последнем случае допускаемая деформация не должна противоречить требованиям расчета на жесткость и прочность.

Приспособление, имеющее целью снизить сварочные деформации изделия, должно обладать повышенной жесткостью. При этом надо иметь в виду следующее. Усилия от усадки оказываются настолько большими, что предотвратить продольное или поперечное сокращение зоны сварного соединения за счет жесткости закрепления в приспособлении обычно не удается. Поворот сечений может быть ограничен в более значительной степени и поэтому основное внимание следует обращать на предотвращение изгиба свариваемого изделия. С учетом вышесказанного можно выделить три характерных случая.

1. Снижение остаточных сварочных деформаций достигается путем предварительного изгиба свариваемых элементов при закреплении их в приспособлении. Расчет приспособления на прочность и жесткость должен учитывать наличие дополнительных усилий, необходимых для деформирования закрепляемого изделия.

2. Жесткое закрепление в приспособлении позволяет уменьшить временные деформации главным образом в процессе сборки и частично при сварке. В этом случае расчеты на жесткость и прочность должны выполняться с учетом моментов от усадочных усилий.

3. Жесткое закрепление в приспособлении не только на время сварки и охлаждения изделия, но и при термообработке для снятия остаточных напряжений, позволяет снижать остаточные деформации изгиба и потери устойчивости в значительной степени. При расчете таких приспособлений в дополнение к сказанному для случая 2 необходима проверка на жесткость в условиях выдержки в печи под действием сил тяжести, когда предел текучести металла оказывается заметно меньшим.

При конструктивной разработке приспособлений выбор размещения базовых поверхностей и расположения прижимов должен учитывать поводку изделия от сварки с тем, чтобы после выполнения сборочной или сварочной операции извлечение изделия из приспособления не вызывало затруднений.

Точность изготовления приспособления определяется требованиями к точности сборки изделия. Целесообразно при проектировании расстояния между базовыми поверхностями назначать с учетом ожидаемой деформации изделия от сварки.

В приспособлениях, осуществляющих перемещение или вращение изделия, существенным является вопрос выбора мощности привода и расчета передачи. За исключением случаев поворота изделий, неуравновешенных относительно оси вращения, сопротивление движению с постоянной скоростью обычно оказывается малым. Однако в момент включения привода инерционные усилия могут быть значительными и отсутствие их учета при выборе мощности привода и расчета передачи на прочность могут приводить к серьезным ошибкам.

Следует также учитывать возможность значительного возрастания сил трения в случае грубой обработки трущихся поверхностей или вследствие погрешностей сборки, приводящих к перекосу направляющих или осей подшипников.

ГЛАВА XIV

БАЛКИ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О БАЛКАХ

Балками называют элементы конструкций, работающие в основном на поперечный изгиб. Они входят в состав рам различного назначения (вагонов, кранов, станин, каркасов зданий),

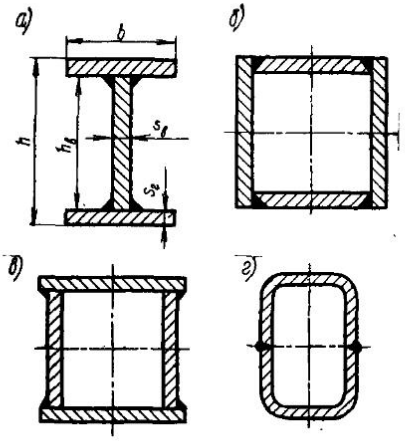


Рис. 14-1. Типы поперечных сечений сварных балок:
а) открытый тип сечения; б), в) г) закрытые профили

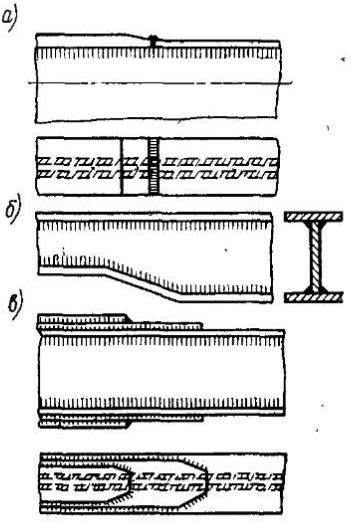


Рис. 14-2. Балки с переменными поперечными сечениями:
а) изменяется толщина листов; б) изменяется высота балки; в) изменяется число листов в поясах

перекрытий, мостов и других металлических конструкций и машин.

Наиболее часто применяют сварные балки двутаврового (рис. 14-1, *а*) и коробчатого (рис. 14-1, *б, в*) профилей, более

редко — с профилями, указанными на рис. 14-1, *г*. Двутавровые балки хорошо сопротивляются изгибу в плоскости своей наибольшей жесткости, коробчатые — изгибу в разных плоскостях и кручению. Балки с профилями, указанными на рис. 14-1, удобны в изготовлении, рациональны с позиции использования материала.

Поперечные сечения балок иногда изменяются по длине, если последняя значительна. В некоторых случаях изменяют толщину или ширину горизонтальных листов (рис. 14-2, *а*) (что более целесообразно). Иногда применяют несколько пар горизонтальных листов, если толщина каждого из них $s \geqslant 30 \div 35$ *мм*, при этом в менее нагруженных участках число листов уменьшают (рис. 14-2, *в*). В некоторых случаях изменяют высоту вертикальных листов (рис. 14-2, *б*).

Балки переменного сечения по сравнению с постоянным позволяют лучше использовать несущую способность металла по всей их длине. Они экономичнее по весу в сравнении с балками постоянного профиля, у которых значительная их часть работает при напряжениях, значительно меньше допускаемых. В технологическом отношении балки переменного профиля несколько сложнее. Вопрос выбора конструкций решается с экономических позиций, а иногда и с учетом общей компоновки и эстетики. Значительное большинство типовых балок имеют профиль, постоянный по длине.

§ 2. СХЕМА РАСЧЕТА БАЛОК

При расчете балок встречаются с тремя видами задач.

1. Заданы размеры балки, известны расчетные усилия — изгибающие моменты и поперечные силы. Требуется проверить прочность балки.

В этом случае по правилам курса «Сопротивление материалов» определяют нормальные и касательные напряжения.

2. Задана балка и заданы допускаемые напряжения. Требуется определить допускаемую нагрузку на балку. Эта задача также легко решается с использованием общеизвестных формул из курса «Сопротивление материалов».

3. Требуется спроектировать балку, обеспечивающую требуемую грузоподъемность. Эта задача является наиболее трудной по сравнению с первыми двумя. Решать ее надо следующим образом: от заданной нагрузки определяют опорные реакции, строят эпюры поперечных сил Q, изгибающих моментов M по длине и крутящих моментов, если последние имеют место.

При наличии подвижных нагрузок чертят линии влияния опорных реакций, затем Q и M для сечений $x=0$; $x=0{,}1l$; $x=0{,}2l$ и т. д. до $x=0{,}5l$.

В указанных сечениях вычисляют максимальные значения усилий при самом опасном для них положении подвижных нагрузок. После этого подбирают размеры поперечных сечений балки, обеспечивающие прочность.

§ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ УСИЛИЙ В БАЛКАХ МЕТОДОМ ЛИНИЙ ВЛИЯНИЯ

Расчетные усилия в балках часто удобно определять методом линий влияния. Этот метод особенно целесообразен при нахождении усилий в балках от движущихся систем грузов, которые могут занимать различные положения на изучаемой конструкции, например, от веса тележек, перемещающихся по балкам крана.

Метод линий влияния принят при расчете не только балок, но и ферм, рамных конструкций и особенно при расчете мостовых, крановых и других инженерных сооружений.

Линия влияния выражает зависимость усилия (или деформации) в каком-либо заданном сечении балки или элементе фермы от положения груза на них. В практических расчетах их всегда строят от одного груза, равного единице, и после этого построения используют для определения усилий (или деформаций) в изучаемом сечении или элементе при любом заданном загружении от нескольких сосредоточенных сил или распределенных нагрузок.

Линии влияния опорной реакции в однопролетной балке с шарнирными опорами. Линия влияния опорной реакции балки выражает зависимость величины реакции от положения груза, равного единице, на балке.

Обозначим расстояние груза до левой опоры через x, пролет балки — через l (рис. 14-3, *а*).

Реакция

$$A = 1 \cdot \frac{l - x}{l}.$$

Реакция A определяется уравнением наклонной прямой (рис. 14-3, *б*):

при $x = 0$ $A = 1$:

при $x = l$ $A = 0$;

Подобным же образом строится линия влияния реакции B (рис. 14-3, *б*).

Линии влияния изгибающего момента M. Линия влияния изгибающего момента M выражает зависимость величины момента в заданном сечении от положения груза, равного единице, на балке.

Допустим, что груз находится справа на расстоянии a от опоры (рис. 14-3, $в$).

При этом изгибающий момент равен

$$M_a = Aa = 1 \cdot \frac{l-x}{l}\, a,$$

где A — опорная реакция на левой опоре.

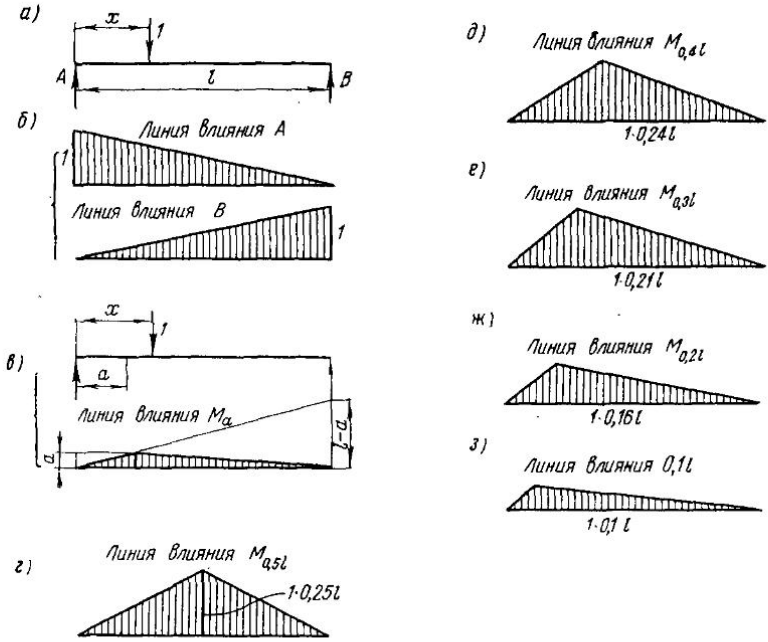


Рис. 14-3. К построению линии влияния опорных реакций и M в разных сечениях балки:
цифрами на рис. $д$—$з$ указаны наибольшие моменты в сечениях $0{,}5l$; $0{,}4l$ и т. д.

Построим линию влияния момента M (рис. 14-3, $в$) из условия, что

$$\text{при } x = 0 \quad M_a = 1 \cdot a;$$

$$\text{при } x = l \quad M_a = 0.$$

Так как было сделано предположение, что груз находится справа от сечения a, то построенная прямая верна лишь на участке $l \geqslant a$.

Допустим, что груз находится слева на расстоянии a от опоры.

Изгибающий момент целесообразно выразить в этом случае через величину правой опорной реакции

$$M_a = B\ (l - a) = 1 \cdot \frac{x}{l}\ (l - a),$$

где B — опорная реакция на правой опоре.

$$\text{При } x = 0 \quad M_a = 0;$$

$$\text{при } x = l \quad M_a = 0.$$

Так как было предположено, что груз находится слева от сечения a, то построенная прямая верна лишь на участке $x \leqslant a$.

Линия влияния M_a имеет форму треугольника, заштрихованного на рис. 14-3, *в* с вершиной в сечении a.

Если линия влияния строится для сечения $l/2$, то вертикальные отрезки, откладываемые на опорах, равны между собой и равны $1 \cdot l/2$. Высота треугольника в этом случае равна $1 \cdot l/4$ (рис. 14-3, *г*).

Подобным образом линии влияния M строятся для разных сечений балки, например: $0{,}4l$; $0{,}3l$; $0{,}2l$; $0{,}1l$ (рис. 14-3, *д*—*з*). Ординаты линий влияния M имеют размерность длины. Высоты треугольников равны $1 \cdot 0{,}25l$; $1 \cdot 0{,}24l$ и т. д.

Линии влияния поперечной силы Q. Линия влияния поперечной силы Q выражает зависимость величины поперечной силы в заданном сечении a от положения груза, равного единице, на балке.

Допустим, что груз находится справа от сечения a (рис. 14-4, *а*)

$$Q_a = A = 1 \cdot \frac{l - x}{l}.$$

Построим эту линию из условия, что

$$\text{при } x = 0 \quad Q_a = 1;$$
$$\text{при } x = l \quad Q_a = 0.$$

Прямая верна на участке $x \geqslant a$.

Допустим, что груз находится слева от сечения a. При этом

$$Q_a = -B = -1 \cdot \frac{x}{l}.$$

$$\text{при } x = 0 \quad Q_a = 0;$$
$$\text{при } x = l \quad Q_a = -1.$$

Эта линия верна на участке $x \leqslant a$, под исследуемым сечением она меняет знак.

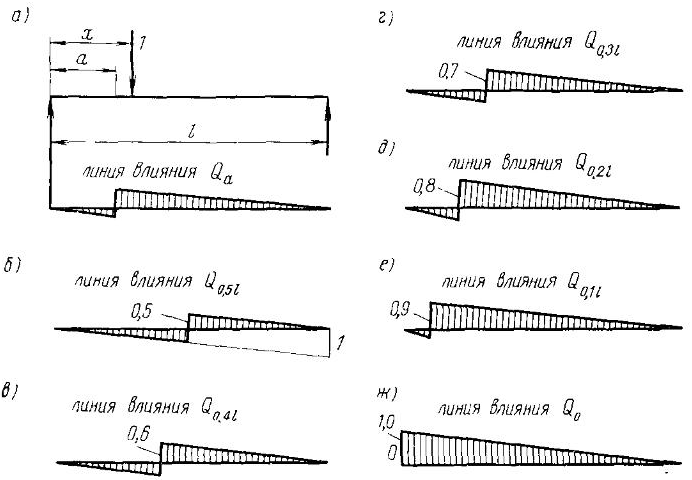


Рис. 14-4. К построению линий влияния поперечных сил Q в балках

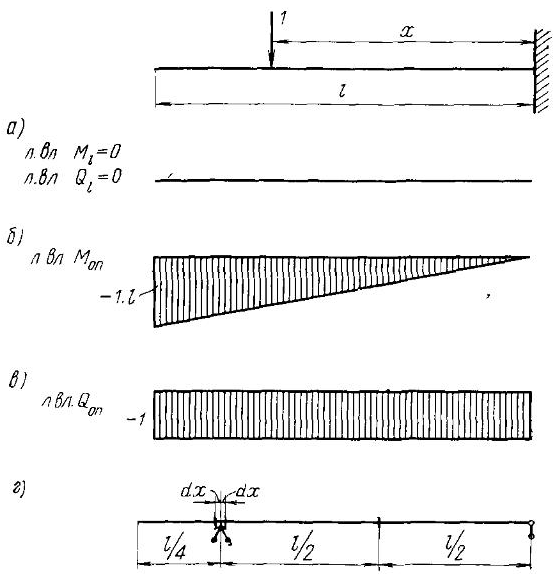


Рис. 14-5. К построению линий влияния в балках:

а), *б*), *в*) защемленной в стену; *г*) консольной

Линии влияния Q_a для сечений балки $0{,}5l$; $0{,}4l$; $0{,}3l$; $0{,}2l$; $0{,}1l$ и опорной реакции A показаны на рис. 14-4, *б*—*ж*. Ординаты линий влияния Q_a безразмерны.

Рассмотрим, как строятся линии влияния M и Q для балки, защемленной в стену (рис. 14-5).

В сечении на свободном конце M_l и Q_l всегда равны нулю, в каком бы месте ни находилась единичная сила на балке. Поэтому линии влияния для этого сечения являются нулевыми (рис. 14-5, *а*). В сечении на опоре $M_0 = -1x$, т. е. линия влияния имеет вид наклонной прямой. При $x=0$, т. е. когда сила находится в опорном сечении, $M_0=0$; при $x=l$ (груз на конце консоли) $M_0=-1l$ (рис. 14-5, *б*).

Поперечная сила в опорном сечении $Q_0=-1$, в каком бы сечении балки ни находился груз (рис. 14-5, *в*).

Использование линий влияния для определения усилий от системы сосредоточенных сил P и равномерно распределенной нагрузки q. Построенной линией влияния пользуются для определения усилия в заданном сечении балки от различной комбинации сосредоточенных и сплошных нагрузок.

Предположим, что для сечения на расстоянии a балки построена линия влияния некоторого усилия R, имеющая вид, показанный на рис. 14-6, *а*.

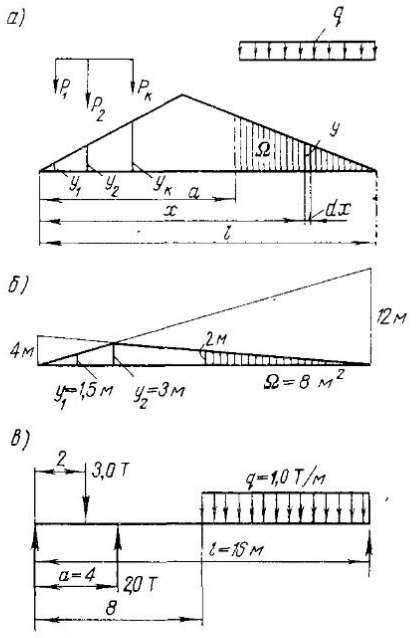


Рис. 14-6. Определение усилий от P и q на основе построенных линий влияния:

а) общее положение; *б*), *в*) к численному примеру расчета

Балка нагружена сосредоточенными силами P_1, P_2, $P_к$ и равномерной нагрузкой q на участке l—a.

Ординаты линии влияния под силами P_1, P_2, $P_к$ обозначим соответственно y_1, y_2, $y_к$.

Пользуясь принципом независимости действия сил, находим усилие в сечении

$$R_p = P_1y_1 + P_2y_2 + P_кy_к = \Sigma P_iy_i. \qquad (14.1)$$

Усилие от равномерной нагрузки найдем, заменив сосредоточенную нагрузку бесконечно большим количеством бесконечно малых сосредоточенных сил

$$R_q = \int_a^t q\,dxy = q\Omega, \tag{14.2}$$

где Ω — площадь линии влияния на длине загруженного участка.

Полное усилие

$$R = \Sigma P_i y_i + q\Omega. \tag{14.3}$$

R выражает собой продольную силу N, поперечную силу Q, момент M и т. д., в зависимости от построения линий влияния.

Пример расчета. Построить линию влияния момента M от единичной силы для $^1/_4$ пролета балки $l=16$ *м* (рис. 14-6, *б*) и определить изгибающий момент в этом сечении от системы сил, изображенных на рис. 14-6, *в*.

Для построения линии влияния момента в сечении на расстоянии a следует отложить на опорах вертикальные отрезки, равные $a=4$ *м* и $l-a=12$ *м* и провести наклонные прямые, определяющие заштрихованный треугольник.

Находим

$$y_1 = 12\,\frac{2}{16} = 1{,}5\ м,\quad y_2 = 12\,\frac{4}{16} = 3{,}0\ м,\quad \Omega = \frac{2\cdot 8}{2} = 8{,}0\ м^2.$$

Расчетное усилие (изгибающий момент) в сечении a (рис. 14-6, *в*) равен

$$M = 3{,}0\cdot 1{,}5 - 2{,}0\cdot 3 + 1\cdot 8{,}0 = 6{,}5\ Т\cdot м.$$

При расчете балок, нагруженных крановыми тележками, для определения наибольших изгибающих моментов и поперечных сил необходимо сначала построить линии влияния M и Q для поперечных сечений ($0{,}1l$; $0{,}2l$ и т. д.). Далее следует определить усилие от нагруженной тележки с учетом того, что она занимает на балке разные положения, при которых усилия в изучаемых сечениях ($0{,}1l$; $0{,}2l$ и т. д.) являются наибольшими.

Упражнение. Построить линии влияния Q для сечений $l/4-dx$ и $l/4+dx$ в балке на рис. 14-5, *г*.

§ 4. РАСЧЕТ ЖЕСТКОСТИ И ПРОЧНОСТИ

Балка должна удовлетворять требованию жесткости, т. е. ее прогиб от наибольшей нагрузки не должен превышать предельно допускаемого. Обычно в балках предельная величина отно-

шений f_{max}/l (где f_{max} — стрела прогиба балки) регламентируется нормами. Норма жесткости f_{max}/l для балок разных назначений различна, например, в подкрановых балках она должна быть не более $1/600 \div 1/700$, в главных балках междуэтажных перекрытий — около 1/400 и т. д.

Чтобы удовлетворить требованиям жесткости, балка заданной системы при определенном нагружении и заданных допу-

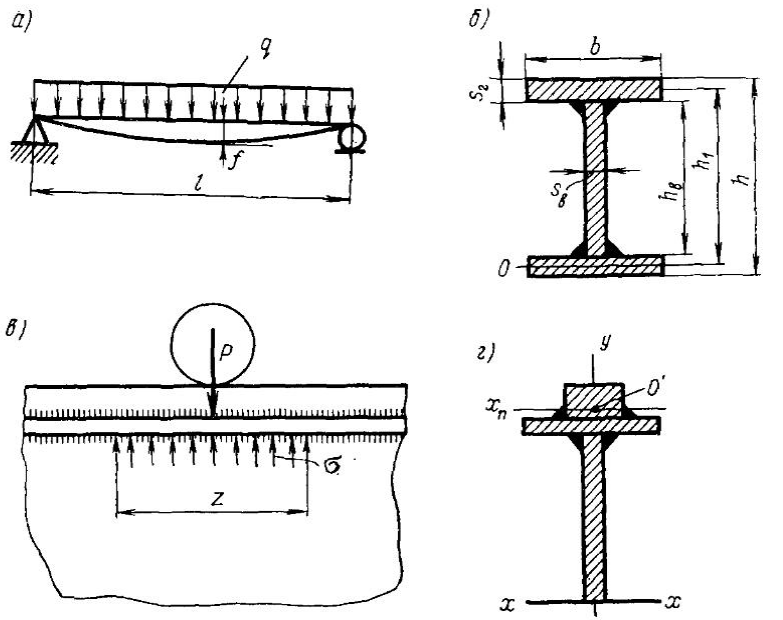


Рис. 14-7. К расчету сварной балки:

а) изогнутая ось балки от q; б) поперечное сечение балки; в), г) влияние сосредоточенной силы, вызывающей напряжения $\sigma = \sigma_{1L}$

скаемых напряжениях должна иметь высоту не менее некоторой предельной. Эта предельная величина определяется формулой, приводимой ниже.

Рассмотрим, какова должна быть предельно наименьшая высота балки, свободно лежащей на двух опорах, если она нагружена равномерной нагрузкой (рис. 14-7, *а*).

Величина расчетного прогиба

$$f = \frac{5}{384}\frac{ql^4}{EJ}, \qquad (14.4)$$

где EJ — жесткость балки.

Для рассматриваемой балки величина расчетного момента равна

$$M = \frac{ql^2}{8}.$$

Подставляя значение M в формулу (14.4), получим

$$f = \frac{5}{48} \frac{Ml^2}{EJ}. \qquad (14.5)$$

Величина изгибающего момента может быть выражена через произведение допускаемого напряжения на момент сопротивления сечения

$$M = [\sigma]_p W. \qquad (14.6)$$

Если расчетное сечение симметрично относительно горизонтальной оси, то

$$W = \frac{2J}{h},$$

где h — высота балки.

Подставив значение M из формулы (14.6) в формулу (14.5), получим

$$f = \frac{5[\sigma]_p l^2}{24Eh}, \qquad (14.7)$$

откуда

$$\frac{f}{l} = \frac{5[\sigma]_p l}{24Eh}$$

или

$$\frac{h}{l} = \frac{5[\sigma]_p l}{24Ef}. \qquad (14.8)$$

Высота балки, вычисленная по формуле (14.8), является наименьшей при заданных $[\sigma]_p$ и норме жесткости f/l и может быть увеличена, если это диктуется соображениями компоновки конструкции или экономии металла. Она уменьшается при уменьшении величины $[\sigma]_p$.

При других нагружениях и системах балок, например, консольных, многоопорных, с защемленными концами и т. п. в формуле (14.8) изменяется лишь численный коэффициент. Например, при нагружении однопролетной балки с шарнирными опорами сосредоточенной силой P в середине пролета отношение будет следующим:

$$\frac{h}{l} = \frac{1}{6} \frac{[\sigma]_p l}{Ef}. \qquad (14.8')$$

При действии моментов в двух плоскостях (вертикальной и горизонтальной) высота балки h определяется с учетом напряжения σ_x лишь от момента M_x, а ширина балки b — с учетом напряжения σ_y от момента M_y. Сумма $\sigma_x+\sigma_y$ должна быть $\leqslant [\sigma]_р$. Соотношение между σ_x и σ_y устанавливается приближенно на основе имеющегося опыта проектирования конструкции или способом последовательного приближения. При этом задаются ожидаемыми отношениями σ_x/σ_y и затем проверяют их правильность повторными расчетами.

Балка должна удовлетворять прочности при условии наименьшего веса. Поперечное сечение должно быть в этих условиях минимальным.

Высота балки может быть найдена по формулам:

для двутаврового профиля

$$h = 1{,}3 \div 1{,}4 \sqrt{\frac{M}{s_в [\sigma]_р}}; \qquad (14.9)$$

для коробчатого профиля

$$h = \sqrt{\frac{M}{s_в [\sigma]_р}}, \qquad (14.10)$$

где M — расчетный изгибающий момент балки;

$s_в$ — толщина вертикального листа.

При проектировании балок величина $s_в$ в формуле (14.9) неизвестна. Поэтому ее первоначально задают. Для разных строительных конструкций $s_в$ обычно изменяется в сравнительно узких пределах: в легких балках колеблется от 5 до 10 *мм*, в тяжелых — от 10 до 18 *мм*.

Высоты h, найденные по формулам, построенным с учетом требований достаточной жесткости [формула (14.8)] и прочности при условии наименьшего веса [формула (14.9)], могут оказаться совершенно различными. Из двух высот, вычисленных для балки двутаврового профиля по формулам (14.8) и (14.9), следует принять наибольшую величину, но во всяком случае не меньшую, чем высоту h, вычисленную по формуле (14.8).

Далее подбирают размеры поперечного сечения балки с учетом расчетного изгибающего момента M и высоты h.

Рассмотрим процесс подбора сечения двутаврового профиля (рис. 14-7, *б*). Для этого найдем требуемый момент сопротивления

$$W_{тр} = \frac{M}{[\sigma]_р} \qquad (14.11)$$

и требуемый момент инерции сечения

$$J_{тр} = W_{тр} \frac{h}{2}. \qquad (14.12)$$

Вычислим момент инерции вертикального листа высотой h и толщиной $s_в$

$$J_в = \frac{s_в h_в^3}{12} \tag{14.13}$$

(принимаем приближенно $h_в = 0{,}95h$).

Находим требуемый момент инерции двух горизонтальных листов

$$J_г = J_{тр} - J_в. \tag{14.14}$$

В другой форме момент инерции выразится так:

$$J_г = 2\left[J_0 + F_г\left(\frac{h_1}{2}\right)^2\right], \tag{14.15}$$

где J_0 — момент инерции горизонтального листа относительно собственной оси, который всегда очень мал и приближенно может быть принят равным нулю;

h_1 — расстояние между центрами тяжести горизонтальных листов, которое приближенно можно принять равным $0{,}95 \div 0{,}98h$.

Из уравнения (14.15) находим требуемую площадь сечения одного горизонтального листа

$$F_г = \frac{2J_г}{h_1^2}. \tag{14.16}$$

Подобрав размеры поперечного сечения балки, определим величины напряжений и таким образом проверим, что подобранные размеры удовлетворяют условиям прочности.

Напряжение от изгиба равно

$$\sigma = \frac{Mh}{J \cdot 2} \leqslant [\sigma]_р, \tag{14.17}$$

где J — момент инерции подобранного сечения.

Касательное напряжение от поперечной силы будет

$$\tau = \frac{QS}{Js_в}, \tag{14.18}$$

где Q — наибольшая поперечная сила балки;

S — статический момент полуплощади сечения (симметричного) относительно центра тяжести балки (рис. 14-7, *г*).

Эквивалентные напряжения проверяются обычно в тех случаях, когда максимальные значения M и Q совпадают в одном поперечном сечении. Их определяют на уровне верхней кромки вертикального листа

$$\sigma_э = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2}; \tag{14.19}$$

нормальное напряжение

$$\sigma_1 = \frac{Mh_в}{J \cdot 2}; \qquad (14.20)$$

касательное напряжение

$$\tau_1 = \frac{QS}{Js_в}, \qquad (14.21)$$

где S — статический момент площади горизонтального пояса относительно центра тяжести сечения балки.

В большинстве случаев эквивалентные напряжения $\sigma_э$ оказываются меньше σ, вычисленного по формуле (14.17).

При всех условиях расчетные напряжения σ, найденные по формуле (14.17), или $\sigma_э$, вычисленные по формуле (14.16), не должны превышать $1{,}05\,[\sigma]_р$.

Сечение считается подобранным рационально, если $\sigma = (0{,}95 \div 1{,}05)[\sigma]_р$.

Допустим, что к верхнему поясу балки прикладывают сосредоточенные перемещающиеся грузы (рис. 14-7, *в*). Это имеет место в крановых, подкрановых и мостовых балках. При этом определяют прочность вертикального листа с учетом местного напряжения под грузом

$$\sigma_м = \frac{mP}{s_в z}, \qquad (14.22)$$

где P — величина сосредоточенного груза;

m — коэффициент, равный 1,5 при тяжелом режиме работы балки (например, в металлургических цехах) и 1,0 при легком режиме (например, в ремонтных);

z — условная длина, на которой сосредоточенный груз распределяется в вертикальном листе (рис. 14-7, *в*);

$$z = 3{,}25 \sqrt[3]{\frac{J_n}{s_в}}. \qquad (14.23)$$

Здесь J_n — момент инерции горизонтального листа совместно с приваренным к нему рельсом (если таковой имеется) относительно оси x_n, проходящей через их общий центр тяжести O' (рис. 14-7, *г*).

§ 5. ОБЩАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Чтобы обеспечить общую устойчивость балки таврового профиля, у которой J_x велик по сравнению с J_y, следует прибегнуть к одному из двух мероприятий.

1. Укоротить свободную длину изгибаемого элемента. Например, если установлены параллельно две изгибаемых балки *1* и *2*,

то их следует взаимно соединить связями (рис. 14-8), особенно сжатые пояса. Такие связи ставят в подкрановых балках, мостовых кранах и т. п. Момент инерции двух балок, соединенных связями, во много раз больше момента инерции в горизонтальной плоскости каждой из балок в отдельности.

2. Снизить величину допускаемых напряжений. Проверку напряжений в изгибаемой балке с учетом требований обеспечения общей устойчивости проводят по формуле

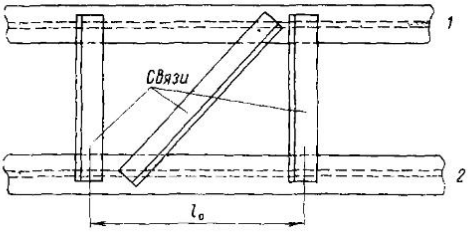


Рис. 14-8. К определению расстояния l_0 между закреплениями балки в горизонтальной плоскости

$$\sigma = \frac{M}{W} \leqslant [\sigma]_p \varphi, \quad (14.24)$$

где φ — коэффициент уменьшения допускаемых напряжений в балке с учетом обеспечения ее устойчивости.

В балках двутаврового профиля

$$\varphi = \psi \frac{J_x}{J_y} \left(\frac{h}{l_0}\right)^2 \cdot 10^3, \quad (14.25)$$

где J_x и J_y — моменты инерции относительно осей x и y;
h — полная высота балки;
l_0 — пролет балки или расстояния между закреплениями, препятствующими перемещениям в горизонтальной плоскости.

Если вычисленное значение $\varphi \geqslant 0{,}85$, то его следует принимать равным 0,85;

если $\varphi \geqslant 1{,}00$, то следует принимать $\varphi = 0{,}90$;
если $\varphi \geqslant 1{,}25$, то « « $\varphi = 0{,}96$;
если $\varphi \geqslant 1{,}55$, то « « $\varphi = 1{,}00$.

Коэффициент ψ является функцией α. Графически это представлено на рис. 14-9. Величина α находится по формуле

$$\alpha = 8\left(\frac{l_0 s_г}{bh}\right)^2 \left(1 + \frac{h_в s_в^3}{2bs_г^3}\right), \quad (14.26)$$

где b — ширина пояса;
$s_г$ — толщина горизонтального листа;
$s_в$ — толщина вертикального листа.

При проектировании балок целесообразно поступить следующим образом: предварительно задаться отношением l_0/b в пре-

делах $10 \div 20$; определить по формуле (14.26) α и по формуле (14.25) — φ. Коэффициент φ, вычисленный по формуле (14.25) должен быть равен около 1 или больше ее.

§ 6. МЕСТНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Помимо проверки общей устойчивости, необходимо проверить на местную устойчивость отдельные ее элементы. В сжатых поясах потеря устойчивости происходит вследствие того, что напряжение сжатия $\sigma = \sigma_{кр}$. Чтобы исключить возможность этого явления, следует иметь ширину пояса $b \leqslant 30s$.

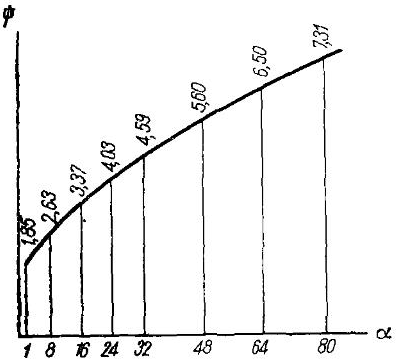


Рис. 14-9. Определение коэффициента ψ в функции α

В вертикальных листах балок потеря устойчивости может быть вызвана нормальными сжимающими напряжениями, касательными напряжениями и комбинацией нормальных и касательных напряжений,

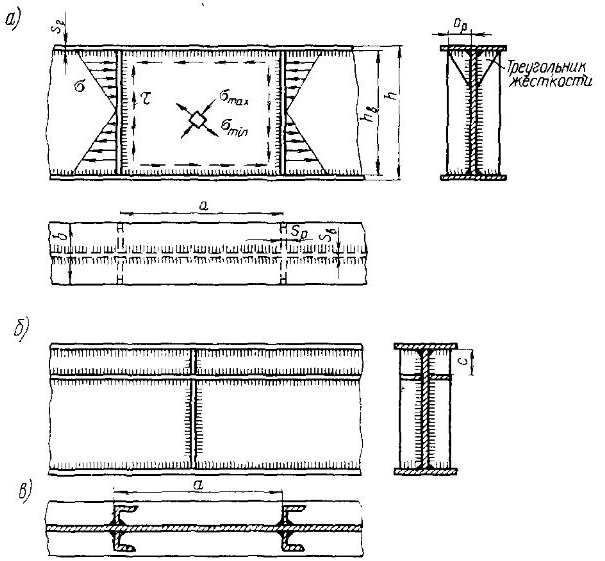


Рис. 14-10. К вопросу расчета местной устойчивости вертикальных листов балок:

а) образование напряжений σ и τ, вызывающих потерю устойчивости; *б*), *в*) постановка вертикальных ребер жесткости

Наиболее опасными в отношении потери устойчивости являются касательные напряжения τ. Они вызывают в диагональных поперечных сечениях сжимающие и растягивающие напряжения.

Величина критических касательных напряжений (рис. 14-10, *а*), вызывающих потерю устойчивости вертикального листа, определяется по формуле

$$\tau_{кр} = V_0 \frac{E}{1-\mu^2}\left(\frac{s_в}{h_в}\right)^2, \qquad (14.27)$$

где μ — коэффициент Пуассона, равный 0,3;

$h_в$ — высота вертикального листа;

V_0 — коэффициент, зависящий от отношения длины вертикального листа между его закреплениями a к его высоте h.

Если балка имеет значительную длину, а вертикальный лист не имеет закреплений, то отношение a/h велико и V_0 можно принять равным 4,4.

Критические нормальные напряжения в вертикальном листе балок вычисляются по формуле, аналогичной формуле (14.27), но при других значениях коэффициента V_0. Они при определении $\sigma_{кр}$ оказываются выше, чем при $\tau_{кр}$. В балках значительной длины V_0 составляет около 19. Таким образом, потеря устойчивости от $\sigma_{кр}$ менее вероятна, чем от $\tau_{кр}$. В действительности при определении устойчивости вертикальных листов балок приходится учитывать комбинированное действие нескольких видов напряжений (см. § 7).

Для повышения местной устойчивости вертикального листа, т. е. для увеличения $\tau_{кр}$, следует при заданной высоте балки уменьшить a. Это достигается постановкой ребер жесткости.

Проверку устойчивости вертикального листа не производят в балках из малоуглеродистой стали, если:

при отсутствии сосредоточенных сил, перемещающихся по балке,

$$\frac{h_в}{s_в} \leqslant 120\sqrt{\frac{21}{\sigma_т}}, \qquad (14.27')$$

а при наличии сосредоточенных сил, перемещающихся по балке,

$$\frac{h_в}{s_в} \leqslant 80\sqrt{\frac{21}{\sigma_т}}, \qquad (14.27'')$$

где $\sigma_т$ измеряется в *кГ/мм²*.

§ 7. РЕБРА ЖЕСТКОСТИ

Если условия (14.27′) и (14.27″) не соблюдены, то необходима постановка вертикальных ребер жесткости. Обычно их конструируют из полос, реже — из профильного материала

(рис. 14-10, *б*, *в*). Ширину ребра принимают $b_р \geqslant \frac{h_р}{30} + 40$ *мм*, толщину — не менее $^1/_{15}$ ширины.

Расстояние между ребрами жесткости определяется величиной напряжений и размерами балки.

Для обеспечения местной устойчивости вертикального листа должно быть удовлетворено следующее условие:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} + \frac{\sigma_\mu}{\sigma_{\mu_0}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^2} \leqslant 1 \qquad (14.28)$$

(для подкрановых балок $\leqslant 0{,}9$),

где σ_μ — напряжение под сосредоточенной силой [см. формулу (14.22)];

σ — нормальное напряжение на верхней кромке вертикального листа, равное

$$\sigma = \frac{M}{J}\,\frac{h_в}{2}; \qquad (14.29)$$

τ — среднее касательное напряжение, равное

$$\tau = \frac{Q}{h_в s_в}; \qquad (14.30)$$

$$\sigma_0 = 750\,\frac{10^3 s_в}{h_в}\ кГ/см^2; \qquad (14.31)$$

$$\tau_0 = \left(1250 + \frac{950}{\nu^2}\right)\left(\frac{100\,s_в}{d}\right)^2 кГ/см^2, \qquad (14.32)$$

где d — наименьшая из сторон a и $h_в$, заключенная между горизонтальными листами и ребрами жесткости;

ν — отношение большей стороны (a или $h_в$) к меньшей.

Величина σ_{μ_0} определяется по формуле

$$\sigma_{\mu_0} = K_1 10^7 \left(\frac{s_в}{a}\right)^2 кГ/см^2. \qquad (14.33)$$

Значения K_1 находятся по графику, приведенному на рис. 14-11.

Помимо основных ребер жесткости, устанавливаемых по всей высоте вертикального листа балки, в интервалах между ними иногда ставят укороченные ребра жесткости треугольного очертания (см. рис. 14-10, *а*). Их длина составляет около $^1/_3$ $h_в$. Укороченные ребра (треугольники жесткости) ставят при воздействии на пояс балок сосредоточенных грузов большой величины. Как правило, наличие укороченных ребер нежелательно, так

как асимметричное их расположение относительно оси вызывает при сварке искривление балки в вертикальной плоскости.

В балках очень большой высоты иногда ставят горизонтальные ребра жесткости. Их располагают на расстоянии $c=(1/4 \div 1/5)h_в$ от верхнего горизонтального листа (см. рис. 14-10, *б*).

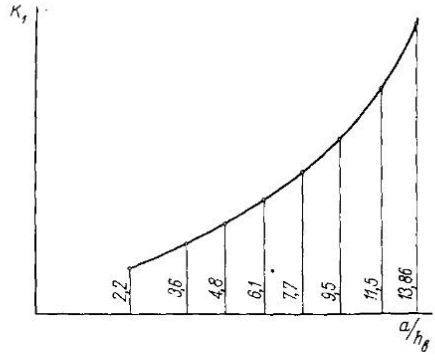


Рис. 14-11. Зависимость коэффициента K_1 от отношения $\frac{a}{h_в}$

§ 8. РАБОТА НА КРУЧЕНИЕ

В тех случаях, когда балки работают на кручение, применение балок двутаврового профиля становится нецелесообразным.

Напряжение от кручения в незамкнутых профилях (двутавровых, уголковых и т. д.) равно (рис. 14-12, *а*)

$$\tau = \frac{M_{кр} s_{max}}{\alpha \Sigma V_i s_i^3 a_i}, \qquad (14.34)$$

где V_i — коэффициент, зависящий от отношения $\frac{s_i}{a_i}$; он может быть приближенно принят равным 0,33; $\alpha=1$ для уголка; $\alpha=1{,}3$ для двутаврового профиля;

a_i — наибольший размер стороны прямоугольника (вертикального или горизонтального листа);

s_i — наименьший размер стороны того же прямоугольника;

s_{max} — наибольшая толщина профиля.

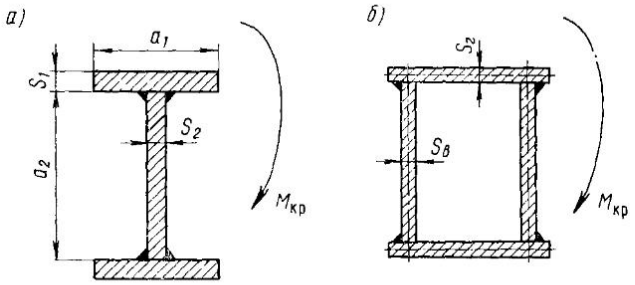


Рис. 14-12. К расчету балки на кручение:

а) двутаврового открытого профиля; *б)* трубчатого закрытого профиля

Так как момент сопротивления оказывается, как правило, малым, то напряжение τ значительно.

При двутавровом профиле

$$\alpha \Sigma V_i s^3 a_i = 1{,}3 \cdot 0{,}33 \left(s_в^3 h_в + 2 s_п^3 b_п\right),$$

где $s_в$ — толщина стенки;
$h_в$ — ее высота;
$s_п$ — толщина пояса;
$b_п$ — его ширина.

При кручении целесообразно применение сварных балок коробчатого поперечного сечения. Напряжение от крутящего момента с достаточной степенью точности может быть найдено по формуле

$$\tau = \frac{M}{2 F s_{min}} \leqslant [\tau], \qquad (14.35)$$

где F — площадь сечения прямоугольника (рис. 14-12, *б*), ограниченного штрихпунктирными линиями;
s_{min} — наименьшая толщина вертикального или горизонтального листа.

Так как F велико, то напряжение τ оказывается незначительным.

§ 9. РАСЧЕТ С УЧЕТОМ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

При проектировании строительных конструкций, работающих под статическими нагрузками, применяется метод расчета балок с учетом пластичности материала. Этот метод расчета будем называть *пластическим методом* в отличие от так называемого *упругого метода,* который изложен выше. В основе пластического метода расчета лежит схематизированная диаграмма растяжения (рис. 14-13, *а*).

Рассмотрим сопротивление элемента при изгибе нагруженной балки, показанной на рис. 14-13, *б*; элемент имеет тавровое поперечное сечение (рис. 14-13, *в*).

В первой упругой стадии работы элемента напряжение распределяется в поперечном сечении по прямолинейному закону. Элемент в первой стадии работает, пока напряжение в крайнем волокне материала не станет равным $\sigma_т$ (рис. 14-13, *г*).

Во второй упруго-пластической стадии часть материала поперечного сечения элемента работает упруго, а часть упруго-пластически. Сечение балки продолжает оставаться плоским.

В третьей стадии работы поперечного сечения элемента упругая зона исчезает. Это — предельная стадия. Равновесие между внешними и внутренними силами нарушается. Поперечное сечение балки начинает работать как пластический шарнир. Дефор-

мации элемента интенсивно растут. Такое состояние рассматривается, как разрушение балки.

При образовании пластического шарнира нулевая линия, разделяющая сечение на две равновеликие части, смещается вверх относительно центра тяжести (рис. 14-13, *д*).

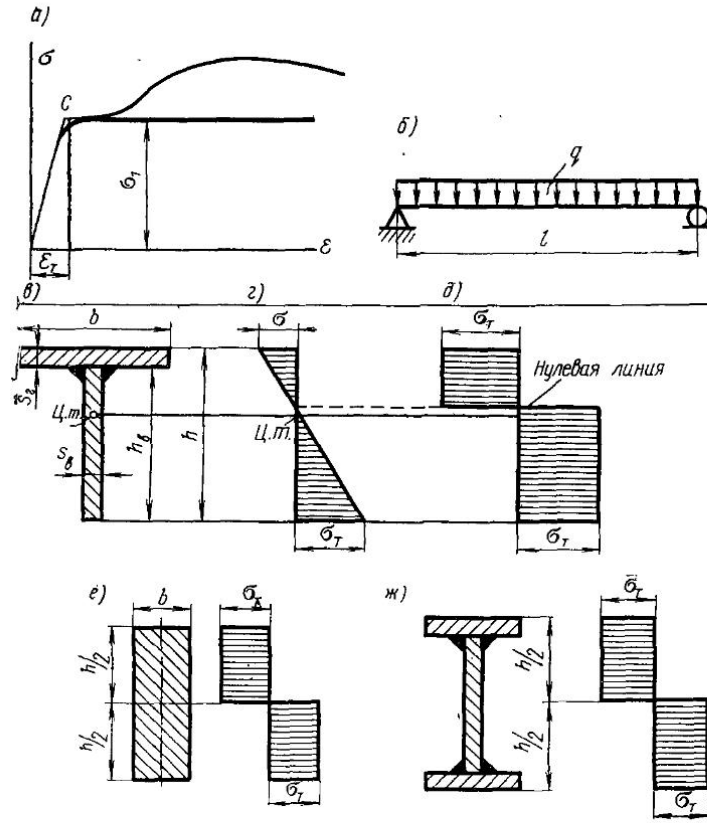


Рис. 14-13. Расчет балок на изгиб с учетом упруго-пластических деформаций:

а) схематизированная диаграмма деформаций; *б*) изгибаемая балка; *в*), *г*), *д*) упругие пластические деформации в поперечном сечении балки таврового профиля; *е*) то же, прямоугольного; *ж*) то же, двутаврового

При этом напряжение в крайних волокнах равно

$$\sigma = \frac{M}{2S}, \qquad (14.36)$$

где M — изгибающий момент, при котором образуется пластический шарнир (все сечение охвачено текучестью).

S — статический момент половины площади поперечного сечения изгибаемого элемента относительно его центра тяжести.

При расчете по пластическому методу допускаемый момент равен

$$M_{\text{доп}} = \frac{M_{\text{т}}}{n} = \frac{\sigma_{\text{т}} 2S}{n}, \tag{14.37}$$

где n — коэффициент запаса прочности, равный 1,7 или 1,5.

С другой стороны, по теории упругих деформаций

$$M_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{\text{т}} W}{n}. \tag{14.38}$$

Учет пластичности позволяет при расчете на изгиб заменять момент сопротивления W величиной $2S$. Ее обозначают через $W_{\text{пласт}}$.

Рассмотрим, насколько эффективна подобная замена для разных поперечных сечений. Эффективность оценивается отношением $2S/W$.

Рассмотрим несколько примеров определения $2S/W$:

а) элемент имеет прямоугольное поперечное сечение (рис. 14-13, *е*)

$$W = \frac{bh^2}{6}, \quad S = \frac{bh}{2} \cdot \frac{h}{4}, \quad 2S/W = 1{,}5;$$

б) элемент имеет двутавровый профиль (рис. 14-13, *ж*).

Если принять площадь одного пояса равной 0,5 площади вертикальной стенки, то

$$W \approx \frac{2}{3} s_{\text{в}} h^2, \quad 2S \approx \frac{3}{4} s_{\text{в}} h^2, \quad 2S/W \approx 1{,}13.$$

В нормальных прокатных двутаврах

$$2S/W = 1{,}13 \div 1{,}18.$$

Отношение $2S/W$ особенно значительно возрастает в элементах, имеющих расположение материала, асимметричное относительно оси x.

Чем выше $2S/W$, тем лучше используется сечение при расчете по методу пластических деформаций, по сравнению с методом упругих деформаций.

Указанный метод может быть использован для ориентировочной оценки предельных нагрузок, которые могут выдерживать балки при статических нагружениях.

§ 10. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Горизонтальные листы соединяются с вертикальными поясными швами. Они, как правило, угловые (рис. 14-14, *а*) и в редких случаях при наличии сосредоточенных перемещающихся грузов большой величины или действии переменных нагрузок — с подготовкой кромок.

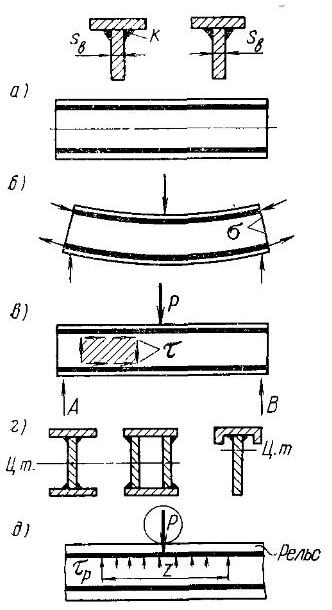


Рис. 14-14. К расчету поясных швов сварных балок:

а) швы без подготовки кромок; *б)* связующие напряжения σ от изгиба; *в), г)* примеры сварных соединений в различных профилях балок; *д)* образование в швах рабочих напряжений τ_p под сосредоточенной силой

Если балка работает на поперечный изгиб, то в поясных швах возникают связующие нормальные напряжения σ вследствие совместной деформации шва и основного металла, которые в учет не принимаются (рис. 14-14, *б*), и рабочие касательные τ (рис. 14-14, *в*). Поясные швы обеспечивают работу на изгиб всего сечения как единого целого. Срезывающие усилия на уровне крайних кромок вертикального листа на единицу длины определяются по формуле

$$T = \frac{QS}{J}, \qquad (14.39)$$

где Q — расчетная поперечная сила в рассматриваемом сечении;

J — момент инерции всего сечения;

S — статический момент площади пояса (горизонтального листа и рельса, если таковой имеется) относительно центра тяжести сечения балки.

Касательные напряжения τ от усилия T являются рабочими. Их роль в балке существенна, несмотря на относительно небольшую величину.

В швах с катетом $к$ касательные напряжения равны

$$\tau = \frac{QS}{J \cdot 2 \cdot 0{,}7\,к}. \qquad (14.40)$$

При наличии в вертикальном листе подготовки кромок определение касательных напряжений производится по формуле

$$\tau = \frac{QS}{Js_в}. \qquad (14.41)$$

При сварке конструкций, у которых толщина листов $s > 4$ *мм*, величину κ принимают также $\geqslant 4$ *мм*.

Прерывистые швы нецелесообразны, так как при этом затрудняется применение автоматической сварки.

При наличии на балке сосредоточенных перемещающихся грузов поясные швы принимают некоторое участие в передаче нагрузки с горизонтального листа на вертикальный (рис. 14-14, *д*). Это имеет место вследствие неплотного их взаимного соприкосновения. Если груз перемещается по рельсу, прикрепленному к поясу балки, то напряжение $\tau_р$ в поясных швах определяется по формуле

$$\tau_р = \frac{nP}{z \cdot 2 \cdot 0{,}7\,\kappa}, \qquad (14.42)$$

где P — величина сосредоточенного груза;

n — коэффициент, зависящий от характера обработки кромки вертикального листа (обычно $n = 0{,}4$);

z — расчетная длина шва, по которой происходит передача давления с пояса на вертикальный лист [по формуле (14.23)].

После вычисления $\tau_р$ по формуле (14.42) определяют условное результирующее напряжение

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau^2 + \tau_р^2} \leqslant [\tau']. \qquad (14.43)$$

Швы, приваривающие ребра жесткости, как правило, расчетом на прочность не проверяются. Они выполняются угловыми с катетом $\kappa = 0{,}5 \div 1{,}0 s_в$, где $s_в$ — толщина вертикального листа. Эти швы в опорных сечениях, а также в местах приложения сосредоточенных сил непременно выполняют непрерывными. Ребра жесткости вне опорных сечений в наиболее напряженных волокнах растянутой зоны иногда не привариваются.

§ 11. СТЫКИ

Расчет прочности стыков балок (рис. 14-15) производится обычно на изгибающий момент. Напряжение в стыке равно

$$\sigma = \frac{M}{W} \leqslant [\sigma']_р. \qquad (14.44)$$

Если допускаемое напряжение в соединении (в шве или прилегающем к шву металле) $[\sigma']_р$ принимается меньше $[\sigma]_р$, то такой стык оказывается неравнопрочным целому сечению. В этом случае стыки целесообразно помещать в сечениях, удаленных от

зон максимальных моментов, и уравнение (14.44) в этих условиях удовлетворяется.

Если $\sigma > [\sigma']_р$, а стык должен находиться в зоне, где σ имеет максимальное значение, то допускается произвести местное усиление балки привариванием к ее поясам дополнительных горизонтальных листов, увеличивающих ее момент инерции и момент сопротивления в расчетном сечении. При этом

$$\sigma = \frac{M}{W'} \leqslant [\sigma']_р, \qquad (14.45)$$

где W' — момент сопротивления сечения балки усиленной приваркой накладок.

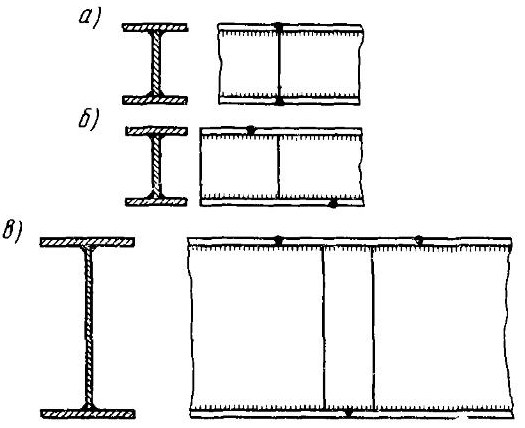


Рис. 14-15. Стыки сварных двутавровых балок:
а) универсальные (все элементы стыкуются в одном сечении); *б*) частичные; *в*) со вставками

К накладкам прибегают редко, так как они являются источником образования концентрации напряжений и их применение нерационально при работе балок под переменными усилиями.

В некоторых случаях стыки проектируют косыми. Они неудобны в технологическом отношении. Более рационально применение обычных прямых стыков, выполненных технологическим процессом высокого качества при обязательном проваре корня швов.

§ 12. ПРИМЕНЕНИЕ ШТАМПОВАННЫХ И ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Типы поперечных сечений балок из штампованных и гнутых профилей показаны на рис. 14-16. Как правило, это конструкции тонкостенные при $s = 1 \div 5$ *мм*.

Особенно экономичны тонкостенные конструкции, используемые в вертикальных стенках, как известно, слабо напряженных в большей своей части при работе балки на изгиб.

Очень рационально применение тонкостенных штампованных и гнутых элементов, соединенных контактной точечной сваркой. Дуговая сварка гнутых элементов в некоторых случаях ослож-

няется, если укладку шва производят по зоне, которая подвергнута пластической деформации, вызванной в процессе изготовления элемента. В этих зонах возможно состаривание металла, т. е. ухудшение пластических свойств и образование трещин. Сварные точки располагают в зонах, удаленных от зон пластического деформирования, и это обстоятельство является положительным.

Размеры точек определяются технологическими параметрами (см. гл. IV).

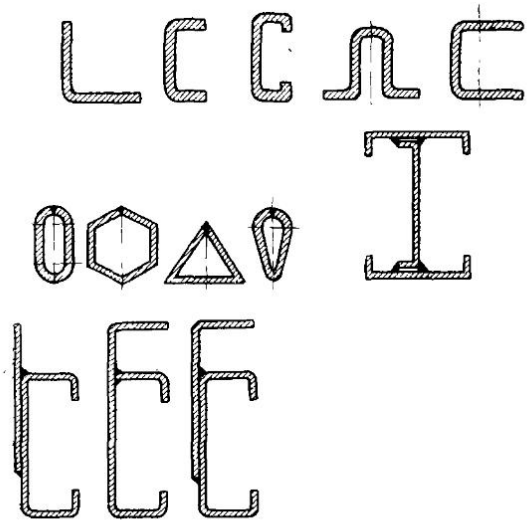


Рис. 14-16. Облегченные конструкции балок из гнутых и штампованных профилей

В поперечных сечениях балок, изображенных на рис. 14-17, *а, б,* точки являются связующими. Они не несут рабочих усилий и расчету на прочность не подлежат.

В сечениях балок, изображенных на рис. 14-17, *в—з,* точки являются рабочими. Срезывающее усилие на единицу длины балки определяется по формуле

$$T_1 = \frac{QS}{J}, \tag{14.46}$$

где Q — поперечная сила в рассматриваемом сечении;
S — статический момент горизонтального листа относительно центра тяжести сечения;
J — момент инерции всего сечения.

Касательное усилие, которое действует по длине балки, равной расстоянию между точками t, равно

$$T = \frac{QS}{J}\, t. \qquad (14.47)$$

Шаг (расстояние между точками) t должен быть $\leqslant 30s_{\min}$ в сжатой зоне и $\leqslant 40s_{\min}$ в растянутой.

Срезывающее напряжение в точке находится по формуле

$$\tau = \frac{T}{2\frac{\pi d^2}{4}},$$

где d — диаметр точки; (в сечении находятся две точки).

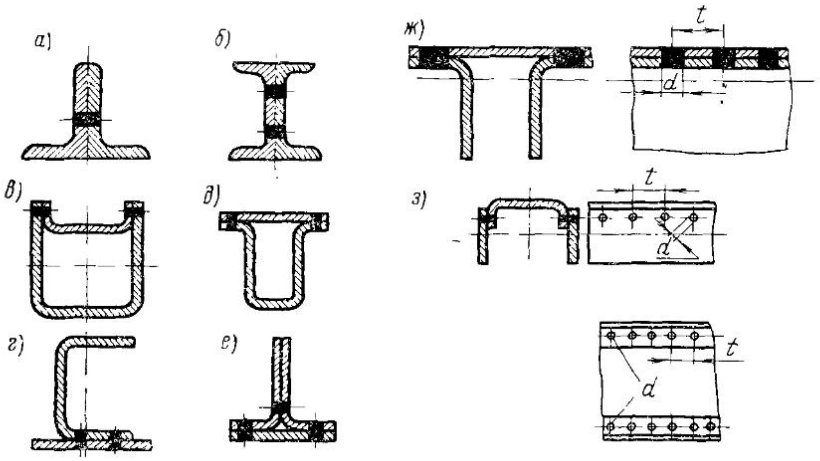


Рис. 14-17. Примеры поперечных сечений балок, сваренных точками:
а, б) связующие соединения, *в—з)* рабочие соединения

Обычно рабочие напряжения точек в конструкциях указанного типа незначительны по величине.

§ 13. ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Для алюминиевых балок рекомендуется применение сплавов: *АВ* (Al+Mg+Si); алюминиево-магниевых (АМг5, АМг6, АМг61), алюминиево-магниево-цинковых (В92). В этих сплавах в зависимости от состояния их термической обработки пределы прочности сварных соединений встык $\sigma'_{в}$ составляют $0{,}6 \div 0{,}9\sigma_{в}$. С повышением прочности сплава понижаются указанные выше

коэффициенты. Для повышения прочности стыковых соединений в отдельных случаях применяют косые швы.

Целесообразно применение прессованных, штампованных и гнутых профилей. При конструировании алюминиевых балок следует избегать концентрации напряжений, особенно в зонах сварных соединений. На рис. 14-18 показана конструкция сварных балок из алюминиевых сплавов. Швы не находятся в зонах наибольших нормальных напряжений. На рис. 14-19 изображена конструкция сварной подкрановой балки из алюминиевого сплава. В ней применены стыковые соединения; сварные швы по возможности вынесены за пределы зон со значительными концентраторами напряжений.

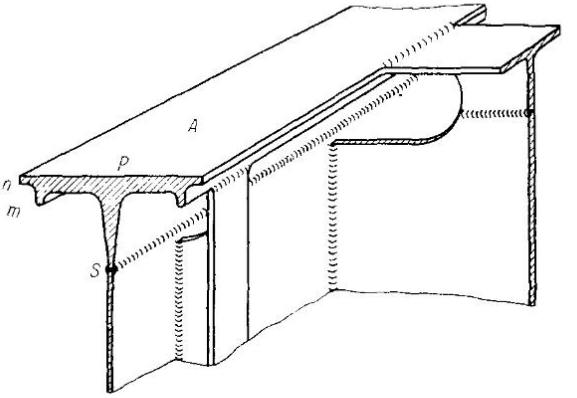


Рис. 14-18. Конструкция сварных балок из алюминиевых сплавов

Профили из алюминиевых сплавов, полученные прессованием, позволяют резко сократить количество связующих швов. Эти профили хорошо сопротивляются различным силовым воздействиям: изгибающим моментам, кручению, сложному сопротивлению.

Конструкции из алюминиевых сплавов имеют значительно меньшую жесткость по сравнению со стальными. Максимальные величины отношений f/l (стрелы прогиба к величине пролета) приведены ниже.

Балки:	f/l
подкрановые балки (грузоподъемность крана 50,0 *T*)	1/600
балки междуэтажных перекрытий	1/400÷1/200
балки покрытий	1/250÷1/200

Если для сварных алюминиевых балок отношение высоты к толщине вертикального листа составляет $h/s_в \leqslant 80$ для сплава АМг, $h/s_в \leqslant 70$ — для сплава АВТ-1 (термически обработанного и искусственно состаренного), то ребра жесткости не ставятся или их ставят на взаимном расстоянии, равном $2{,}4h$.

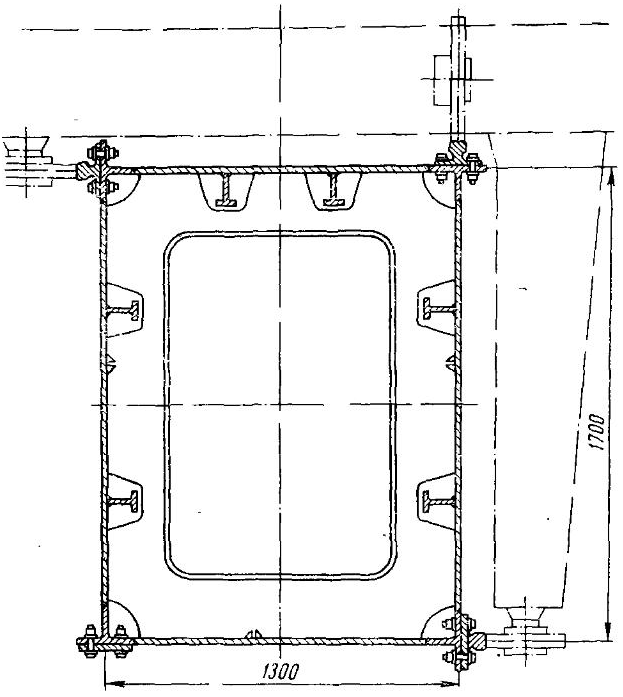


Рис. 14-19. Сварная подкрановая балка из алюминиевого сплава

Проверка устойчивости стенки, подкрепленной только вертикальными ребрами жесткости (см. рис. 14-10), производится из условия

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^2} \leqslant V, \qquad (14.48)$$

где σ — расчетное напряжение на верхней кромке вертикального листа.

$$\sigma = \frac{M}{J}\,\frac{h_в}{2}; \qquad (14.49)$$

$$\sigma_0 = 21 \left(\frac{100\, s_в}{h_в}\right)^2 \ кГ/мм^2; \tag{14.50}$$

$$\tau = \frac{Q}{h_в s_в}. \tag{14.51}$$

Здесь $s_в$ — толщина вертикального листа;
$h_в$ — его высота;
τ — среднее касательное напряжение;

$$\tau_0 = \left(4{,}2 + \frac{3{,}2}{\mu^2}\right) \left(\frac{100\, s_в}{d}\right)^2 \ кГ/мм^2, \tag{14.52}$$

где d — меньшая из величин a и $h_в$;
μ — отношение бóльшей стороны прямоугольника, образуемого сторонами a и $h_в$, к меньшей.

Значение коэффициента V определяется в зависимости от эквивалентного напряжения

$$\sigma_i = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)^2 \sigma^2 + 3\tau^2} \tag{14.53}$$

при

$$\frac{\sigma_i}{[\sigma]_р} = 0{,}66; \quad 0{,}75; \quad 0{,}90; \quad 1{,}00.$$

$$V = 1{,}00; \quad 0{,}92; \quad 0{,}70; \quad 0{,}50.$$

Толщина ребер жесткости должна быть $\geqslant \frac{1}{12}$ их ширины, а ширина $\frac{h_в}{30} + 40$ *мм*.

Проверка общей устойчивости сварных алюминиевых балок, работающих под действием изгибающего момента M, производится по формуле

$$\frac{M}{W\varphi_в} \leqslant [\sigma]_р.$$

Коэффициент $\varphi_в$ определяется из выражения

$$\varphi_в = \psi \frac{J_y}{J_x} \left(\frac{h}{l}\right)^2 \cdot 10^3, \tag{14.54}$$

где J_x и J_y — моменты инерции сечения балки относительно главных центральных осей;
l — длина балки или расстояние между ее закреплениями в горизонтальной плоскости;
h — высота балки;

ψ — коэффициент, определяемый по графику, представленному на рис. 14-20, в зависимости от коэффициента α, который находится из соотношения

$$\alpha = 1{,}54\,\frac{J_x}{J_y}\left(\frac{l}{h}\right)^2. \qquad (14.55)$$

Этот коэффициент применим для сплава Д16-Т.

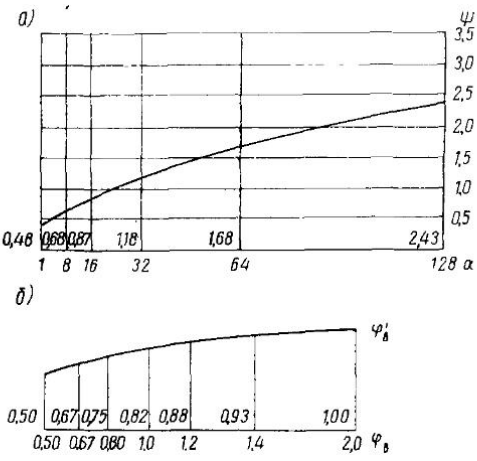


Рис. 14-20. Определение коэффициентов ψ в функции α ($а$) и $\varphi_в'$ в функции $\varphi_в$ ($б$)

Значения ψ перед подстановкой в формулу (14.54) для изделий из сплава АВТ-1, АМг61-М умножаются на 1,57, а для сплава АМг6-М — на 1,38.

При проверке устойчивости поступают следующим образом: задаются отношением l/h, далее по формуле (14.55) находят α и по графику (рис. 14-20, $а$) находят ψ, а по формуле (14.54) — $\varphi_в$. Если значения $\varphi_в$ окажутся выше 0,67, то вместо $\varphi_в$ следует принимать коэффициенты $\varphi_в'$, которые даны на графике рис. 14-20, $б$.

§ 14. ОПОРНЫЕ ЧАСТИ

Опорные части балок чаще всего конструируют в форме выпуклых плит, чтобы обеспечить шарнирность опирания. Реже плиты делают плоскими, что нерационально. При очень больших нагрузках опорные части, например, железно- и автодорожных мостов, выполняют сварными.

Пример конструкции опорной выпуклой плиты приведен на рис. 14-21. На одной из опор балка, как правило, имеет продольную подвижность, на другой она закреплена от продольного смещения болтами или штырями. Ширина опорной плиты b_0 (в направлении, перпендикулярном оси балки) принимается равной 1,1—1,2 от ширины пояса балки b, длина плиты — $1 \div 1{,}5b_0$.

Плиты изготовляют стальными; толщина их у конца $\geqslant 10 \div 15$ *мм*; радиус цилиндрической поверхности $R = 1 \div 2$ *м*. Толщина плиты на оси находится из условия ее прочности при работе на изгиб. Реактивные усилия, действую-

щие под плитой на единицу ее длины, обозначим q. От нагрузки q на оси плиты образуется поперечная сила

$$Q = \frac{qa}{2} = \frac{A}{2}.$$

Изгибающий момент по оси плиты равен

$$M = \frac{qa^2}{8} = \frac{Aa}{8}. \qquad (14.56)$$

Момент сопротивления сечения плиты, ослабленной отверстиями для штырей, определяется из соотношения

$$W = (b_0 - 2d)\,\frac{s^2}{6},$$

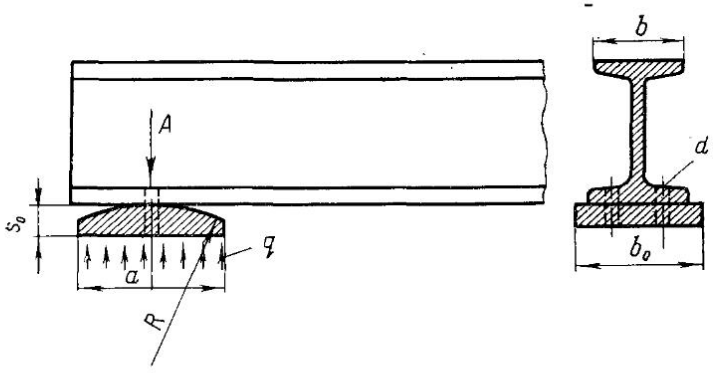


Рис. 14-21. Конструкции опорных частей балок

где s — толщина плиты;

d — диаметр отверстия штыря, равный $18 \div 25$ *мм*.

Требуемая толщина плиты

$$s = \sqrt{\frac{6W}{b_0 - 2d}} = \sqrt{\frac{6M}{[\sigma]_p\,(b_0 - 2d)}}. \qquad (14.57)$$

§ 15. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Научно-исследовательские работы по исследованию прочности сварных балок проводились в разных направлениях. При испытании сварных балок под статической нагрузкой установлено, что стальные сварные балки обладают необходимой прочностью, однако распределение напряжений в них по поперечному сечению происходит не вполне равномерно. При широких

горизонтальных листах балок двутаврового профиля они более интенсивно напряжены у оси и менее интенсивно — по кромкам. При наличии прерывистых поясных швов сечение балки не работает как одно целое. В зоне кромок вертикального листа наблюдается концентрация напряжений, она значительно уменьшается при непрерывных швах. Концентрация напряжений имеет также место в случае приложения к поясу балки сосредоточенной силы — колеса крана. Чем жестче пояс балки с приваренным

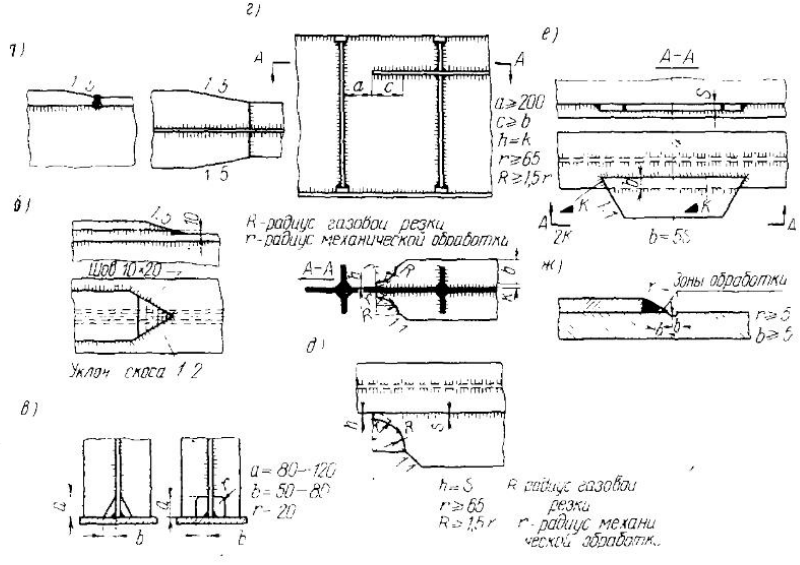


Рис. 14-22. Рациональное конструктивное оформление балок, работающих под переменными нагрузками:

а) стыки с плавным изменением толщин и поясов; *б*) рациональный обрыв накладки; *в*) рациональные крепления ребер жесткости; *г*, *д*) рациональные крепления планок к поясам; *е*, *ж*) крепление планки к поясу обработанным угловым швом

к нему рельсом, тем на большую зону вертикального листа распределяется сосредоточенная сила и тем меньше концентрация напряжений. Сварные поясные швы балок нередко работают неудовлетворительно в случае смещения оси кранового пути относительно оси балки. Хорошо сопротивляются кручению балки коробчатого сечения.

Сварные балки хорошо работают не только под статическими, но и переменными нагрузками при условии, если рационально выбраны формы конструкций и технологический процесс сварки. Балки, работающие под переменными нагрузками, должны быть выполнены таким образом, чтобы исключить возможность

образования в них концентраторов напряжений. Все стыки элементов по длине должны быть сварены встык без применения накладок. На рис. 14-22, *а* показаны примеры стыков горизонтальных листов с плавным изменением их толщины и ширины, на рис. 14-22, *б* — рациональные обрывы накладок. Ребра жесткости целесообразно приваривать таким образом, как это показано на рис. 14-22, *б, в*. К растянутому поясу и в растянутой зоне вертикального листа на длине $0{,}1 \div 0{,}2h_в$ ребра жесткости рекомендуется не приваривать вовсе. В некоторых балках между ребрами и поясами (особенно растянутыми) ставятся прокладки (рис. 14-22, *г*).

При приваривании к поясу балки планки, например, для крепления в ней связей, рекомендуется это выполнять, как показано на рис. 14-22, *г, д*. Приваривание планки встык и наличие выкружек сводит до минимума концентраторы напряжений в узле. Допустима приварка планки к поясу, как это показано на рис. 14-22, *е*. При этом шов направлен под углом к поперечному сечению; очертание углового шва принято в качестве неравнобедренного треугольника для смягчения эффекта концентрации (рис. 14-22, *ж*).

Очень важным является укладка поясных швов автоматами с хорошим проваром корня швов. Наиболее экономичное очертание швов — в виде равнобедренного треугольника, а в особо ответственных случаях следует применять V-образную подготовку кромок.

На рис. 14-23 приведены сварные балки различных конструктивных форм и их пределы выносливости, полученные при испытании под переменными нагрузками. Все балки были изготовлены из малоуглеродистой стали. Испытания показали, что применение накладок, приваренных к поясам угловыми швами, значительно снижает усталостную прочность испытанных конструкций. Наибольшей усталостной прочностью обладали балки без стыков и с косыми стыками, сваренными встык и механически обработанными.

§ 16. ПРИМЕРЫ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

На рис. 14-24 приведены типовые конструкции подкрановых балок пролетом 12 *м* под краны грузоподъемностью $5 \div 75$ *Т* (ЦНИИ «Проектстальконструкция»). С изменением величины нагрузок меняются высоты и размеры поперечных сечений балок, но разбивка ребер жесткости остается прежней. Поясные швы укладываются автоматами. При толщине стенки $\geqslant 12$ *мм* делается подготовка кромок. При тяжелом режиме работы катет поясных швов $к = 0{,}85s_в$ в сжатой зоне и $к = 0{,}65s_в$ в растянутой с обеспечением полного провара.

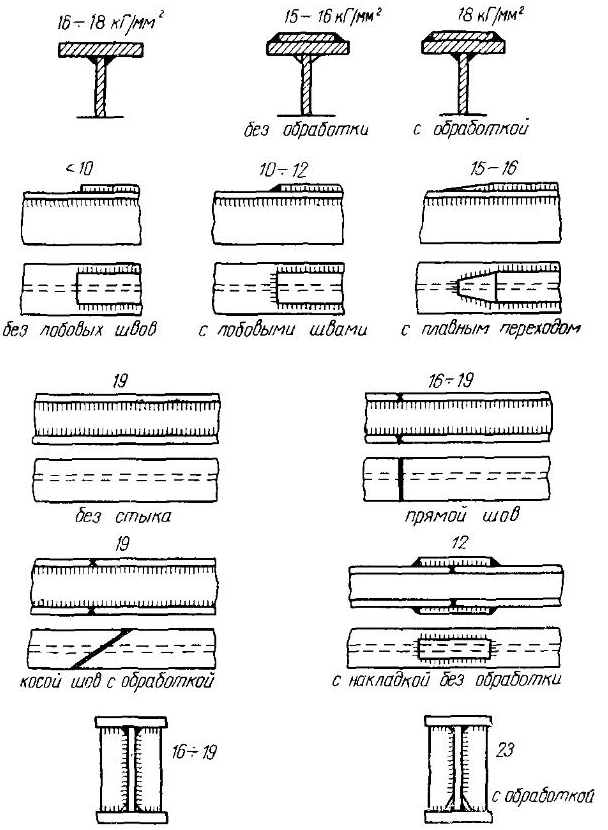


Рис. 14-23. Пределы выносливости сварных балок (наивысшая прочность при отсутствии приваренных элементов)

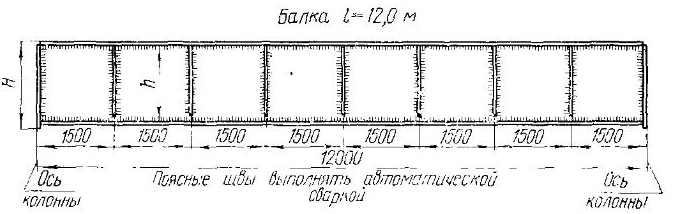


Рис. 14-24. Сварные подкрановые балки пролетом 12 *м* для кранов грузоподъемностью 5 ÷ 75 *Т*

Подкрановые балки нередко имеют длину пролетов 24, 36 *м* и более. При этом целесообразно применение высокопрочных металлов с высоким пределом текучести; перспективными являются стали марок С50, С60 и др., у которых $\sigma_т = 45 \div 75$ *кГ/мм²*, при расчетных сопротивлениях (см. гл. II), соответственно равных 40 *кГ/мм²* и более.

Обеспечить устойчивость подкрановой балки двутаврового профиля из указанных материалов трудно, так как балки получаются высокими. Поэтому более рациональными оказываются коробчатые профили, имеющие небольшую толщину вертикальных листов. При значительной высоте последних листы сваривают по длине встык продольными швами. Толщина горизонтальных листов, как правило, не должна превышать 40—50 *мм*. В околошовных зонах термообработанные стали этих марок испытывают некоторое разупрочнение. Поэтому не следует производить укладки поперечных швов, приваривающих ребра жесткости, в зонах, где напряжения на растяжение составляют 0,8 допускаемых.

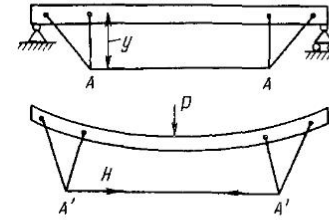


Рис. 14-25. Сварная шпренгельная балка

Подкрановые балки с пролетом 36 *м*, в особенности под тяжелые краны, могут быть усилены шпренгелями (рис. 14-25), состоящими из горизонтальной затяжки стоек и подкосов. Шпренгельная балка представляет собой систему статически неопределимую. За лишнее неизвестное в уравнениях деформаций принимается усилие затяжки H, которое образуется при изгибе балки вследствие увеличения расстояния между точками AA. При этом момент в сечении балки равен

$$M = M_0 - Hy, \qquad (14.58)$$

где M_0 — момент при отсутствии шпренгеля в балке;

y — плечо силы H относительно оси балки.

Затяжка шпренгеля создает полезный изгиб балки противоположного знака от вертикальной нагрузки.

На рис. 14-26, *а* изображены конструкции подкрановых балок для двух кранов грузоподъемностью 300 *Т*, изготовленных в Чехословакии.

Для увеличения высоты в среднюю часть вертикальной балки вварен лист после сварки и высокого отпуска поясов (рис. 14-26, *в*). Соединение пояса со стенкой показано на рис. 14-26, *г*. Место соединения усилено постановкой ребра жесткости.

В настоящее время много внимания уделяется типизации конструкций балок (например, подкрановых). Типовые пролеты подкрановых балок составляют 6 и 12 *м* под нагрузку кранов 5,0 *Т* и более. В соответствии с пролетом, нагрузкой и режимом крана устанавливают рекомендации применения для подкрановой балки определенной марки стали: малоуглеродистой или низколегированной конструкционной. Разрабатывают рациональные конструкции однопролетных и многопролетных подкрановых балок.

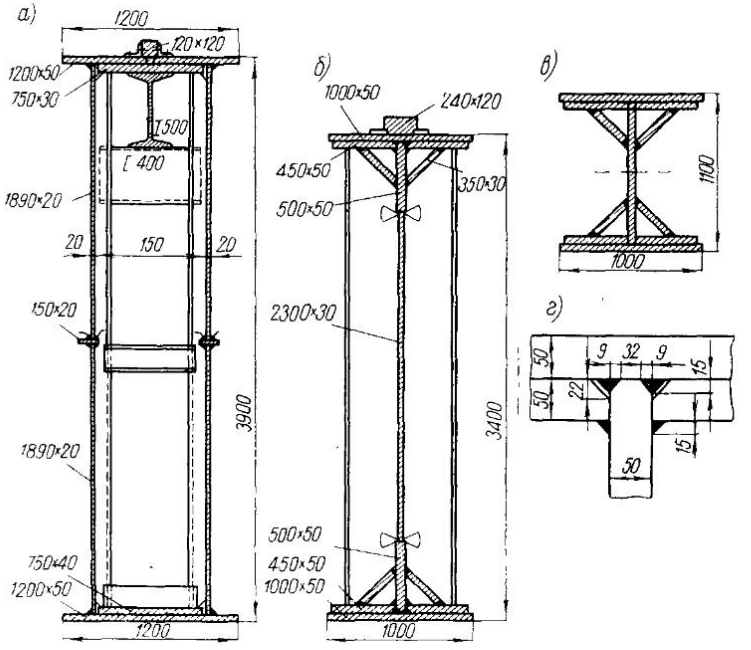


Рис. 14-26. Сварные подкрановые балки для кранов грузоподъемностью 300 *Т* (Чехословакия)

Типизация конструкций балок позволяет резко сократить количество их типоразмеров, выбрать наиболее рациональные и экономичные формы и обеспечить возможность крупносерийного их изготовления на поточно-автоматизированных и механизированных линиях.

§ 17. ПРИМЕР РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ БАЛКИ

Требуется разработать конструкцию сварной балки пролетом $l=16$ *м* со свободно опертыми концами. Балка нагружена равномерной нагрузкой от собственного веса $q=0{,}25 T/м$ и двумя

сосредоточенными грузами $P=5{,}0\,T$ (от веса тележки с грузом), которые могут перемещаться по балке.

Расстояние между осями тележки $d=2$ *м*; материал — сталь Ст. 3; допускаемое напряжение $[\sigma]_р=16$ *кГ/мм²*. Наибольший прогиб балки f от сосредоточенных грузов не должен превышать 1/500 ее пролета (рис. 14-27, *а*).

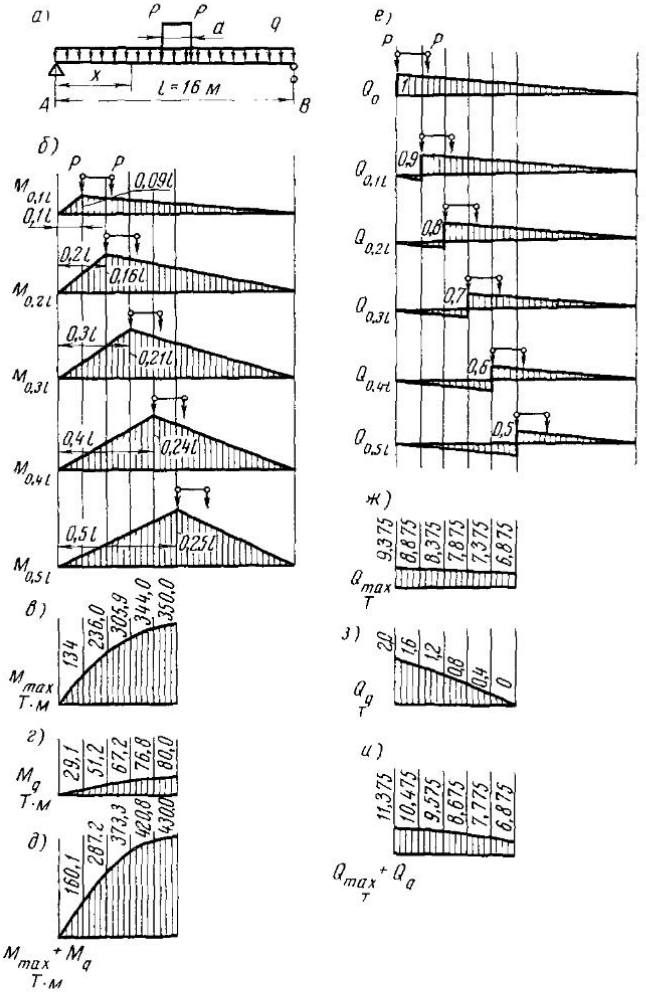


Рис. 14-27. К расчету балки пролетом 16 *м*:

а) схема балки; *б*) линии влияния; *в*) наибольший M от подвижной нагрузки в разных сечениях; *г*) эпюра M от q; *д*) наибольший расчетный M от P и q в разных сечениях; *е*) линии влияния Q; *ж*) наибольшие Q от подвижной нагрузки в разных сечениях; *з*) эпюра Q от q; *и*) наибольшие расчетные Q от P и q в разных сечениях

Конструирование балки следует начать с определения расчетных усилий M и Q.

Сначала необходимо построить линии влияния моментов, чтобы знать их максимально возможные значения в разных сечениях балки (рис. 14-27, *б*).

В сечении	Ордината линии влияния равна:
$0{,}1\,l$	$M_1 = 0{,}09\,l = 1{,}44$ *м*;
$0{,}2\,l$	$M_2 = 0{,}16\,l = 2{,}56$ *м*;
$0{,}3\,l$	$M_3 = 0{,}21\,l = 3{,}36$ *м*;
$0{,}4\,l$	$M_4 = 0{,}24\,l = 3{,}84$ *м*;
$0{,}5\,l$	$M_5 = 0{,}25\,l = 4{,}00$ *м*.

Определим моменты от веса тележки в каждом из сечений $0{,}1l$, $0{,}2l$ и т. д. с учетом того, что один из сосредоточенных грузов располагается над вершиной линии влияния, а второй занимает положение, показанное на рис. 14-27, *б*.

Величина изгибающего момента от сосредоточенных сил вычисляется по формуле (14.1)

$$M = \Sigma P y_i,$$

где y_i — ордината линии влияния;

P — величина сосредоточенного груза.

В сечениях при $l = 16$ *м* и $d = 2$ *м*

$$M_1 = 0{,}09\,l \left(1 + \frac{0{,}9\,l - d}{0{,}9\,l}\right) P = 13{,}1 \ \ T \cdot м;$$

$$M_2 = 0{,}16\,l \left(1 + \frac{0{,}8\,l - d}{0{,}8\,l}\right) P = 23{,}6 \ \ T \cdot м;$$

$$M_3 = 0{,}21\,l \left(1 + \frac{0{,}7\,l - d}{0{,}7\,l}\right) P = 30{,}6 \ \ T \cdot м;$$

$$M_4 = 0{,}24\,l \left(1 + \frac{0{,}6\,l - d}{0{,}6\,l}\right) P = 34{,}4 \ \ T \cdot м;$$

$$M_5 = 0{,}25\,l \left(1 + \frac{0{,}5\,l - d}{0{,}5\,l}\right) P = 35{,}0 \ \ T \cdot м.$$

Наибольшие значения M для сечений балки от P показаны на рис. 14-27, *в*.

Определим изгибающие моменты от равномерно распределенной нагрузки.

Момент в сечении x от равномерно распределенной нагрузки (рис. 14-27, *а*) определяется по формуле из курса «Сопротивление материалов»

$$M_q = \frac{qlx}{2} - \frac{qx^2}{2}.$$

В сечениях

$$M_1 = 0{,}045\, ql^2 = 2{,}91 \ \ T \cdot м;$$

$$M_2 = 0{,}08\, ql^2 \ \ = 5{,}12 \ \ T \cdot м;$$

$$M_3 = 0{,}105\, ql^2 = 6{,}72 \ \ T \cdot м;$$

$$M_4 = 0{,}120\, ql^2 = 7{,}68 \ \ T \cdot м;$$

$$M_5 = 0{,}125\, ql^2 = 8{,}00 \ \ T \cdot м.$$

Значения M для сечений балки от q показаны на рис. 14-27, *г*.

Вычислим суммарные величины моментов в сечениях от сосредоточенных сил и равномерной нагрузки (рис. 14-27, *д*):

$$M_1 = 13{,}10 + 2{,}91 = 16{,}01 \ \ T \cdot м;$$

$$M_2 = 23{,}60 + 5{,}12 = 28{,}72 \ \ T \cdot м;$$

$$M_3 = 30{,}59 + 6{,}72 = 37{,}31 \ \ T \cdot м;$$

$$M_4 = 34{,}40 + 7{,}68 = 42{,}08 \ \ T \cdot м;$$

$$M_5 = 35{,}0 \ \ + 8{,}00 = 43{,}00 \ \ T \cdot м.$$

Таким образом, расчетной величиной момента для балки является $M = 43{,}0\ T \cdot м = 4\,300\,000\ кГ \cdot см$.

Требуемый момент сопротивления балки для этого усилия равен

$$W_{тр} = \frac{4\,300\,000}{1600} = 2688 \ \ см^3.$$

Производим построение линии влияния поперечной силы (рис. 14-27, *е*):

в сечении $x = 0$, ордината влияния $Q_0 = 1$;

в сечении $x = 0{,}1l$, ордината $Q_1 = 0{,}9$;

в сечении $x = 0{,}2l$, ордината $Q_2 = 0{,}8$ и т. д.

Определим расчетные усилия от сосредоточенных сил в каждом из указанных сечений с учетом того, что одна из них располагается над вершиной линии влияния (рис. 14-27, *е*)

$$Q = \Sigma P y_i.$$

В сечении $x=0$

$$Q_0 = \left(1 + \frac{l-d}{l}\right) = 93{,}75\ T.$$

Аналогично в сечениях при $l=16$ *м* и $d=2$ *м*

$$Q_1 = 0{,}9\ \left(\frac{1+0{,}9-d}{0{,}9}\right) P = 8{,}875;$$

$$Q_2 = 0{,}8\ \left(\frac{1+0{,}8-d}{0{,}8}\right) P = 8{,}375;$$

$$Q_3 = 0{,}7\ \left(\frac{1+0{,}7-d}{0{,}7}\right) P = 7{,}875;$$

$$Q_4 = 0{,}6\ \left(\frac{1+0{,}6-d}{0{,}6}\right) P = 7{,}375;$$

$$Q_5 = 0{,}5\ \left(\frac{1+0{,}5-d}{0{,}5}\right) P = 6{,}875.$$

Значения Q от P приведены на рис. 14-27, *ж*.

Поперечные силы Q от собственного веса q равны:

$$Q_0 = A = \frac{ql}{2} = \frac{0{,}25 \cdot 16}{10} = 2{,}0\ T;$$

$$Q_1 = A - \frac{ql}{10} = 2 - \frac{0{,}25 \cdot 16}{10} = 1{,}6\ T;$$

$$Q_2 = A - \frac{2ql}{10} = 1{,}2\ T;$$

$$Q_3 = A - \frac{3ql}{10} = 0{,}8\ T;$$

$$Q_4 = A - \frac{4ql}{10} = 0{,}4\ T;$$

$$Q_5 = A - \frac{5ql}{10} = 0.$$

Значения Q от q приведены на рис. 14-27, *з*.

Расчетные значения поперечных сил от сосредоточенных и равномерно распределенных нагрузок (рис. 14-27, *и*) будут следующими:

$$Q_0 = 9{,}375 + 2{,}0 = 11{,}375\ T;$$

$$Q_1 = 8{,}875 + 1{,}6 = 10{,}475\ T;$$

$$Q_2 = 8{,}375 + 1{,}2 = 9{,}575\ T;$$

$$Q_3 = 7{,}875 + 0{,}8 = \ 8{,}675\ T;$$

$$Q_4 = 7{,}375 + 0{,}4 = \ 7{,}775\ T;$$

$$Q_5 = 6{,}875 + 0 \ = \ 6{,}875\ T.$$

Определив расчетные усилия, переходим к нахождению требуемой наименьшей высоты балки из условия нормы жесткости $f/l = 1/500$ от сосредоточенных грузов P.

Основное допускаемое напряжение для стали Ст. 3 $[\sigma]_р = 16\ кГ/м^2$. Следует ли его снижать вследствие того, что в балке имеются сварные соединения? В данной конструкции этого делать не следует, так как в сварных соединениях таврового профиля (см. табл. 10.11) коэффициент концентрации $K_э$ принимается равным 1, а следовательно, и коэффициент γ также равен 1.

При определении требуемой высоты следует учесть, что по условию величина прогиба ограничена лишь в отношении нагрузки P.

Так как от суммарного момента $M = 43{,}0\ T \cdot м$ напряжение достигает $[\sigma]_р$, то от момента $M = 35{,}0\ T \cdot м$, вызванного сосредоточенными грузами, напряжение будет составлять $[\sigma]_р \times \frac{35{,}0}{43{,}0} = 0{,}8\,[\sigma]_р$. Эту величину и следует учитывать вместо $[\sigma]_р$ при определении требуемой величины h (см. задание).

Прогиб балки от двух сосредоточенных сил P, расположенных симметрично в пролете (рис. 14-28, $а$), равен

$$f = \frac{Pal^2}{8EJ}\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{a}{l}\right)^2\right]. \qquad (14.59)$$

Если заменить Pa через M, то

$$f = \frac{Ml^2}{8EJ}\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{a}{l}\right)^2\right].$$

Если заменить M через напряжение, вызванное сосредоточенными силами, принимаемое равным $0{,}8\,[\sigma]_р$, умноженное на величину момента сопротивления, пока еще неизвестного, то после подстановки этих значений в формулу (14.59) получим

$$f = \frac{0{,}8\,[\sigma]_р l^2}{8Eh/2}\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{a}{l}\right)^2\right],$$

откуда требуемая высота балки из условий жесткости $l/f = 500$ будет равна

$$h_{\min} = \frac{0{,}8\,[\sigma]_p l}{4Ef}\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{a}{l}\right)^2\right] =$$

$$= \frac{0{,}8 \cdot 1600 \cdot 500}{4 \cdot 2{,}1 \cdot 10^6}\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{7}{16}\right)^2\right] = 0{,}0567. \qquad (14.59')$$

При этом $h = 0{,}0567 \cdot 1600 = 91{,}2$ *см*.

Чтобы определить требуемую высоту балки из условия ее наименьшего сечения, нужно задаться толщиной вертикального

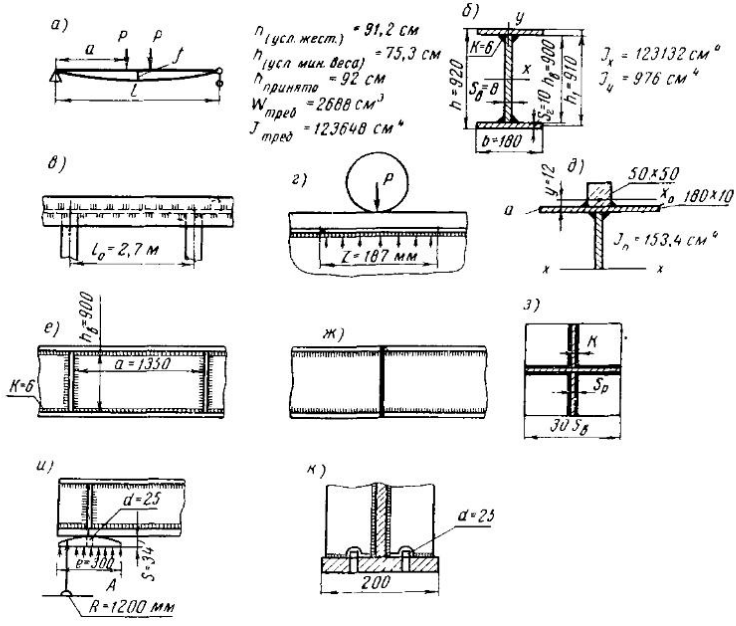


Рис. 14-28. К примеру расчета сварной балки $l = 16$ *м*:

а) определение h от условий жесткости; *б*) подобранный профиль балки; *в*) к расположению горизонтальных закреплений балки; *г*) учет местного влияния сосредоточенной силы; *д*) к расчету поясных швов; *е*) расстановка ребер жесткости; *ж*) стык балки; *з*) продольный разрез балки в опорном сечении на длине 30 $s_в$; *и*) опорная плита; *к*) отверстия в поясе балки для постановки штырей под ребрами жесткости

листа. Можно воспользоваться рекомендуемым приближенным соотношением

$$s_в = \frac{1}{12{,}5}\sqrt{h} = \frac{1}{12{,}5}\sqrt{91{,}2} = 0{,}76\ см.$$

Примем $s_в = 8$ *мм*.

Требуемая высота из условия наименьшего веса [формула (14.9)] составляет

$$h = 1{,}3\sqrt{\frac{4\,300\,000}{1650 \cdot 0{,}8}} = 75{,}3 \text{ см}.$$

Так как требуемая высота, найденная по формуле (14.59′), больше, чем высота, найденная по формуле (14.9), то ее и следует принять в расчет при подборе сечения. Высоту вертикального листа $h_в$ принимаем равной 90 *см*, а высоту балки h — 92 *см* (рис. 14-28, *б*).

Требуемый момент инерции поперечного сечения сварной балки двутаврового профиля равен

$$J_{тр} = W_{тр}\frac{h}{2} = 2688 \cdot 46 = 123\,648 \text{ см}^4.$$

Момент инерции подобранного вертикального листа 900×8 *мм*

$$J_в = \frac{90^3 \cdot 0{,}8}{12} = 48\,600 \text{ см}^4.$$

Требуемый момент инерции горизонтальных листов балки (поясов)

$$J_г = J_{тр} - J_в = 123\,648 - 48\,600 = 75\,048 \text{ см}^4.$$

Величина момента инерции горизонтальных листов записывается в виде

$$J_г = 2\left[J_0 + F_г\left(\frac{h_1}{2}\right)^2\right],$$

где J_0 — момент инерции горизонтального листа относительно собственной оси. Этой величиной можно пренебречь вследствие ее малости;

$\frac{h_1}{2}$ — расстояние от центра пояса до центра тяжести балки. Примем его приближенно равным 45,5 *см*.

Таким образом, требуемое сечение одного пояса балки равно

$$F_г = \frac{J_г}{2(h_1/2)^2} = \frac{75048}{2 \cdot 45{,}5^2} = 18{,}1 \text{ см}^2.$$

Принимаем сечение горизонтального листа 180×10 *мм*.

Определим уточненное значение момента инерции подобранного поперечного сечения балки

$$J = \frac{90^3 \cdot 0{,}8}{12} + 2\left(\frac{1^3 \cdot 18}{12} + 1 \cdot 18 \cdot 45{,}5^2\right) =$$

$$= 48\,600 + 74\,532 = 123\,132 \text{ см}^4.$$

Наибольшее нормальное напряжение в крайнем волокне балки

$$\sigma = \frac{M}{J} y_{max} = \frac{4\,300\,000}{123\,132} \cdot 46 = 1607 \ кГ/см^2.$$

Расчетное напряжение превышает допускаемое на 0,5%, что вполне допустимо.

Определим касательное напряжение на уровне центра тяжести балки в опорном ее сечении по формуле

$$\tau = \frac{QS}{Js_в},$$

где Q — расчетная поперечная сила, равная 11 375 $кГ$;

S — статический момент половины площади сечения относительно центра тяжести балки

$$S = 18 \cdot 45{,}5 + 0{,}8 \cdot \frac{45^2}{2} = 819 + 810 = 1629 \ см^3,$$

$$\tau = \frac{11\,375 \cdot 1629}{123\,132 \cdot 0{,}8} = 190 \ кГ/см^2.$$

Определим эквивалентные напряжения в сечении, в котором имеется наибольший изгибающий момент $M = 4\,300\,000 \ кГ \cdot см$ и $Q = 6875 \ кГ$.

Эквивалентные напряжения вычисляются на уровне верхней кромки вертикального листа в зоне резкого изменения ширины сечения.

Вычислим в этом волокне балки напряжения от M

$$\sigma_1 = \frac{M}{J} \cdot \frac{h_в}{2} = \frac{4\,300\,000}{123\,132} \cdot 45 = 1572 \ кГ/см^2.$$

В этом же волокне напряжение от Q

$$\tau_1 = \frac{QS}{Js_в} = \frac{6875 \cdot 819}{123\,132 \cdot 0{,}8} = 57 \ кГ/см^2,$$

где S — статический момент площади сечения горизонтального листа относительно центра тяжести, равный $18 \cdot 1 \cdot 45{,}5 = 819 \ см^3$.

Эквивалентное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2} = \sqrt{1572^2 + 3 \cdot 57^2} = 1574 \ кГ/см^2,$$

что меньше наибольшего нормального напряжения в крайнем волокне.

Рассмотрим, как обеспечить общую устойчивость балки.

Если ее не закрепить в горизонтальной плоскости, то потребуется значительное уменьшение допускаемых напряжений.

Поэтому следует предусмотреть закрепления от возможных перемещений верхнего пояса, например, установить горизонтальные связи.

Зададимся величиной расстояний между закреплениями $l_0 = 10 \div 20$ ширины пояса, например 270 *см* (рис. 14-28, *в*). По формуле (14,26)

$$\alpha = 8\left(\frac{l_0 s_г}{bh}\right)^2\left(1 + \frac{h_в s_в^3}{2\,b s_г^3}\right) = 8\left(\frac{270 \cdot 1}{18 \cdot 92}\right)^2\left(1 + \frac{90 \cdot 0{,}8^3}{2 \cdot 18 \cdot 1^3}\right) \approx 0{,}49,$$

где $h_в$ — высота балки, равная 90 *см*.

Зная коэффициент α по графику, приведенному на рис. 14-9, определяем коэффициент ψ, пользуясь интерполяцией,

при $\alpha = 0{,}1$ $\quad \psi = 1{,}73;$

при $\alpha = 1$ $\quad \psi = 1{,}85.$

Следовательно, при $\alpha = 0{,}49$ коэффициент $\psi = 1{,}79$.

Момент инерции балки относительно вертикальной оси равен

$$J = \frac{0{,}8^3 \cdot 90}{12} + \frac{2 \cdot 18^3 \cdot 1}{12} = 976\ см^4.$$

Коэффициент φ находится по формуле (14.25)

$$\varphi = 1{,}79 \cdot \frac{976}{123\,132}\left(\frac{92}{270}\right)^2 \cdot 10^3 = 1{,}64.$$

Коэффициент φ, определенный по формуле (14.25), больше 1. Устойчивость балки при наличии закреплений на взаимных расстояниях $l_0 = 2{,}70$ *м* обеспечена.

Чтобы обеспечить устойчивость вертикального листа, следует приварить к нему ребра жесткости. Зададимся расстоянием между ними $a = 1{,}5h_в$, т. е. $1{,}5 \cdot 90 = 135$ *см*.

В этом случае следует знать следующие величины:

1) нормальное напряжение в верхнем волокне вертикального листа. Оно было определено раньше: $\sigma_1 = 1572$ *кГ/см*^{2};

2) среднее касательное напряжение τ от поперечной силы. В середине пролета $Q = 6875$ *кГ* среднее напряжение равно

$$\tau = \frac{Q}{h_в s_в} = \frac{6875}{90 \cdot 0{,}8} = 96\ кГ/см^2;$$

3) местное напряжение $\sigma_м$ под сосредоточенной силой (рис. 14-28, *г*). Это напряжение находим по формуле (14.22), принимая $m = 1$,

$$\sigma_м = \frac{P}{s_в z}.$$

Для среднего значения режима [формула (14.23)]

$$z = 3{,}25 \sqrt[3]{\frac{J_п}{s_в}},$$

где $J_п$ — момент инерции верхнего пояса с приваренным к нему рельсом (рис. 14-28, *д*).

Примем сечение рельса 50×50 *мм*.

Ордината центра тяжести сечения пояса и рельса относительно верхней кромки пояса равна

$$y = \frac{-18 \cdot 1 \cdot 0{,}5 + 5 \cdot 5 \cdot 2{,}5}{18 \cdot 1 + 5 \cdot 5} = \frac{53{,}5}{43} = 1{,}2 \text{ см}.$$

Знак «плюс» указывает, что центр тяжести расположен выше верхней кромки пояса.

Определим сначала момент инерции относительно оси *а*, совпадающей с верхней кромкой пояса, эта ось параллельна центральной оси

$$J_п' = \frac{5^3 \cdot 5}{3} + \frac{1^3 \cdot 18}{3} = 214{,}3 \text{ см}^4.$$

Теперь найдем момент инерции относительно оси x_0, проходящей через центр тяжести сечения пояса с рельсом ($F = 43\ см^2$)

$$J_п = J_п' - Fy^2 = 214{,}3 - 43 \cdot 1{,}2^2 = 153{,}4 \text{ см}^4.$$

Вычислим условную длину

$$z = 3{,}25 \sqrt[3]{\frac{152{,}4}{0{,}8}} = 18{,}7 \text{ см}.$$

Из формулы (14.22) находим напряжение $\sigma_м$ от $P = 5000$ *кГ*

$$\sigma_м = \frac{5000 \cdot 1}{0{,}8 \cdot 18{,}7} = 334 \text{ кГ/см}^2.$$

Для проверки правильности постановки ребер жесткости (рис. 14-28, *е*) надлежит выяснить три вспомогательные величины:

1) по формуле (14.31)

$$\sigma_0 = \frac{750 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8}{90} = 6670 \text{ кГ/см}^2;$$

2) по формуле (14.32)

$$\tau_0 = \left(1250 + \frac{950}{\nu^2}\right)\left(\frac{100\, s_в}{d}\right)^2,$$

где ν — отношение большей стороны к меньшей; в принятой конструкции $a/h_в = 1{,}5$;

d — наименьшая из сторон пластин (a или $h_в$), заключенных между поясами и ребрами жесткости; в данном случае $d = h_в = 90$ *см*;

таким образом,

$$\tau_0 = \left(1250 + \frac{950}{1{,}5^2}\right)\left(\frac{100 \cdot 0{,}8}{90}\right)^2 = 1321 \ кГ/см^2;$$

3) по формуле (14.33)

$$\sigma_{\mu 0} = K_1 \cdot 10^7 \left(\frac{s_в}{a}\right)^2.$$

Воспользуемся графиком (см. рис. 14-11) для определения K_1.

При $a/h_в = 1{,}5$ $\quad K_1 = 8{,}6$,

поэтому

$$\sigma_{\mu 0} = 8{,}6 \cdot 10^7 \left(\frac{0{,}8}{135}\right)^2 = 3021 \ кГ/см^2.$$

Проверим по формуле (14.28), обеспечена ли требуемая устойчивость. Для этого подставим найденные значения в эту формулу

$$\sqrt{\left(\frac{1572}{6670} + \frac{334}{3021}\right)^2 + \left(\frac{96}{1321}\right)^2} = 0{,}33,$$

что значительно меньше 1. Устойчивость вертикального листа в середине пролета вполне обеспечена.

Посмотрим, обеспечена ли устойчивость в опорных сечениях. На опоре $\sigma_1 = 0$

$$\tau = \frac{Q}{h_в s_в} = \frac{11\,375}{90 \cdot 0{,}8} = 158 \ кГ/см^2.$$

Проверяем снова устойчивость для опорного сечения по формуле (14.28), полагая $\sigma = 0$,

$$\sqrt{\left(\frac{334}{3031}\right)^2 + \left(\frac{158}{1321}\right)^2} = 0{,}12.$$

Таким образом, устойчивость в опорном сечении обеспечена еще лучше, чем в середине пролета.

Переходим к расчету поясных швов. Катеты верхних и нижних поясных швов примем равными $к = 6$ *мм* (рис. 14-28, *е*).

В поясных швах, как известно, возникают связующие напряжения вследствие совместной деформации швов и основного металла. Эти напряжения при расчете прочности в учет не принимаются.

Рабочими напряжениями в поясных швах являются касательные.

В нижних поясных швах действуют касательные напряжения, равные

$$\tau = \frac{QS}{J \cdot 2 \cdot 0{,}7\kappa},$$

где $Q = 11\,375$ *кГ*;

S — статический момент горизонтального листа относительно центра тяжести сечения;

$$S = 18 \cdot 1 \cdot 45{,}5 = 819 \ см^3;$$

$$J = 123\,132 \ см^4.$$

Таким образом,

$$\tau = \frac{11\,375 \cdot 819}{123\,132 \cdot 2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}6} = 92 \ кГ/см^2.$$

Несмотря на то, что рабочие напряжения незначительны, по технологическим соображениям целесообразно принимать $\kappa = 6$ *мм*.

В верхних поясных швах при определении напряжений следует вычислять S с учетом наличия рельса

$$S = 18 \cdot 1 \cdot 45{,}5 + 5 \cdot 5 \cdot 48{,}5 = 2031 \ см^3.$$

Момент инерции будем считать неизменившимся, как и положение центра тяжести балки.

При этом

$$\tau = \frac{11\,375 \cdot 2031}{123\,132 \cdot 2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}6} = 228 \ кГ/см^2.$$

В верхних поясных швах к вычисленным напряжениям добавляются $\tau_р$ от сосредоточенной силы P.

Как уже было установлено, длина зоны распределения сосредоточенной силы в вертикальном листе $z = 18{,}7$ *см* (рис. 14-28, *г*).

Таким образом, по формуле (14.42) местное напряжение в шве ($n = 0{,}4$) при $\kappa = 6$ *мм* равно

$$\tau_р = \frac{nP}{z \cdot 2 \cdot 0{,}7\kappa} = \frac{0{,}4 \cdot 5000}{18{,}7 \cdot 2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}6} = 127 \ кГ/см^2.$$

Условное результирующее напряжение

$$\tau_{\text{рез}} = \sqrt{\tau^2 + \tau_{\text{р}}^2} = \sqrt{228^2 + 127^2} = 261 \ \kappa Г/см^2.$$

Допускаемое напряжение в поясных швах определим из соотношения

$$[\tau'] = 0{,}65\,[\sigma]_{\text{р}} = 0{,}65 \cdot 1600 = 1040 \ \kappa Г/см^2.$$

Катеты швов, приваривающих ребра жесткости к поясам и вертикальному листу, принимаем такими же, как и в поясных, т. е. $\kappa = 6$ *мм*.

Эти швы не передают рабочих напряжений и расчету на прочность не подлежат.

Посмотрим, не оказывают ли швы, приваривающие ребра жесткости, вредное влияние на основной металл балки, снижая в них допускаемые напряжения (рис. 14-28, *е*).

Согласно табл. 10.11, основной металл у ребер жесткости (при условии, что швы имеют плавное сопряжение с ним) имеет эффективный коэффициент концентрации $K_{\text{э}} = 1{,}5$.

Максимальный момент, испытываемый наиболее нагруженным сечением, $M_{\max} = 43{,}0$ *Т·м*.

Минимальный момент в этом сечении от нагрузки q при отсутствии сил P равен $M_{\min} = 8{,}0$ *Т·м*.

Характеристика цикла $r = 8{,}0 : 43{,}0 = 0{,}18$.

Коэффициент снижения допускаемых напряжений при действии переменных растягивающих усилий (формула (10.6′)

$$\gamma = \frac{1}{0{,}6K_{\text{э}} + 0{,}2 - (0{,}6\,K_{\text{э}} - 0{,}2)\,r} =$$

$$= \frac{1}{0{,}6 \cdot 1{,}0 + 0{,}2 - 0{,}18\,(0{,}6 \cdot 1{,}0 - 0{,}2)} = 1{,}89.$$

Коэффициент $K_{\text{э}}$ в соединениях поясных швов балок принимается равным 1,0.

Принимаем $\gamma = 1$. Таким образом, снижение допускаемых напряжений в основном металле не требуется.

Так как длина балки $l = 16$ *м* значительна, то в ней следует предусмотреть технологические стыки. Допустим, что стык вертикального и горизонтальных листов совмещен и находится на расстоянии $x = 0{,}35l$ от опоры (рис. 14-28, *ж*).

Напряжение в месте стыка определится от полной нагрузки таким образом:

$M = 37{,}33$ *Т·м* в сечении $x = 0{,}3l$;

$M = 42{,}08$ *Т·м* в сечении $x = 0{,}4l$;

$M = 39{,}73$ *Т·м* в сечении $x = 0{,}35l$;

$$\sigma = \frac{3\,970\,000}{123\,132} \cdot 46 = 1483 \ \kappa Г/см^2.$$

При условии выполнения стыка электродами марки Э42 допускаемое напряжение в шве принимается равным $0{,}9[\sigma]_р = 1440$ *кГ/мм*^{2} при $\gamma = 1$.

В стыке имеется некоторое превышение расчетного напряжения относительно допускаемого $\frac{1483 - 1440}{1440} = 3\%$, что меньше 5%, а потому допустимо.

При выполнении сварки автоматами или электродами Э42А допускаемое напряжение в шве равно 1600 *кГ/см*^{2}, и расчетное напряжение окажется значительно ниже допускаемого.

Проверим напряжения в нижних поясах в опорном сечении балок в предположении, что опорная реакция A воспринимается сечением шва, изображенным на рис. 14-28, *з* и что через шов в соединение втавр передается вся величина реакции.

Длину периметра шва вычисляют с учетом распределения усилий в шве на участке протяженностью $30s_в$

$$L = 2(30s_в + 2c) = 2(30 \cdot 0{,}8 + 2 \cdot 8{,}0) = 80 \text{ см},$$

где c — ширина ребра жесткости, которую принимаем равной 8 *см*.

Находим напряжение

$$\tau = \frac{A}{z \cdot 0{,}7\kappa} = \frac{11\,375}{80 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}6} = 380 \text{ кГ/см}^2,$$

что вполне допустимо.

В качестве опоры принимаем стальную выпуклую плиту шириной 20 *см* (рис. 14-28, *и*).

Длину плиты примем $e = 1{,}5$ ширины, т. е. 30 *см*.

Изгибающий момент на оси плиты равен

$$M = \frac{Ae}{8} = \frac{11\,375 \cdot 30}{8} = 42\,656 \text{ кГ} \cdot \text{см}.$$

Примем, что балка крепится к плите двумя штырями диаметром $d = 25$ *мм* (рис. 14-28, *к*). При этом рабочая ширина сечения плиты составляет $20 - 2 \cdot 2{,}5 = 15$ *см*.

Момент сопротивления плиты

$$W = \frac{s^2 \cdot 15}{6},$$

где s — толщина плиты в опорном сечении, где изгибающий момент имеет наибольшее значение.

Требуемый момент сопротивления плиты в указанном сечении определяется из соотношения

$$W_{тр} = \frac{M}{[\sigma]_р} = \frac{42\,656}{1600} = 26{,}7 \text{ см}^3.$$

Определяем требуемую величину s из условия

$$W = \frac{s^2 \cdot 15}{6} = 26{,}7,$$

откуда $s = 3{,}27$ *см*; примем $s = 34$ *мм*.

Радиус цилиндрической поверхности плиты R принимаем равным 120 *см*.

Один из концов балки закрепляют неподвижно, второй должен иметь свободное продольное перемещение, определяемое упругой и температурной деформациями.

Рассмотрим некоторые возможные изменения в конструкции, которые могут быть, если балка проектируется из других материалов, например из алюминиевых сплавов.

Балка из алюминиевых сплавов оказалась бы более высокой по сравнению со стальной. В алюминиевой конструкции $[\sigma]_р$ имеет меньшую величину, чем у стали Ст. 3. Однако модуль упругости в ней понижается еще интенсивнее.

Если бы толщина вертикальной стенки более высокой алюминиевой балки оказалась бы по-прежнему равной 8 *мм*, то момента инерции ее одной было бы достаточно для обеспечения прочности и горизонтальных листов не потребовалось бы вовсе. Это означало бы, что толщина вертикального листа принята завышенной. Ее следовало бы уменьшить таким образом, чтобы J стенки был бы значительно меньше J требуемого.

В алюминиевых балках требования к нормам жесткости снижаются и иногда приходится использовать не полностью величины допускаемых напряжений.

Затруднения подобного рода, но в меньшей степени, могут встретиться при конструировании балок из конструкционных низколегированных, термически обработанных и других марок сталей, обладающих высоким значением $[\sigma]_р$. Во всех этих случаях полезно применять конструкции с тонкими стенками, но при этом следует обеспечить их устойчивость ребрами жесткости.

Если балка согласно заданию нагружена не только вертикальными силами, но и горизонтальными нагрузками перпендикулярно ее оси или крутящими моментами, то применение двутаврового профиля, как правило, становится нецелесообразным. Его следует заменить коробчатым.

Наличие двух вертикальных листов дает возможность получить значительную величину момента инерции J_y. В этом случае в ф-лы (14.8), (14.8′) для определения h следует ввести не полную величину $[\sigma]_р$, а только ту часть напряжения, которая вызывается вертикальным изгибом (или горизонтальным, если проверяется жесткость балки в горизонтальной плоскости). Поскольку сечение балки еще не подобрано, то часть напряжения от вертикального изгиба следует назначать приближенно при условии последующей проверки правильности сделанного пред-

положения. Задача подбора сечения балки при этом значительно осложняется.

К двустенчатым (коробчатым) поперечным сечениям балок приходится прибегать также и в тех случаях, когда невозможно закрепить балку от перемещений в горизонтальной плоскости, чтобы обеспечить ее общую устойчивость. Как уже было указано, коробчатые сечения очень рациональны при наличии M_y. Касательные напряжения в сечениях этого профиля много меньше, нежели в сечениях открытого типа (двутавровых, тавровых и т. д.).

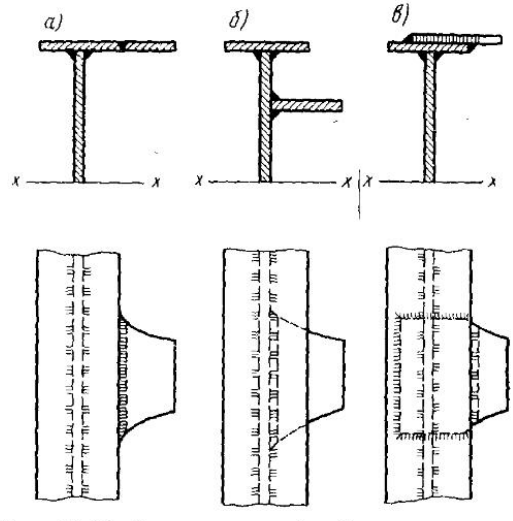


Рис. 14-29. Рациональные (*а*, *б*) и нерациональные (*в*) способы приварки планок к балкам, работающим под переменными нагрузками

Если при конструировании балок, работающих под действием переменными и знакопеременными нагрузками, возникает необходимость крепления к ним дополнительных элементов (планок, накладок, уголков и т. п.), то следует принять все меры для возможного устранения концентраторов напряжений $K_э$; наличие концентраторов вызывает уменьшение коэффициента γ, а следовательно, и степени использования основного металла в конструкциях.

Планки к балкам приваривают одним из следующих двух способов: швом встык к поясу, как показано на рис. 14-29, *а*, или швом втавр, как показано на рис. 14-29, *б*. Приварка планок, как показано на рис. 14-29, *в*, нецелесообразна, так как в зоне угловых швов $[\sigma]_р$ на основной металл снижается.

ГЛАВА XV

СТОЙКИ

Стойками называют элементы, работающие преимущественно на сжатие. К ним относятся колонны металлических каркасов зданий, некоторые элементы рам и станин, хребтовые балки вагонов. Силы к стойкам приложены центрально и эксцентренно.

§ 1. ТИПЫ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ

Поперечные сечения стоек имеют различные профили. Они зависят от величины усилий, наличия эксцентриситетов, длины стоек, конструкции опорных закреплений, общей компоновки объекта. Сжатые элементы должны быть не только прочны, но и устойчивы. Поэтому поперечные сечения сжатых элементов должны обладать возможно большей жесткостью по всем направлениям.

Поперечные сечения стоек при небольших продольных усилиях. Стойка, имеющая сечение уголка (рис. 15-1, *а*), обладает малой жесткостью и применяется преимущественно в малонагруженных и коротких элементах. Сечения, представленные на рис. 15-1, *в, г*, рациональны с точки зрения жесткости, но неудобны для окраски и связаны с большим количеством сварочных работ. Из всех трех типов сечений наиболее распространено сечение, изображенное на рис. 15-1, *б*. Уголки по длине элемента соединяют между собой прокладками, о чем будет сказано ниже.

Поперечные сечения стоек при продольных усилиях средней величины (несколько десятков *Т*). Н-образные профили применяют для изготовления стоек (рис. 15-1, *д*), которые во многих случаях наиболее рациональны. Открытые швеллерные (рис. 15-1, *ж, з*) профили применяют, чтобы при наименьшей площади получить момент инерции значительной величины; трубчатые профили (рис. 15-1, *е, и, к*) используют иногда в станинах.

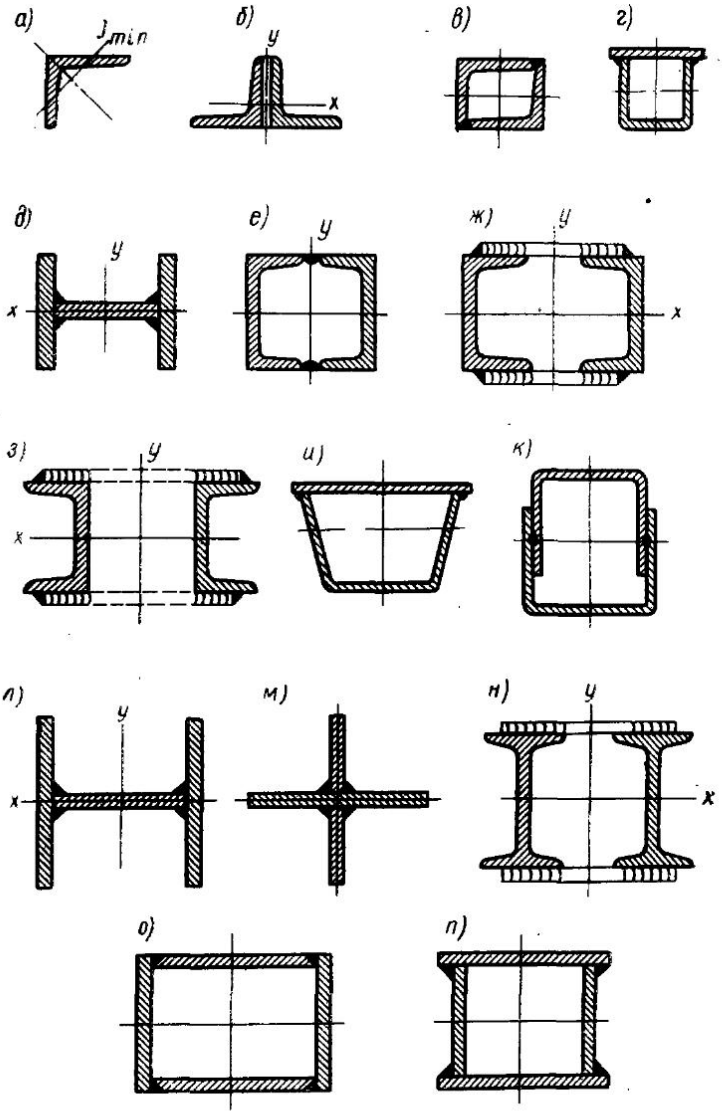


Рис. 15-1. Поперечные сечения сжатых элементов

Поперечные сечения стоек при продольных силах значительной величины (сотни тонн). Рациональные конструкции стоек приведены на рис. 15-1, *л—п*. Закрытые сечения (рис. 15-1, *о, п*) выгодно применять в конструкциях различного рода рам и станин. В сжатых элементах иногда применяют цельнотянутые и сварные трубы.

Соединительные сварные швы элементов, образующих стойки, должны выполняться на автоматах под слоем флюса или в среде защитных газов.

Для стоек под легкие нагрузки целесообразны трубчатые гнутые профили (рис. 15-1, *г, и, к*) из стали толщиной от 1 до 6 *мм*, сваренные дуговой или контактной точечной сваркой.

Главные оси, проходящие через центр тяжести и пересекающие сечение, называют *материальными*. Сечение называется сплошным, если обе главные оси пересекают его (рис. 15-1, *а, в, г, д, е, и, к, л, м, о, п*). Главные оси называют *свободными*, если они не пересекают сечение; на рис. 15-1, *б, ж, з, н* показаны сечения, у которых оси *y* являются свободными.

Поперечные сечения, имеющие свободную ось, называют *составными*.

§ 2. УСТОЙЧИВОСТЬ СТОЕК СО СПЛОШНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ СЕЧЕНИЯМИ

Расчет стоек при центральном сжатии. Расчет на прочность и устойчивость стоек, работающих при центральном сжатии, производится по формуле

$$\sigma = \frac{N}{F} \leqslant [\sigma]_p \varphi, \tag{15.1}$$

где N — продольная сила в стойке;

F — площадь поперечного сечения;

φ — коэффициент продольного изгиба, имеющий значение <1.

При введении в расчетную формулу коэффициента φ обеспечивается расчетная устойчивость сжатого элемента относительно продольного изгиба. Величина φ зависит от гибкости сжатого элемента.

Гибкостью λ называют отношение свободной длины элемента l к радиусу инерции r поперечного сечения гибкого элемента. Гибкость λ является отвлеченным числом

$$\lambda = l/r. \tag{15.2}$$

Радиус инерции равен

$$r = \sqrt{\frac{J}{F}}, \tag{15.3}$$

где J — момент инерции поперечного сечения стойки;

F — площадь поперечного сечения.

Наибольший интерес представляет величина наименьшего радиуса инерции сечения, соответствующая наименьшему главному моменту инерции. В направлении, где радиус инерции имеет наименьшую величину, гибкость элемента наибольшая. Для конструкции, шарнирно закрепленной по концам (рис. 15-2, *а*), свободная длина l принимается равной длине стойки. При этом гибкость стойки определяется формулой (15.2).

Примерами подобных конструкций могут служить элементы сжатых поясов ферм.

В конструкции, имеющей один конец защемленный (рис. 15-2, *б*), гибкость равна

$$\lambda = 2l/r. \qquad (15.2')$$

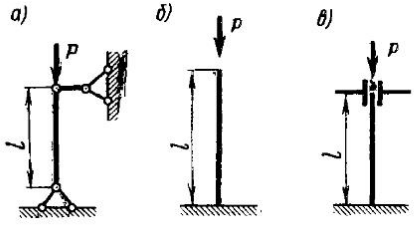


Рис. 15-2. Расчетные схемы стоек

У стоек с защемленными концами (рис. 15-2, *в*), один из которых неподвижен (нижний), а другой (верхний) обладает продольной подвижностью

$$\lambda = \frac{0{,}5\,l}{r}. \qquad (15.2'')$$

Значения коэффициентов φ установлены на основе большого количества исследований, проведенных в Центральном научно-исследовательском институте строительных конструкций и в других организациях.

В табл. 15.1 приведены коэффициенты φ для стоек из малоуглеродистых, среднеуглеродистых (Ст. 5) и низколегированных сталей.

Часто напряжения в сжатых элементах проверяют по преобразованной формуле

$$\sigma = \frac{N}{F\varphi} \leqslant [\sigma]_{\text{р}}. \qquad (15.4)$$

При этом произведение $F\varphi$ называют *приведенной площадью сжатого элемента.*

Трудность подбора сечения сжатого элемента при заданной величине силы N состоит в том, что допускаемое напряжение при сжатии зависит от коэффициента φ, а последний является функцией поперечного сечения, которое еще не подобрано. Поэтому для подбора поперечного сечения стоек пользуются способом последовательного приближения, который заключается в следу-

Таблица 15.1

Значения коэффициентов φ для стоек из различных металлов

Гибкость элементов λ	Коэффициент продольного изгиба φ для			
	Ст. 3, Ст. 4	Ст. 5	сталей 14Г2 и 15ХСНД	алюминиевого сплава АМг-6М
10	0,99	0,98	0,98	0,97
20	0,97	0,96	0,95	0,94
30	0,95	0,93	0,92	0,89
40	0,92	0,89	0,89	0,77
50	0,89	0,85	0,84	0,66
60	0,86	0,80	0,78	0,54
70	0,81	0,74	0,71	0,46
80	0,75	0,67	0,63	0,39
90	0,69	0,59	0,54	0,32
100	0,60	0,50	0,46	0,28
110	0,52	0,43	0,39	0,24
120	0,45	0,37	0,33	0,21
130	0,40	0,32	0,29	0,18
140	0,36	0,28	0,25	0,16
150	0,32	0,25	0,23	0,15
160	0,29	0,23	0,21	
170	0,26	0,21	0,19	
180	0,23	0,19	0,17	
190	0,21	0,17	0,15	
200	0,19	0,15	0,13	

ющем. Первоначально задаются коэффициентом $\varphi = 0{,}5 \div 0{,}8$ в зависимости от рода конструкции. Можно принять в первом приближении среднее значение $\varphi = 0{,}65$. По заданному коэффициенту φ_1 определяют требуемую величину площади поперечного сечения элемента по формуле

$$F_1 = \frac{N}{[\sigma]_p \varphi_1}.$$

Затем проектируют сечение, которое назовем F_2; находят в нем наименьшую величину момента инерции J_{min}, наименьшую величину радиуса инерции $r_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{F_2}}$, наибольшую гибкость

$\lambda_{max} = \frac{l}{r_{min}}$ и коэффициент φ_2, соответствующий найденному значению λ_{max}.

Определяют напряжение в спроектированном сечении $\sigma = \frac{N}{F_2 \varphi_2}$, которое должно быть $\leqslant [\sigma]_p$.

Допустимы отклонения σ от $[\sigma]_p$ в пределах $\pm 5\%$.

Если эти отклонения превышают указанные пределы, размеры поперечных сечений элементов изменяют в требуемом направлении: увеличивают, если $\sigma > [\sigma]_p$, и уменьшают, если σ мало, по сравнению с $[\sigma]_p$. В исправленном сечении F_3 снова находят величину σ.

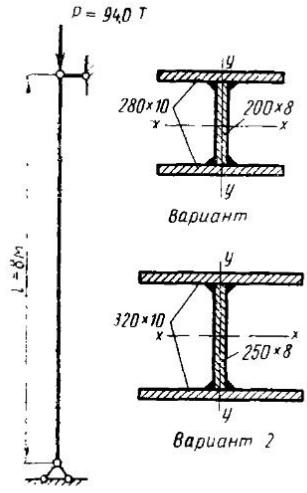


Рис. 15-3. К примеру расчета стойки на центральное сжатие

Так корректируют подбор сечений, пока напряжение в нем не будет иметь требуемой величины. Обыкновенно при второй или третьей попытке подбора сечения результаты оказываются удовлетворительными.

Подбор сечения из одного уголка производится с учетом гибкости по J_{min}.

Пример расчета (рис. 15-3). Требуется подобрать поперечное сечение стойки; ее длина $l=8$ *м*, продольная сжимающая сила $N=P=-94{,}0$ *Т*; концы стойки закреплены шарнирно; материал — сталь марки 15ХСНД, $[\sigma]_p = 2400$ *кГ/см*^{2}. Задаемся в первом приближении коэффициентом $\varphi = 0{,}6$.

Требуемая площадь поперечного сечения стойки равна

$$F_{тр} = \frac{94\,000}{2400 \cdot 0{,}6} = 65{,}2 \ см^2.$$

Принимаем, что сечение сконструировано в форме сварного двутавра из двух листов 280×10 *мм* и одного 200×8 *мм* (вариант 1):

$$F = 2 \cdot 28 \cdot 1 + 20 \cdot 0{,}8 = 72 \ см^2.$$

Момент инерции относительно оси x

$$J_x = 2\left(\frac{1^3 \cdot 28}{12} + 28 \cdot 10{,}5^2\right) + \frac{20^3 \cdot 0{,}8}{12} = 6711 \ см^4.$$

Момент инерции относительно оси y

$$J_y = 2 \cdot \frac{28^3 \cdot 1}{12} + \frac{0{,}8^3 \cdot 20}{12} = 3659 \text{ см}^4.$$

Наименьший радиус инерции

$$r_y = \sqrt{\frac{3659}{72}} = 7{,}13 \text{ см}.$$

Гибкость

$$\lambda_y = \frac{800}{7{,}13} = 112.$$

По табл. 15.1 определяем $\varphi = 0{,}37$.
Напряжение сжатия в стойке равно

$$\sigma = \frac{-94\,000}{0{,}37 \cdot 72} = -3530 \text{ кГ/см}^2.$$

Напряжение больше допустимого $[\sigma]_р = 2400$ (кГ/см^2).
Увеличиваем размер так, чтобы возросла не только площадь, но и радиус инерции r_y. Принимаем два листа 320×10 мм и один лист 250×8 мм (вариант 2). Тогда

$$F = 2 \cdot 32 + 25 \cdot 0{,}8 = 84 \text{ см}^2.$$

Определяем момент инерции относительно оси y

$$J_y = \frac{2 \cdot 32^3 \cdot 1}{12} + \frac{25 \cdot 0{,}8^3}{12} = 5462 \text{ см}^4.$$

Радиус инерции равен

$$r_y = \sqrt{\frac{5462}{82}} = 8{,}1 \text{ см}.$$

Гибкость

$$\lambda = \frac{800}{8{,}1} = 100; \quad \varphi = 0{,}46.$$

Напряжение сжатия

$$\sigma = \frac{-940\,000}{0{,}46 \cdot 84} = -2440 \text{ кГ/см}^2, \quad [\sigma]_р = 2400 \text{ кГ/см}^2.$$

Сечение подобрано хорошо.

Расчет прочности при эксцентричном сжатии. Если сила приложена к сжатому элементу эксцентрично, то следует выполнить три проверки элемента. Во-первых,

надлежит проверить прочность от момента и продольной силы по формуле

$$\sigma = \pm \frac{M}{W} + \frac{N}{F}, \tag{15.5}$$

где M — момент от эксцентрично приложенной силы;

N — продольная сила;

W — момент сопротивления сечения.

Во-вторых, надлежит проверить его устойчивость от P в плоскости действия изгибающего момента.

Устойчивость в плоскости действия M, совпадающей, как правило, с направлением наибольшей жесткости поперечного сечения, оценивается формулой

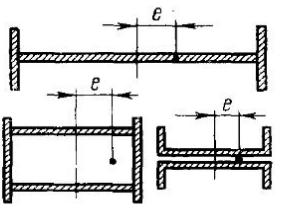
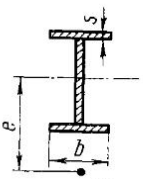
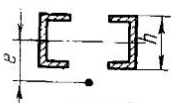
$$\sigma = \frac{N}{\varphi_м F} \leqslant [\sigma]_р. \tag{15.6}$$

Коэффициент $\varphi_м$ для сплошных сечений, у которых все оси материальные, определяется в зависимости от гибкости λ в направлении действия момента и от величины $m\eta$, где m — относительный эксцентриситет,

$$m = \frac{MF}{WN}. \tag{15.7}$$

Таблица 15.2

Значения коэффициентов η и α

Типы сечений		
Коэффициент η		Коэффициенты α
при $\lambda < 150$	при $\lambda > 150$	
 $\eta = 1{,}45 - 0{,}0031\lambda$ $\eta = 1{,}0$		 $\alpha = 0{,}7$  $\alpha = 0{,}6$

Коэффициент m представляет собой отношение наибольшего напряжения от момента к напряжению от продольной силы. Коэффициенты η приведены в левой части табл. 15.2 в зависимости от гибкости λ и от типов сечений для малоуглеродистых сталей.

В большинстве случаев значения η близки к 1, особенно при больших значениях гибкости. В табл. 15.3 приведены коэффициенты $\varphi_м$ в зависимости от $m\eta$ и λ.

Таблица 15.3

Коэффициенты $\varphi_м$ с учетом напряжений от N и M

λ	Значения $\varphi_м$ при $m\eta$, равном									
	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0	14,0
20	0,96	0,80	0,67	0,58	0,50	0,39	0,32	0,23	0,17	0,11
30	0,94	0,77	0,64	0,55	0,48	0,37	0,30	0,22	0,17	0,10
40	0,92	0,74	0,61	0,52	0,45	0,35	0,29	0,21	0,16	0,10
50	0,89	0,71	0,57	0,49	0,43	0,34	0,28	0,20	0,16	0,10
60	0,86	0,67	0,54	0,46	0,40	0,32	0,27	0,19	0,15	0,10
70	0,81	0,63	0,51	0,43	0,38	0,30	0,25	0,18	0,15	0,09
80	0,75	0,59	0,47	0,40	0,35	0,28	0,24	0,17	0,14	0,09
90	0,69	0,55	0,44	0,37	0,33	0,27	0,22	0,16	0,14	0,09
100	0,60	0,50	0,40	0,34	0,31	0,25	0,21	0,16	0,13	0,09
110	0,52	0,46	0,37	0,32	0,28	0,23	0,20	0,15	0,13	0,08
120	0,45	0,41	0,34	0,30	0,26	0,22	0,19	0,14	0,12	0,08
130	0,40	0,37	0,31	0,27	0,24	0,21	0,18	0,14	0,12	0,08
140	0,36	0,33	0,28	0,25	0,22	0,19	0,17	0,13	0,11	0,07
160	0,29	0,28	0,24	0,22	0,20	0,16	0,15	0,12	0,10	0,07
180	0,23	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,06
200	0,19	0,19	0,17	0,16	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,06

При применении низколегированных сталей можно пользоваться табл. 15.3, заменяя гибкость элемента λ условной гибкостью

$$\overline{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_т}{24}}, \qquad (15.8)$$

где $\sigma_т$ — предел текучести низколегированной стали, $кГ/мм^2$.

При этом значения $\varphi_м$ не должны быть больше значений φ, приведенных в табл. 15.1.

В-третьих, следует проверить устойчивость от N в плоскости наибольшей гибкости, как правило, перпендикулярной плоскости действия M, с учетом изгибно-крутильной формы потери устойчивости. В этом случае проверка производится по формуле

$$\sigma = \frac{N}{c\,\varphi_{\min} F} \leqslant [\sigma]_p, \qquad (15.9)$$

где $\varphi_{\min}$ — коэффициент, соответствующий наибольшей гибкости сжатого элемента (см. табл. 15.1);

$$c = \frac{\beta}{1 + \alpha m}; \qquad (15.10)$$

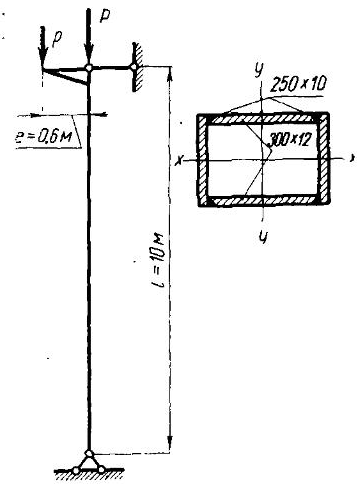


Рис. 15-4. К примеру расчета стойки на эксцентричное сжатие

β может быть принят равным 1. Значения α даны в табл. 15.2.

Площадь поперечного сечения определяют способом последовательного приближения. Если пренебрегать напряжением от момента, то требуемая площадь сечения равна

$$F_{тр} = \frac{N}{[\sigma]_p \varphi}. \qquad (15.11)$$

Задаваясь пониженной величиной $\varphi = 0{,}4 \div 0{,}6$, определяют $F_{тр}$. Конструируют поперечное сечение и производят проверку его прочности и устойчивости по формулам (15.5), (15.6), (15.9).

Если напряжение отклоняется от допускаемого больше, чем на $\pm 5\%$, то размеры сечения меняют и вторично проверяют его прочность и устойчивость.

Для конструкций из алюминиевых сплавов, работающих при эксцентрических нагрузках, устойчивость проверяется по формуле, изложенной в специальных нормах.

Пример расчета (рис. 15-4). Элемент длиной $l = 10$ *м* шарнирно закреплен по концам. Он сжат силой $P = 95{,}0$ *Т*, приложенной центрально, и знакопеременной силой $p = 5{,}0$ *Т*, приложенной с эксцентриситетом $e = 60$ *см* относительно оси; $[\sigma]_p = 1600$ *кГ/см*^{2}. Подобрать поперечное сечение элемента; сталь ст. 3.

Продольная сила

$$N = -95{,}0 - 5{,}0 = -100{,}0 \text{ Т}.$$

В качестве первого приближения пренебрегаем величиной M; принимаем $\varphi=0{,}5$.

Требуемая площадь поперечного сечения определяется по формуле (15.6)

$$F=\frac{100\,000}{1600\cdot 0{,}5}=125{,}0\ см^2.$$

Сечение элемента принимаем в форме коробки, сваренной из двух листов размерами 300×12 *мм* и двух листов размерами 250×10 *мм*; принимаем $F=122\ см^2$.

Определяем момент инерции относительно оси y

$$J_y=2\left(\frac{30^3\cdot 1{,}2}{2}+\frac{25\cdot 1^3}{12}+25\cdot 1\cdot 15{,}5^2\right)=17\,416\ см^4.$$

Радиус инерции

$$r_y=\sqrt{\frac{17\,416}{122}}=12{,}0\ см.$$

Гибкость

$$\lambda_y=\frac{1000}{12{,}0}=83.$$

Момент сопротивления равен

$$W_y=\frac{17\,416}{16}=1088\ см^3,$$

а момент $M_y=5000\cdot 60=300\,000\ кГ\cdot см$.

Суммарное максимальное напряжение определяется по формуле (15.5)

$$\sigma_{max}=\frac{M}{W_y}+\frac{N}{F}=-\frac{300\,000}{1088}-\frac{100\,000}{122}=$$
$$=-275-820=-1095\ кГ/см^2,$$

$$\sigma_{min}=+275-820=-545\ кГ/см^2.$$

Характеристика цикла $r=\frac{535}{1095}\approx 0{,}50$.

В верхней части стойки угловыми лобовыми швами при $K_э=2{,}0$ (см. табл. 10.12) крепят консоль.

Определяем γ по формуле (10.6′) — степень необходимости снижения $[\sigma]_р$ в металле стоек

$$\gamma=\frac{1}{0{,}6\cdot 2{,}0\pm 0{,}2-(0{,}6\cdot 2{,}0\mp 0{,}2)\cdot 0{,}50}>1{,}0;$$

принимаем $\gamma=1{,}0$.

В основном металле стойкн $[\sigma]_р = 1600$ *кГ/см*², что $\geqslant 1095$ *кГ/см*².

Проверяем устойчивость стойки в плоскости действия *M*.

Для проверки устойчивости элемента в направление действия *M* находим относительный эксцентриситет по формуле (15.7)

$$m = \frac{MF}{WN} = \frac{300\,000 \cdot 122}{1088 \cdot 100\,000} = 0{,}336.$$

Коэффициент, зависящий от профиля сечения (см. табл. 15.2),

$$\eta = 1{,}45 - 0{,}0031 \cdot 83 = 1{,}19;$$

произведение $m\eta = 0{,}336 \cdot 1{,}19 = 0{,}40$.

По табл. 15.3 находим значения величины $\varphi_м$:

$$\lambda_y = 83, \quad m\eta = 0{,}40, \quad \varphi_м = 0{,}62.$$

Напряжение сжатия находим по формуле (15.6)

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_м F} = \frac{-100\,000}{0{,}62 \cdot 122} = -1318 \ кГ/см^2.$$

Проверяем устойчивость элемента в направлении, перпендикулярном *M*.

Определяем момент инерции относительно оси *x*

$$J_x = 2\left(\frac{25^3 \cdot 1}{12} + \frac{30 \cdot 1{,}2^3}{12} + 30 \cdot 1{,}2 \cdot 11{,}9^2\right) = 12\,808 \ см^4.$$

Радиус инерции равен

$$r_x = \sqrt{\frac{12\,808}{122}} = 10{,}5 \ см;$$

гибкость

$$\lambda_x = \frac{1000}{10{,}5} = 95.$$

При гибкости $\lambda_x = 95$ коэффициент $\varphi = 0{,}65$ (см. табл. 15.1):

$$c = \frac{\beta}{1 + \alpha m};$$

$\beta = 1$ и $\alpha = 0{,}7$ (см. табл. 15.2); принимаем *c*, как для двутаврового профиля,

$$c = \frac{1}{1 + 0{,}7 \cdot 0{,}336} = 0{,}80.$$

Напряжение сжатия находим по формуле (15.9)

$$\sigma = \frac{N}{c\varphi_{min} F} = \frac{-100\,000}{0{,}80 \cdot 0{,}65 \cdot 122} = -1576 \ кГ/см^2.$$

Сечение подобрано удовлетворительно.

Превышение напряжения относительно допускаемого отсутствует.

§ 3. ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СТОЕК С СОСТАВНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ СЕЧЕНИЯМИ

Каждая из частей, образующих составное сечение стойки, называется его *ветвью*.

В стойках, имеющих составные поперечные сечения, ветви соединяют связями. Наиболее часто в качестве связи применяют соединительные планки (рис. 15-5, *а*), реже — менее удобные в технологическом отношении соединительные решетки (рис. 15-5, *б*). В сварных конструкциях, как правило, применяют планки.

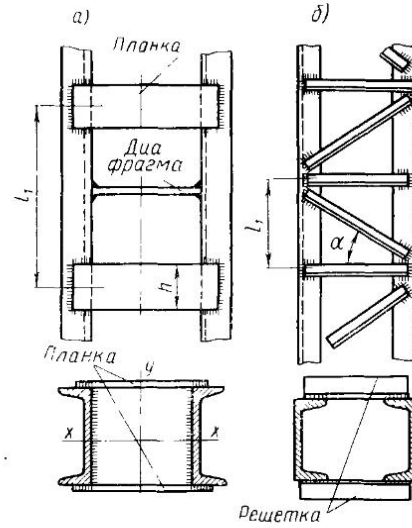


Рис. 15-5. Связи в стойках:

а) соединительные планки; *б*) соединительная решетка

В сжатых элементах с составными поперечными сечениями устойчивость относительно материальной и свободной осей проверяется различными путями. Проверку устойчивости элемента относительно материальной оси (ось x для конструкции, изображенной на рис. 15-5, *а*) производят таким же образом, как и для элементов со сплошными поперечными сечениями. При проверке устойчивости стойки относительно свободной оси (ось y на рис. 15-5, *а*) коэффициент φ находят не как функцию гибкости λ_y, а как функцию гибкости λ_0, называемую *приведенной*.

Приведенную гибкость

$$\lambda_0 = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}. \qquad (15.12)$$

вычисляют при допущении, что ось поперечного сечения материальна.

Чтобы определить устойчивость стойки относительно свободной оси y, сначала определяют гибкость λ_y.

Гибкость λ_1 одной ветви на расстоянии между осями планок (рис. 15-5) вычисляется по формуле

$$\lambda_1 = l_1/r_1, \qquad (15.13)$$

где l_1 — расстояние между осями планок;

r_1 — радиус инерции одной ветви сечения (одного швеллера).

Планки рекомендуется расстанавливать таким образом, чтобы гибкость $\lambda_1 \leqslant 40$.

Наибольшая величина из λ_x и λ_0 принимается в качестве расчетной.

Если ветви поперечного сечения стойки соединены не планками, а решеткой, то приведенная гибкость относительно свободной оси при $\alpha \leqslant 45°$ равна

$$\lambda_0 = \sqrt{\lambda_y^2 + 27\frac{F}{F_p}}, \qquad (15.14)$$

при F — площадь поперечного сечения стержня;

F_p — площадь сечения раскосов соединительной решетки.

§ 4. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

При загружении стойки силой, приложенной центрально, поперечная сила в ней $Q=0$. Это известно из курса «Сопротивление материалов». В действительности в стойке могут существовать незначительные искривления оси и незначительные эксцентриситеты в приложении силы. Эти обстоятельства вызывают появление поперечной силы. На основе многочисленных экспериментов, проведенных в СССР, установлено, что при загружении стойки силой, действующей вдоль оси, допускается определять условно поперечную силу по эмпирической формуле

$$Q = 20\ F\ кГ, \qquad (15.15)$$

где F — площадь поперечного сечения стойки, $см^2$.

Этой формулой следует пользоваться при расчете стоек из малоуглеродистой стали, а также из сплава АМг-6. При расчете конструкций из стали 15ХСНД, 10ХСНД, Ст. 5, Д16Т целесообразнее пользоваться другой формулой

$$Q = 40\ F\ кГ. \qquad (15.16)$$

В конструкции, изображенной на рис. 15-6, *а*, в стойке возникает продольная и поперечная сила Q, равная горизонтальной реакции,

$$Q = P\frac{e}{l}. \qquad (15.17)$$

Когда в стойках реальные поперечные силы больше, чем условные, определенные по формулам (15.15), (15.16), то за расчетную величину принимают реальную поперечную силу Q.

Расчет соединительных элементов в стойках со сплошными поперечными сечениями. В сжатых стойках, имеющих сплошные поперечные сечения, соединительными элементами являются сварные швы. Их конструируют непрерывными; при этом сварку производят автоматами. Расчетным усилием в соединительных швах является поперечная сила: реальная, если она существует от поперечных нагрузок, и условная, определяемая по формуле (15.15) или (15.16), если Q реальная меньше Q условной.

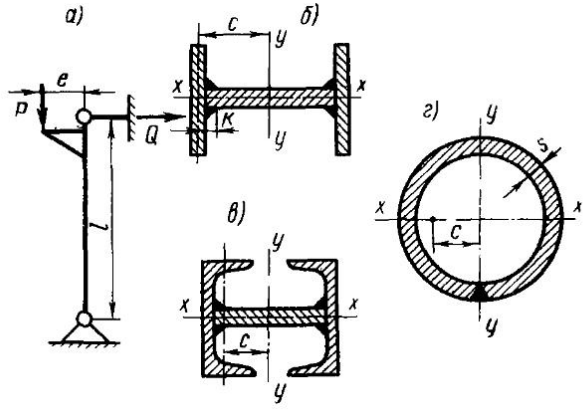


Рис. 15-6. Поперечные сечения стоек со швами, работающими на Q

Касательные напряжения в соединительных швах определяют по формуле

$$\tau = \frac{QS}{J \cdot 2 \cdot 0{,}7\kappa}, \qquad (15.18)$$

где Q — поперечная сила;

J — момент инерции всего сечения относительно оси y (для конструкции, изображенной на рис. 15-6, *б*, *в*);

κ — катет шва;

S — статический момент площади пояса (рис. 15-6, *б*) или швеллера (рис. 15-6, *в*) относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести сечения.

Для конструкции, изображенной на рис. 15-6, *г*, срезывающие напряжения в продольном шве определяются по формуле

$$\tau = \frac{QS}{J \cdot s}, \qquad (15.19)$$

где $S = F \cdot c$;

F — площадь полукольца;

c — расстояние от центра тяжести полукольца до центра трубы.

В большинстве случаев напряжения в швах от поперечной силы оказываются весьма незначительными. Тем не менее величину катета шва следует принимать $к \geqslant 4$ *мм*, если наименьшая толщина соединяемых элементов больше 4 *мм*.

Пример расчета. Для стойки (см. рис. 15-3, вариант *2*) определить напряжения в соединительных швах $к=5$ *мм*, сечение $F=84$ *см*^{2}; материалом является сталь 15ХСНД. По формуле (15.16) определяем Q:

$$Q = 40F = 40 \cdot 84 = 3360 \text{ кГ}.$$

Момент инерции сечения равен

$$J = \frac{25^3 \cdot 0{,}8}{12} + 2\left(\frac{32 \cdot 1^3}{12} + 32 \cdot 1 \cdot 13{,}0^2\right) = 11\,861 \text{ см}^4.$$

Определяем статический момент пояса относительно центральной оси

$$S = 32 \cdot 1 \cdot 13 = 416 \text{ см}^3.$$

Напряжение в швах ($к=0{,}5$ *см*) определяется по формуле (15.18)

$$\tau = \frac{3360 \cdot 416}{11\,861 \cdot 2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5} = 168 \text{ кГ/см}^2.$$

Расчет соединительных планок в стойках составного поперечного сечения. Планки между ветвями стойки целесообразнее вваривать встык, так как при этом количество швов, требуемых для прикрепления планок, меньше, чем при других способах соединений (рис. 15-7, *а*). Вследствие технологических трудностей приварка планок встык часто заменяется соединениями с угловыми швами. В этих случаях длины планок b (рис. 15-7, *б*) зависят не только от расстояния между ветвями элементов, но и от длины угловых швов, необходимых для прикрепления. Ширина планки h определяется при расчете на прочность. Учитывая требование жесткости, ширина планки h должна быть $\geqslant 0{,}5b$. Толщина планки s должна быть подобрана таким образом, чтобы

$$\frac{b_0}{s} \leqslant 50,$$

где b_0 — расстояние между ветвями в свету.

Ветви поперечного сечения сжатого элемента, помимо планок, соединяют между собой диафрагмами, расположенными перпендикулярно оси элемента (см. рис. 15-5,*а*). Назначение диафрагм —

препятствовать скручиванию профиля, которое может произойти из-за смещения одной ветви сечения относительно другой. Количество диафрагм в элементе зависит от его длины. Оно должно быть $\geqslant 2$. Диафрагмы расчетом на прочность не проверяют; их геометрические размеры зависят от расстояния между ветвями и от поперечного сечения стойки. Толщина диафрагмы равна толщине соединительной планки. Конструирование сжатых составных элементов только с одними диафрагмами, без применения соединительных планок или решетки, неприемлемо, так как при этом обе ветви стойки работают раздельно, а не как одно целое. Расчет прочности планок производится в основном на изгибающий момент

$$M = \frac{Ql_1}{4}, \qquad (15.20)$$

где l_1 — расстояние между осями планок.

Напряжение в планке, вызванное изгибающим моментом, должно быть равно

$$\sigma = \frac{M}{W} \text{ должно быть } \leqslant [\sigma]_p, \qquad (15.21)$$

где

$$W = \frac{sh^2}{6}. \qquad (15.22)$$

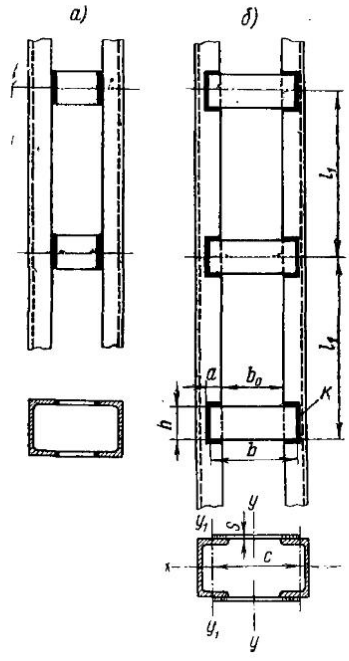


Рис. 15-7. К примеру расчета стойки с соединительными швами

Наименьшая требуемая высота поперечного сечения планки определяется по формуле

$$h = \sqrt{\frac{6M}{[\sigma]_p s}}. \qquad (15.23)$$

Если соединение планок со стойкой выполнено встык (рис. 15-7, *а*), то напряжение в швах определяется из условия

$$\sigma = \frac{6M}{sh^2} \leqslant [\sigma']_p. \qquad (15.24)$$

Если планки приварены угловыми швами, то их условия прочности определяются формулой

$$M = \frac{\tau h^2 \cdot 0{,}7\,\kappa}{6} + \tau \cdot 0{,}7\,\kappa a\ (h + \kappa)$$

(см. гл. IV). Размеры a и κ указаны на рис. 15-7.

Напряжение от изгиба шва должно быть

$$\tau = \frac{M}{0{,}7\,\kappa a\,(h + \kappa) + \frac{0{,}7\,\kappa h^2}{6}} \leqslant [\tau']. \qquad (15.25)$$

Пример расчета. Произвести расстановку соединительных планок в конструкции стойки, приведенной на рис. 15-7, и определить их прочность. Сечение состоит из двух швеллеров № 22а. Принимаем $[\sigma]_р = 2100\ кГ/см^2$.

Наименьший момент инерции J_1 швеллера № 22а относительно собственной вертикальной оси равен 157,8 $см^4$, его площадь — $F = 31{,}84\ см^2$, радиус инерции

$$r_1 = \sqrt{\frac{157{,}8}{31{,}84}} = 2{,}2\ см.$$

Примем гибкость ветви $\lambda_1 = 40$.

Расстояние между осями планок

$$l_1 = 40 \cdot 2{,}2 = 88\ см.$$

Поперечная сила в стойке определяется по формуле (15.16)

$$Q = 40F = 40 \cdot 2 \cdot 31{,}84 = 2546\ кГ.$$

Момент, изгибающий планку, определяется по формуле (15.20)

$$M = \frac{Ql_1}{4} = \frac{2546 \cdot 88}{4} = 56\,012\ кГ \cdot см.$$

Принимаем толщину планки $s = 0{,}8\ см$.

Требуемая ширина вычисляется по формуле (15.23)

$$h = \sqrt{\frac{6M}{[\sigma]_р s}} = \sqrt{\frac{56\,012 \cdot 6}{2100 \cdot 0{,}8}} = 12{,}4\ см.$$

Принимаем $h = 15\ см$.

Размеры горизонтальных швов:

$$a = 5\ см, \qquad \kappa = 0{,}8\ см.$$

Напряжение в швах от изгиба определяется по формуле (15.25)

$$\tau = \frac{56\,012}{0{,}7 \cdot 0{,}8 \cdot 5\,(15 + 0{,}8) + \dfrac{0{,}7 \cdot 0{,}8 \cdot 15^2}{6}} = 993\ кГ/см^2,$$

что ниже допускаемого $[\tau'] = 0{,}65 \cdot 2100 = 1365\ кГ/см^2$.

§ 5. СТЫКИ

Соединения стоек по длине можно производить следующими способами.

Соединения встык сваривают прямым швом (рис. 15-8, *а, б*). Как правило, в соединениях встык напряжение σ меньше, чем допускаемое по устойчивости $[\sigma]_p\varphi$, поэтому прочность такого соединения обеспечена.

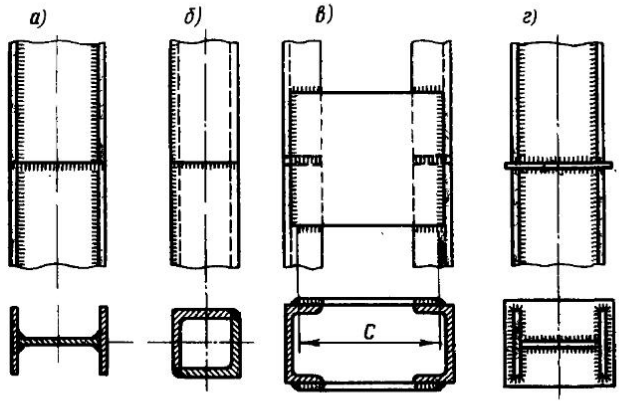


Рис. 15-8. Соединительные планки стоек

Соединения встык, выполняемые прямым швом с накладкой, приведены на рис. 15-8, *в*. Соединения этого типа допускаются для конструкции стоек, имеющих составные поперечные сечения; при этом стыковые накладки служат одновременно соединительными планками.

На рис. 15-8, *г* приведены соединения с помощью прокладок. Так как часть сил передается в соединении по плоскости соприкосновения двутавра с прокладкой, то допускаемые напряжения при расчете сварных швов могут быть повышены. Примем напряжения равными $[\sigma]_{сж}$, тогда прочность швов проверяется по формуле

$$L \geqslant \frac{N}{0{,}7\,[\sigma']_{сж}}, \qquad (15.26)$$

где L — длина периметра швов, приваривающих сечение стойки к прокладке.

§ 6. БАЗЫ И ОГОЛОВКИ

Пример конструкции базы и оголовка стойки приведен на рис. 15-9. База сконструирована в форме плиты, к которой стойка приваривается швами втавр. Плита опирается на фундамент и крепится к нему четырьмя болтами.

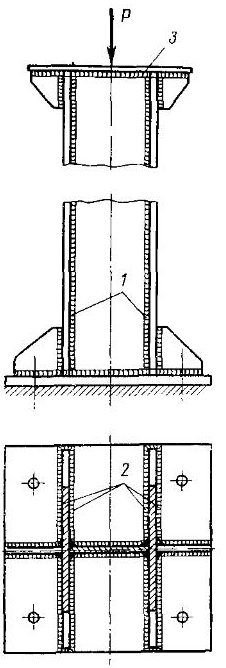


Рис. 15-9. Пример базы и оголовка стойки

Для равномерного распределения давления под плитой последняя делается жесткой. Это достигается приваркой шести ребер жесткости, устанавливаемых в плоскостях вертикального листа и поясов стойки. Швы *1* работают слабо. Они воспринимают лишь фиктивную поперечную силу, которая, как правило, мала. Швы *2* в соединении втавр передают P со стойки на плиту. Частично усилие P передается через указанные швы, частично — через плоскость соприкосновения стойки с плитой. Вследствие изгиба плиты все швы, лежащие на горизонтальной плоскости, испытывают напряжения от поперечной силы, определение которой точным путем представляет трудности. Швы делают непрерывными; катет $k=0{,}75 \div 1{,}0s$ толщины ребер жесткости.

Оголовок оформлен верхней плитой с ребрами жесткости.

Швы *3* в соединении втавр передают силу P с плиты на стойку аналогично швам *2*. Конструкции баз состоят из массивной плиты, укрепленной ребрами жесткости, чтобы обеспечить равномерную передачу усилия на нижележащее основание.

§ 7. ПРИМЕРЫ СТОЕК

Примерами стоек являются колонны промышленных зданий. Типовая колонна среднего ряда изображена на рис. 15-10. Она при различных размерах поперечных сечений применяется в зданиях с пролетами 24, 30 и 36 *м* при разных нагрузках на кровлю и при соответственно различных давлениях на фермы (проект ЦНИИ «Проектстальконструкция»).

Основной тип профиля колонны в верхней части — сварной двутавр, выполненный непрерывными швами автоматом. В нижней части колонна состоит из двух двутавров, соединенных диагональными связями — уголками мелких калибров и диаф-

рагмами. Для элементов связей применяют гнутые уголковые профили. Колонны на фундаменте крепят анкерными болтами. Они поддерживают стропильные фермы и подкрановые балки, на которые устанавливают рельсы.

На рис. 15-11 приведена стрела экскаватора типа ЭВГ-3505 с емкостью ковша 35 *м*³. Одним из основных элементов экскаватора является стрела длиной 65 *м*, представляющая собой сварную трубу с внешним диаметром 1650 *мм* и толщиной стенок 12 и 10 *мм*. Стрела работает в качестве центрально нагруженной стойки. Общий ее вес составляет 100 *Т*.

В качестве стоек работают мачты линий электропередачи, а также поддерживающие антенные устройства. Часто они представляют собой решетчатые конструкции, состоящие из вертикальных поясов, соединенных между собой связями. Негабаритные конструкции изготавливают на заводах в форме блоков. Последние транспортируются на место монтажа, где соединяются сварными швами или высокопрочными болтами (рис. 15-12). Пояса стоек и их связи конструируются из эле-

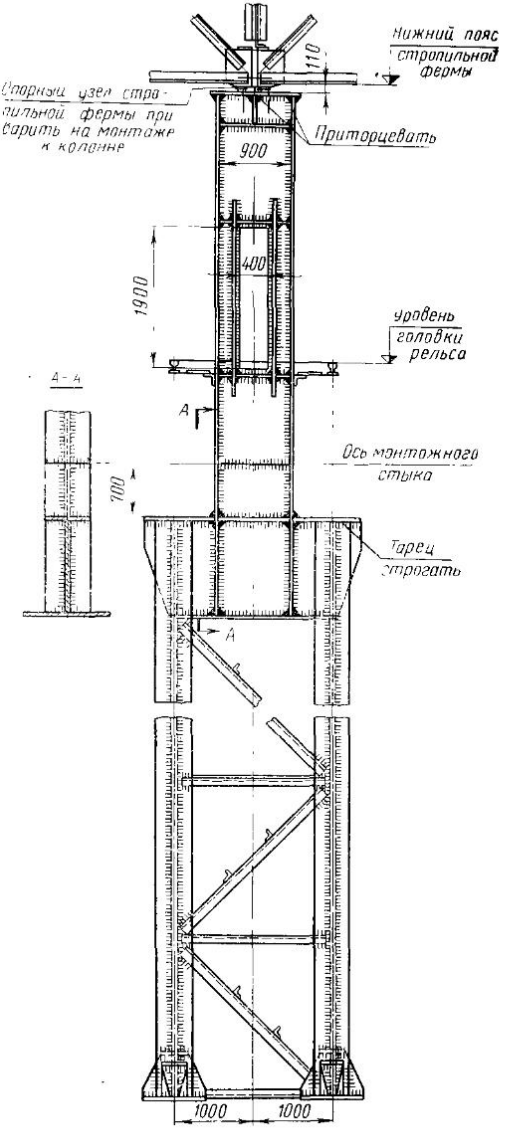


Рис. 15-10. Сварная колонна промышленного здания

ментов уголкового профиля и из тонкостенных труб. В местах соединений трубы сваривают втавр или соединяют при сплющивании концов. Трубчатые элементы рациональны с позиций аэродинамики. Ветровое давление на мачту, представляющее собой один из основных видов нагружений, меньше при трубчатых элементах, нежели при уголковых.

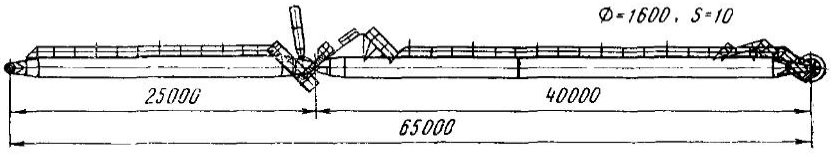


Рис. 15-11. Сварная стрела экскаватора

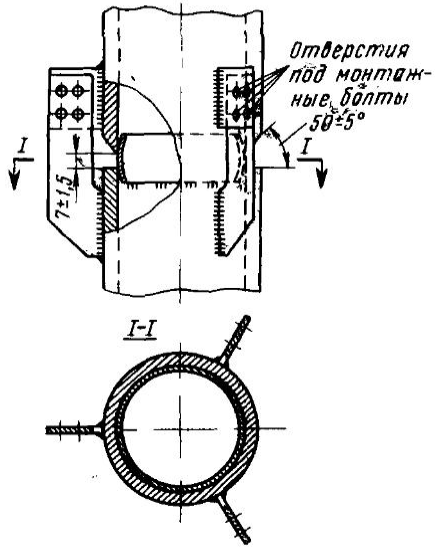


Рис. 15-12. Стык мачты на монтажных болтах

В металлических конструкциях, поддерживающих антенные устройства, важно точное соблюдение заданных габаритных размеров. Необходимо обеспечить жесткость конструкций и довести до минимума влияние таких форм внешних нагружений, как изменение окружающей температуры и импульсы от ветровой нагрузки. Трубы по длине соединяют швами встык. Нередко сборка производится с помощью монтажных болтов (рис. 15-12).

Общий вид сварной высотной конструкции мачты с $h=49{,}2$ *м*, имеющей трехгранное поперечное сечение, изображен на рис. 15-13.

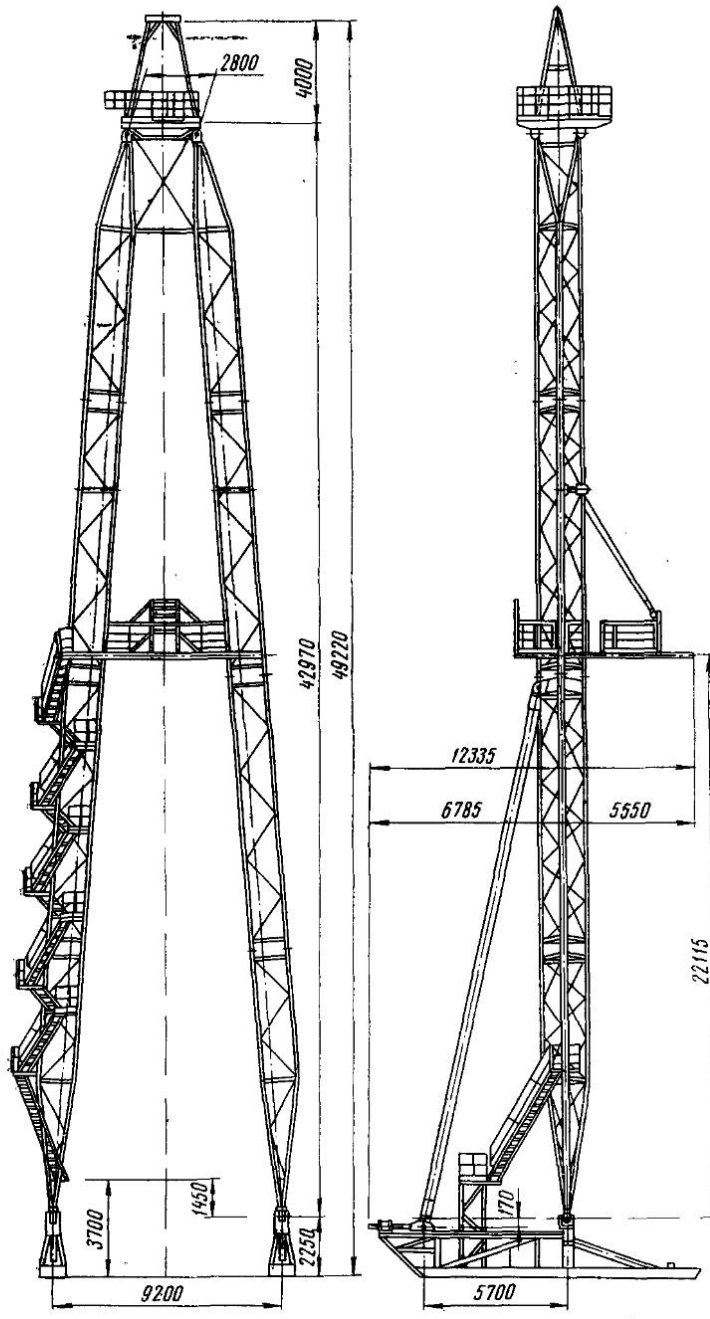


Рис. 15-13. Сварная высотная мачта трехгранного поперечного сечения

ГЛАВА XVI

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ БАЛОЧНОГО ТИПА

§ 1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ БАЛОК ДВУТАВРОВОГО СЕЧЕНИЯ

Наиболее широкое применение имеет двутавровый профиль с поясными швами, выполняемыми обычно автоматами под флюсом.

Обычно двутавр собирают из трех листовых элементов. При их заготовке, помимо правки, резки и зачистки кромок, часто предусматривают сборочную и сварочную операции для получения листового элемента требуемой длины и ширины. В этом случае к стыковым соединениям предъявляется требование полного и надежного проплавления с хорошим формированием усиления и проплава шва. Поэтому сварка, как правило, производится с двух сторон. Первый слой целесообразно сваривать на флюсовой подушке. В этом случае требования к точности сборки менее жестки, чем при сборке под сварку первого слоя на весу.

Схематически устройство флюсовой подушки показано на рис. 16-1. Листы *1* укладываются на стеллаж так, чтобы стык располагался над флюсовой подушкой, представляющей гибкий короб *2*, закрепленный между балками стенда и заполненный флюсом. Прижимами *3* листы плотно прижимаются к стенду, подачей сжатого воздуха в шланг *4* создается равномерное поджатие флюса по всей длине стыка. Часто используют флюсомагнитные подушки, в которых листы к стенду прижимаются магнитами. Для обеспечения высокого качества выполнения сварного шва на всей его рабочей длине применяются заходная и выходная планки.

Сборка балки должна быть достаточно точной; особое внимание уделяется симметрии расположения и взаимной перпендикулярности полки и стенки (рис. 16-2). Сборка на стеллаже с помощью простейших приспособлений является трудоемкой и может применяться только в единичном производстве. Использование приспособлений позволяет повысить производительность сборочных операций на 30—35%.

На рис. 16-3 показан кондуктор с винтовыми прижимами для сборки двутавровых балок. Основание выполнено в виде жесткой сварной рамной конструкции, состоящей из продольных

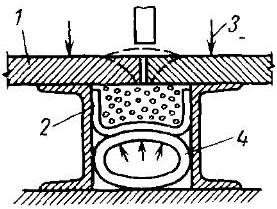


Рис. 16-1. Схема сварки листов встык на флюсовой подушке

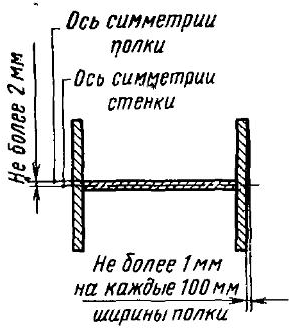


Рис. 16-2. Допуски на сборку Н-образного сечения

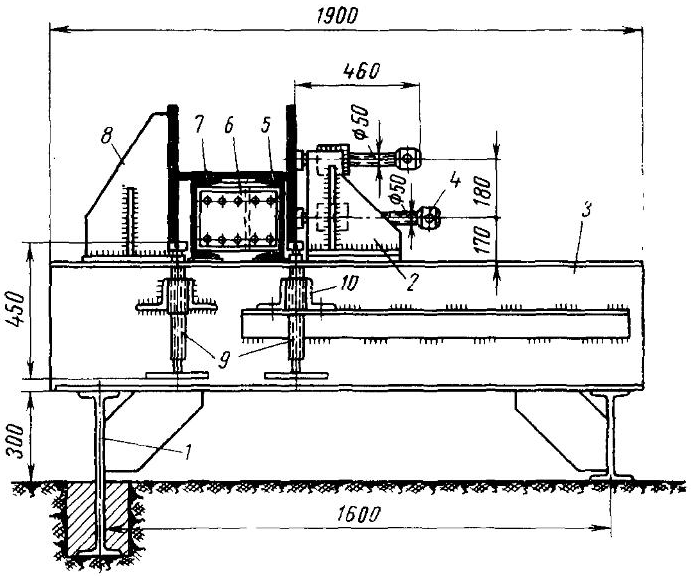


Рис. 16-3. Кондуктор для сборки двутавровых балок

и поперечных балок *1* и *3*. Упоры *8* и прижимы *2* установлены на поперечных балках, продольные балки заделаны в фундамент. Подача длинных и гибких элементов балки в кондуктор

осуществляется мостовым краном сверху с помощью жесткой траверсы со специальными захватами. Вертикальная стенка укладывается на продольные швеллеры *5* и *7*, после чего устанавливаются полки, и детали плотно прижимаются друг к другу винтами *4*. Прихватки обычно становятся только с одной стороны

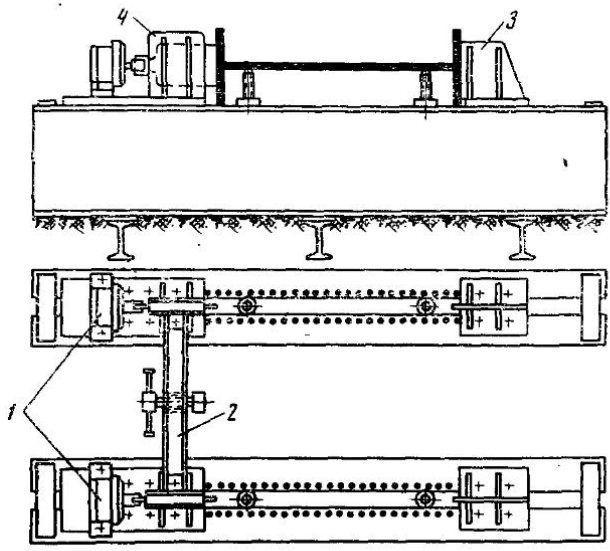


Рис. 16-4. Сборочный кондуктор с пневматическими прижимами:

1 — пневматические цилиндры; *2* — переносная траверса; *3* — неподвижный упор; *4* — направляющие подвижного упора

сверху, их размеры и расположение должны обеспечить жесткость и прочность балки при извлечении из приспособления краном и переносе к месту сварки.

Для обеспечения прямолинейности собираемого двутавра верхние полки поперечных балок приспособления располагаются в одной плоскости, а упоры *8* выставляются по прямой линии. Симметрия расположения стенки относительно полок обеспечивается настройкой поддерживающих винтов *9*. Настройку на определенный типоразмер *H* можно выполнять перестановкой прижимов *2*, а также швеллера *5* за счет проставки *6*. Для этого в поперечных балках кондуктора следует предусмотреть ряд отверстий под болты крепления прижимов *2* и гаек *10*.

Эффект использования сборочного приспособления существенно зависит от быстрого действия и надежности механизма зажатия элементов. Закрепление и освобождение элементов бал-

ки по всей длине с помощью винтов занимает много времени. Значительно производительнее и удобнее в работе приспособления, оснащенные пневматическими зажимами с питанием от заводской сети сжатого воздуха. В этом случае зажатие и освобождение балки осуществляется переключением крана подачи воздуха. Обеспечение взаимной перпендикулярности полки и стенки при сборке требует поступательного перемещения зажимающего элемента. Это можно осуществить либо путем жесткого крепления прижимов на штоках цилиндров, либо прямолинейными направляющими прижимов с шарнирным креплением последних к штокам цилиндров (рис. 16-4).

Помимо рассмотренных кондукторов, предусматривающих зажатие собираемых элементов по всей длине, используют установки с самоходным порталом (рис. 16-5). На жесткой раме *1* смонтированы две продольные балки *5* и *6*, из которых одна (балка *5*) закреплена неподвижно, а другая (балка *6*) может двигаться поперек рамы. Настройка такой установки на определенную высоту собираемой балки осуществляется перемещением продольной балки *6* с помощью винтов *10*, приводимых во вращение электродвигателем *2* через редукторы *3* и *8* и вал *4*. Сборочный портал состоит из ригеля *20* и ног *15* и *24* и имеет два неподвижных пневматических прижима *21* и *25* и два подвижных прижима *17* и *19*, установленных на тележках *16* и *18*, закрепляемых винтами. Перемещение портала по рельсам *7* осуществляется с помощью приводных скатов *13* от двигателя *22* через редуктор *23* и цепную передачу. Захваты *26* предотвращают подъем портала при включении вертикальных прижимов. Элемент стенки укладывается на балки *5* и *6*, полки — на поддерживающие винты *11*, их установке помогают стойки *12*. Сборщик усаживается на сиденье *14* и подводит портал к месту начала сборки (обычно это середина балки). Вертикальными прижимами лист стенки прижимается к раме установки, горизонтальными прижимами к стенке прижимаются пояса и в собранном сечении ставятся прихватки. Затем прижимы выключаются, портал перемещается вдоль балки на 500—700 *мм* и операция повторяется. После окончания сборки портал отводят в крайнее положение и пневматическими толкателями *9* поднимают собранную балку над рамой установки.

Наличие или отсутствие ребер жесткости определяется размерами двутавровой балки и характером ее нагружения. Обычно вертикальные ребра жесткости устанавливаются и привариваются после сварки поясных швов.

В тех случаях, когда балка имеет большую высоту (например, при сборке элементов мостовых пролетных строений), ее стенка может составляться по ширине из нескольких продольных листов *1*. Эти листы или сваривают встык, или с помощью горизонтальных ребер жесткости *2* угловыми швами втавр. Для

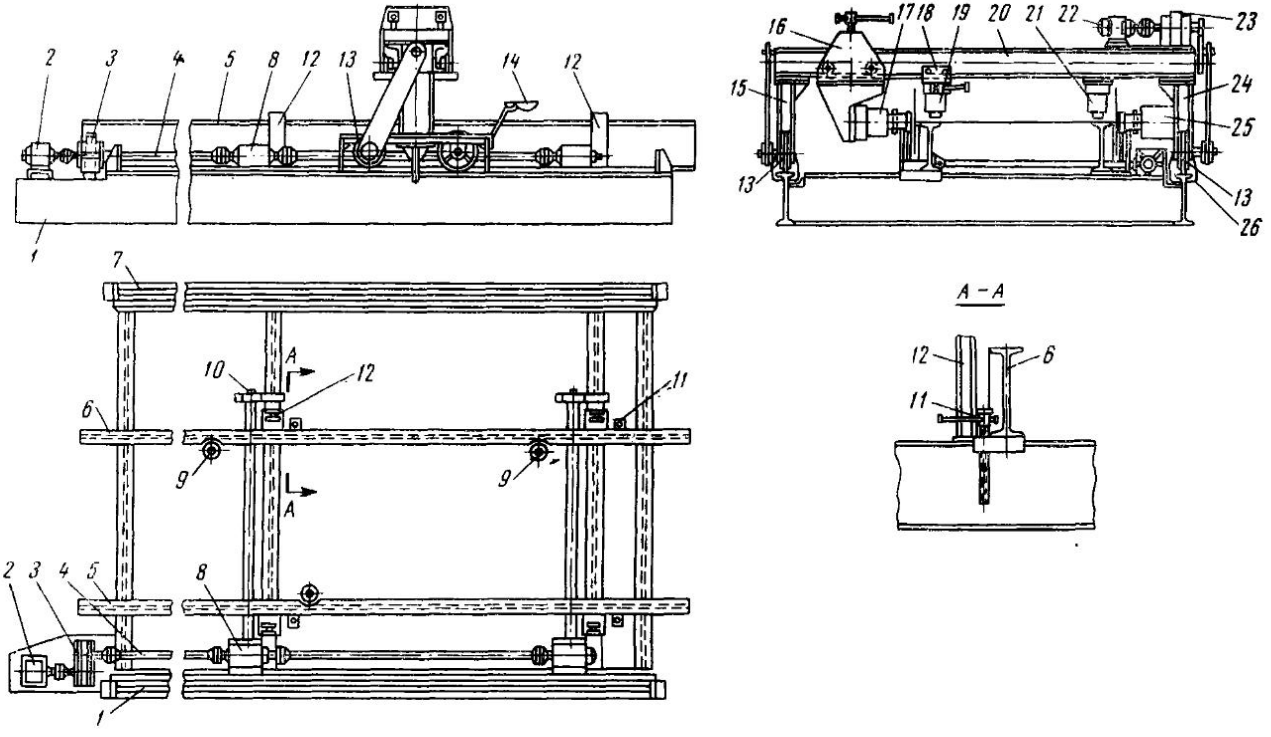


Рис. 16-5. Установка для сборки балок Н-образного сечения с самоходным порталом

сборки таких балок также может использоваться установка со сборочной скобой, но с большим количеством вертикальных прижимов *3* (рис. 16-6).

При изготовлении двутавровых балок основной сварочной операцией является выполнение поясных швов, свариваемых

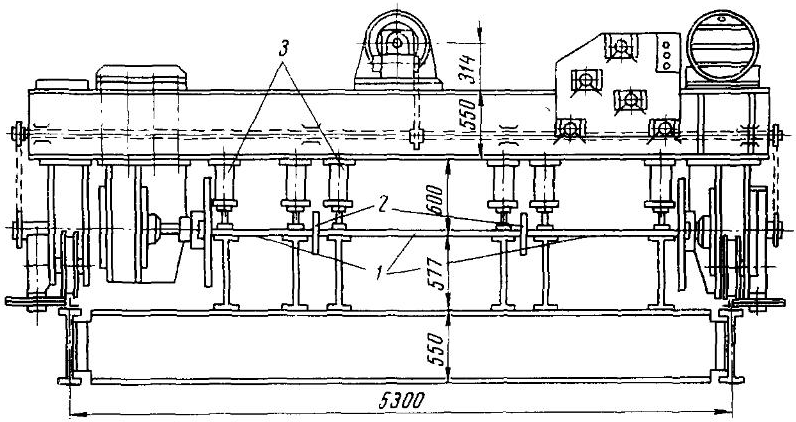


Рис. 16-6. Самоходный портал для сборки балок больших размеров

обычно автоматами под слоем флюса. Приемы и последовательность наложения швов могут быть различными. Приемы сварки наклоненным электродом (рис. 16-7, *а, б*) позволяют одновременно сваривать два шва, однако имеется опасность возникновения подреза стенки или полки. Выполнение швов «в лодочку» (рис. 16-7, *в*) обеспечивает лучшие условия их формирования и проплавления, зато поворачивать изделие приходится после сварки каждого шва. Для этого используют позиционеры-кантователи, наиболее характерные типы которых рассмотрены ниже.

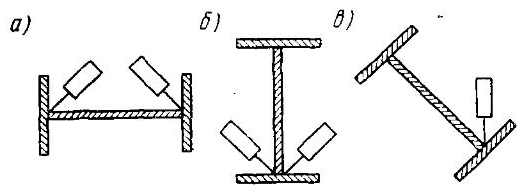


Рис. 16-7. Способы укладки швов

На рис. 16-8 показан центровой кантователь. Предварительно собранная на прихватках балка *2* закрепляется зажимами в задней *1* и передней *3* бабках и с помощью червячной передачи *4* устанавливается в требуемое положение. Наличие подвижной задней опоры позволяет сваривать в таком кантователе балки различной длины.

В том случае, если длина балки велика и необходимо предотвратить ее прогиб, можно между опорами расположить опорные разъемные кольца. На рис. 16-9 показан универсальный кантователь такого типа с подвижными опорами.

Для сварки балок малой жесткости можно использовать кантователь с жесткой рамой *1*, опирающейся на две неподвижные опоры *2* с помощью цапф *3* (рис. 16-10). Весьма прост цепной кантователь (рис. 16-11). Он состоит из нескольких фасонных рам *5*, на каждой из которых смонтированы две цепные звездочки (холостая *1* и ведущая *4*) и холостой блок *6*. Свариваемая балка *3* укладывается на провисающую цепь *2*. Ведущие звездочки имеют общий приводной вал и обеспечивают поворот балки в требуемое положение. Следует иметь в виду, что такой кан-

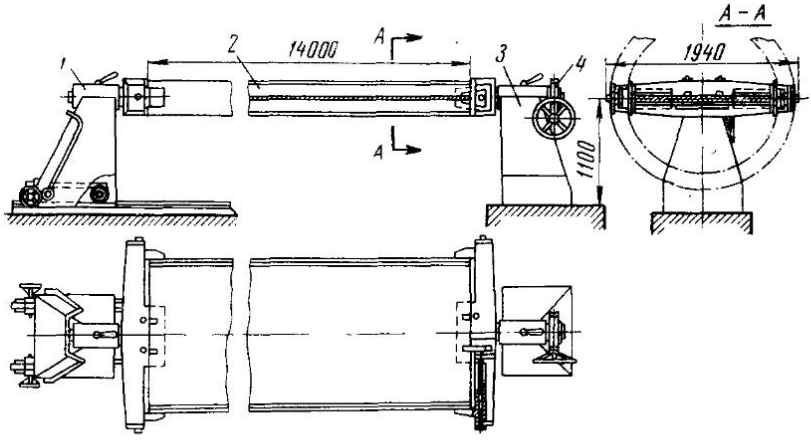


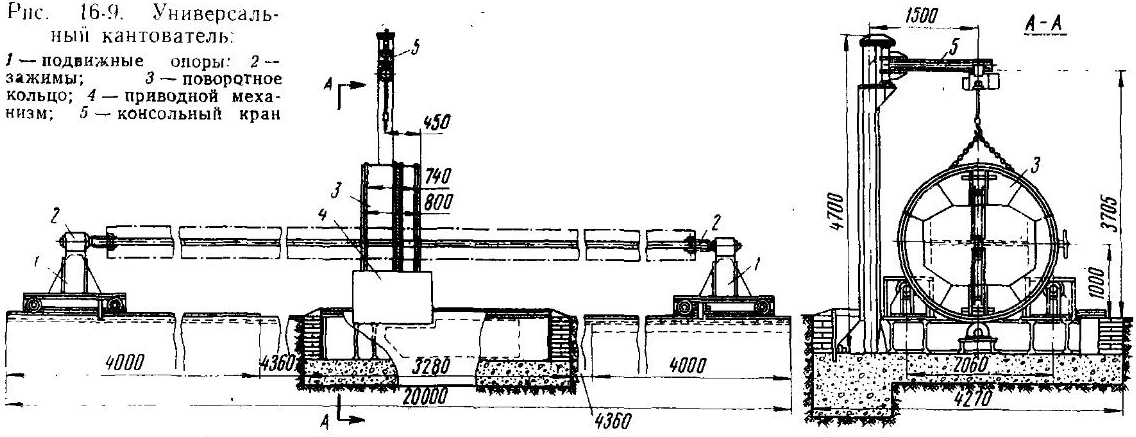
Рис. 16-8. Центровой кантователь для сварки двутавровых балок

тователь не обеспечивает жесткого и неизменного положения свариваемой конструкции, и поэтому во избежание смещения сварочной дуги с кромок детали сварку целесообразно производить сварочной головкой, перемещающейся непосредственно по балке. В некоторых случаях для сварки балок удобны кантователи на кольцах (рис. 16-12). Собранная балка укладывается на нижнюю часть кольца *1*, откидная часть *2* замыкается с помощью откидных болтов *3*, и балка закрепляется системой зажимов *4*.

Рассмотренные сборочные и сварочные приспособления, хотя и повышают производительность труда, по сравнению со сборкой и сваркой на стеллаже, однако вспомогательное время (на установку элементов, их закрепление, прихватку, освобождение от закрепления, извлечение из сборочного приспособления, перенос

Рис. 16-9. Универсальный кантователь:

1 — подвижные опоры; *2* — зажимы; *3* — поворотное кольцо; *4* — приводной механизм; *5* — консольный кран



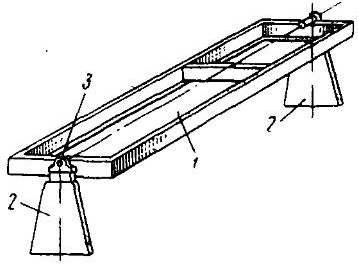


Рис. 16-10. Схема кантователя с жесткой рамой

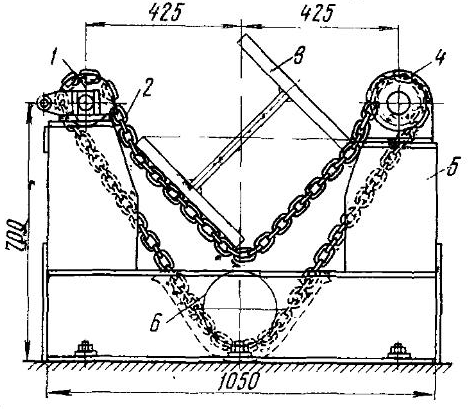


Рис. 16-11. Цепной кантователь

в приспособление сварочное, закрепление и поворот в положение, удобное для сварки, снятие готового изделия) остается весьма значительным.

Сварные двутавровые профили широко используют в строительстве и машиностроении, тавровые профили — в судостроении. При изготовлении их мелкими партиями заводы вынуждены использовать примитивную малопроизводительную оснастку, и такие профили обходятся сравнительно дорого. Серийное производство сварных профилей в поточных линиях позволяет поднять производительность труда и снизить стоимость балок. Такие поточные линии могут оснащаться либо автоматизированными установками непрерывного действия, либо рядом специализированных приспособлений и установок, последовательно выполняющих отдельные операции при условии комплексной механизации всего технологического процесса.

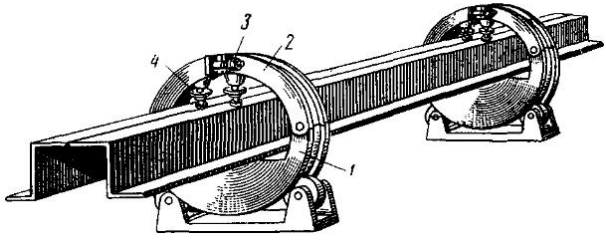


Рис. 16-12. Кантователь с кольцами

Примером установки первого типа может служить станок СТС-138 для сборки и сварки тавровых балок (рис. 16-13), принципиальная схема которого показана на рис. 16-14. Взаимное центрирование заготовок, перемещение со сварочной скоростью и автоматическая сварка под флюсом обоих швов осуществляются одновременно. Устройство для прижатия стенки тавра к поясу состоит из пневматического цилиндра и нажимного ролика *3*. Центрирование элементов тавра производится четырьмя парами роликов; из них две пары *1* направляют пояс вдоль оси станины, а две другие пары *2* удерживают стенку вертикально и обеспечивают ее установку на середину пояса. Каждая пара имеет устройство для регулирования расстояния между ними в зависимости от ширины пояса и толщины стенки. Движение свариваемого элемента осуществляется приводным опорным роликом *4*. Плавное изменение скорости подачи обеспечивается вариатором. На этой установке могут свариваться прямые и криволинейные балки таврового сечения высотой от 60 до 600 *мм*. Концы балки поддерживаются роликами опорных тележек *5*.

При повторном пропуске через установку может привариваться второй пояс для образования двутавровых балок высотой 300—500 *мм*.

По такому же принципу работают установки типа *Pullmax*, выпущенные за рубежом для изготовления сварных балок тав-

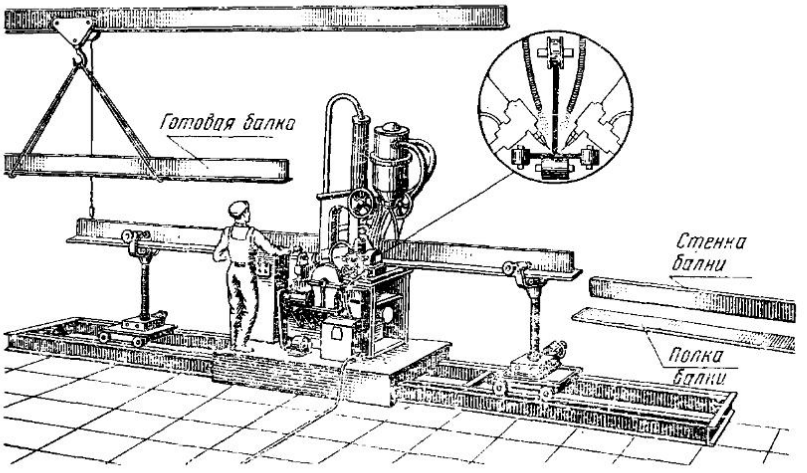


Рис. 16-13. Сборка и сварка тавровых балок на станке «СТС» (в круге — схема сборки и сварки втавр)

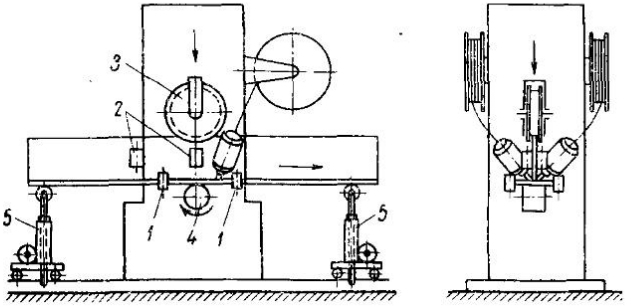


Рис. 16-14. Принципиальная схема станка «СТС» для сварки балок таврового профиля

рового, двутаврового и коробчатого сечений с высотой стенки 150—1500 *мм* и шириной полок 50—500 *мм*. Установка *Pullmax* состоит из рольганга питателя, оборудованного гидравлическими зажимами, сварочного стенда с двумя или четырьмя головками

для сварки под флюсом и соответственного количества источников постоянного тока на 900 *а* каждый. Листовые заготовки требуемого размера закладываются, фиксируются и свариваются, проходя машину со скоростью до 100 *м/ч*. Установка обслуживается одним инженером и двумя подсобными рабочими.

Для дальнейшего развития установок непрерывного действия большое значение приобретает применение сварки током высокой частоты (450 000 *гц*). Так, за рубежом уже используют установки для сварки тавровых, двутавровых и Н-образных профилей из свернутых в рулон лент или полос. Имеющееся оборудование позволяет изготовлять двутавровые балки с максимальной высотой стенки 457 *мм*. Подача полос из трех рулонов осуществляется таким образом, что полки подходят к кромке стенки под некоторым углом (рис. 16-15). Две пары скользящих контактов обеспечивают протекание сварочного тока вдоль поверхности стыкуемых элементов и через место их контакта под обжимными роликами. Разогрев полки происходит на малую глубину, и поэтому степень осадки невелика. В случае необходимости для полок может использоваться профилированная лента, имеющая в середине выступ для сварки со стенкой. Скорость сварки достигает 60 *м/мин*. Процесс экономичен и успешно конкурирует с изготовлением балок прокаткой.

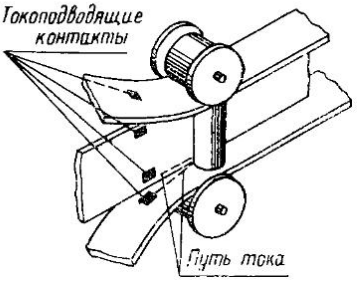


Рис. 16-15. Схема непрерывного процесса изготовления балки из трех полос с помощью ВЧ сварки

Примером поточной линии второго типа является производство сварных двутавровых широкополочных балок на заводе им. Бабушкина. Как показано на схеме (рис. 16-16), поточная линия делится на пять участков.

Со склада металла листы стенки подаются мостовым краном на рольганг *1*. В случае, если стенка двутавра составляется из двух листов, то на рольганге *1* производится обрезка торцов кислородной резкой полуавтоматом и автоматическая сварка стыка стенки на флюсомагнитной подушке. Сваренные листы рычажным кантователем *2* кантуются на рольганг *3*, где стык стенки проваривается с противоположной стороны. После правки в листоправильных вальцах *4* лист стенки с помощью магнитных манипуляторов *6*, рольганга *5* и специальных направляющих тележек проходит дисковые и кромко-крошительные ножницы *7*, обеспечивающие проектный размер высоты стенки, подвергается очистке кромок под сварку и подается в питатель *11*.

Для полок используются полосы универсальной стали, продольные кромки которых обработке не подвергаются. Листы, имеющие длину, равную длине свариваемой балки, мостовым краном укладываются на рольганг *8*, затем подаются в листоправильную машину *9* для правки плоскости и саблевидности. На рольганге *10* листы подвергаются зачистке средней части полки под сварку и мостовым электромагнитным краном переносятся в питатель *11*. В питателе полки двутавра устанавливаются вертикально и вместе с горизонтально расположенной стенкой подаются на специальный сборочный стан *12*.

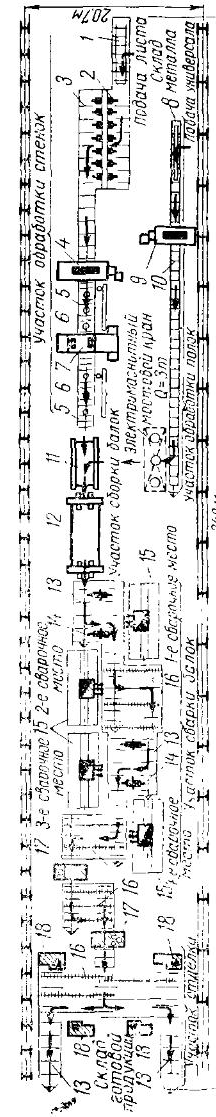


Рис. 16-16. Схема поточной линии производства сварных двутавровых балок на заводе им. Бабушкина

Все операции в этом стане механизированы. Особенностью его является возможность сборки двутавров с предварительным натяжением стенки для предотвращения коробления ее от сварки. Пояса двутавра со стенкой соединяются непрерывными сборочными швами малого размера. Это позволяет осуществлять сборку с увеличенными зазорами без опасения появления прожогов и способствует удержанию стенки в растянутом состоянии в большей степени, чем при использовании прихваток. Два сборочных ниточных шва у обоих поясов накладываются одновременно в положении «в угол» четырьмя однодуговыми автоматами при скорости сварки до 144 *м/ч*.

Из сборочного стана собранный двутавр поступает на рольганг *13*, где производится отбивка шлака и приварка выводных планок в виде тавриков *1* (рис. 16-17, *а*). Затем электромагнитным кантователем *14* (см. рис. 16-16) балка кантуется на 180° и поступает на участок сварки поясных швов, где они выполняются последовательно на четырех рабочих местах *15*. Передвижение балки с одного рабочего места на другое полностью механизировано с помощью продольных *13* и подъемных поперечных рольгангов *16* и кантователей *14*. Перед сваркой на каждом рабочем месте двутавровая балка устанавливается в положение «в лодочку» и сваривается трехдуговым автоматом под

флюсом со скоростью 90÷120 *м/ч*. Основные швы по своим размерам значительно превосходят сборочные швы, и поэтому последние полностью перевариваются. Процессы зажигания дуг, заварки кратера и отключения дуг автоматизированы, и это позволяет обходиться выводными планками длиной всего 150÷200 *мм*. Сваренная балка подается на подъемные рольганги *16* и проходит две последовательно расположенные машины *17*, где грибовидность полок исправляется по схеме, показанной на рис. 16-17, *б*. Затем на скоростных торцефрезерных станках *18* обрабатываются торцы, и балка поступает на склад готовой продукции.

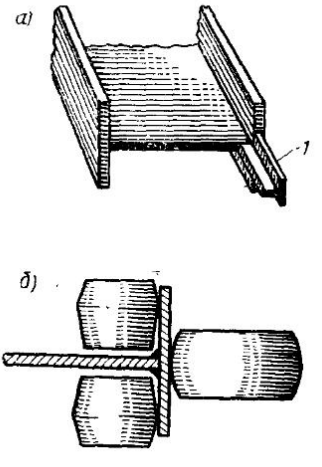


Рис. 16-17. Выводные планки при сварке угловых швов (*а*) и схема правки грибовидности полок (*б*)

Поточная линия завода им. Бабушкина представляет интерес, во-первых, как пример комплексной механизации всего процесса производства крупного сварного изделия, а, во-вторых, оригинальным конструктивным решением оснастки сборочного и сварочного участков. Поэтому целесообразно познакомиться с работой этих участков более подробно. Проделаем это на примере проектирования сборочной и сварочной оснастки такой поточной линии, используя соображения, изложенные в главе XIII, и схему на рис. 13-16.

§ 2. ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНАСТКИ ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ СБОРКИ И СВАРКИ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК

Исходные данные для проектирования:

а) типоразмеры балок, выпускаемых сериями:

длина	7,5÷12 *м*;
высота стенки »	0,6 ÷ 2,0 *м*;
толщина »	6 ÷ 20 *мм*;
ширина полок	0,2 ÷ 0,6 *м*;
толщина »	10÷ 40 *мм*;

б) допускаемые отклонения готовой балки от проектной формы приведены в табл. 16.1;

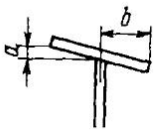
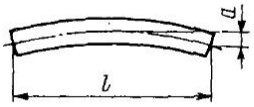
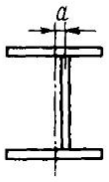
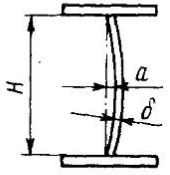
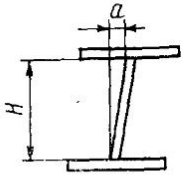
в) поясные швы должны выполняться в положении «в лодочку»;

г) заданный темп линии — 5 балок длиной 12 *м* в час.

Проектирование оснастки участка сборки. Задание на проектирование.

Тип приспособления — специальное, переналаживаемое. Настройка на каждый типоразмер должна обеспечиваться с пульта

Таблица 16.1

Допускаемые отклонения	Эскиз
Перекос полки $\frac{a}{b} \leqslant 0{,}005$	
Отклонение от прямой $a \leqslant 0{,}001\ l$, но не более 10 *мм*	
Несимметричность сечения $a \leqslant 5$ *мм*	
Выпучивание стенки $a \leqslant 0{,}003\,H$, но не более $\frac{\delta}{2}$ и не более 5 *мм*	
Отклонение от вертикали $a \leqslant 0{,}003\,H$	

управления. Требования к оснастке сборочного участка определяются следующими соображениями. Сборка и прихватка балки длиной 12 *м* не может быть выполнена за 12 *мин,* которые предусмотрены заданным темпом поточной линии. Поэтому на сборочном участке необходимо либо предусмотреть два параллельно расположенных одинаковых рабочих места, дублирующих всю сборочную операцию, либо выполнять сборку за две операции на двух последовательно расположенных рабочих местах. В рассматриваемой поточной линии (см. рис. 16-16) выбран второй путь — на сборочном участке последовательно располо-

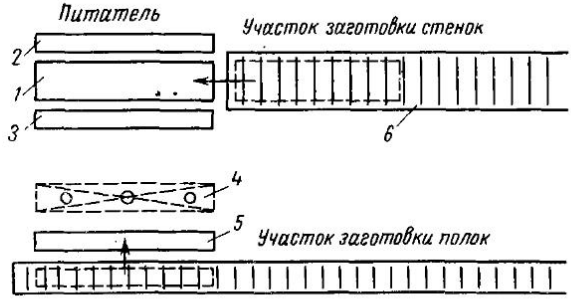


Рис. 16-18. Схема подачи элементов в питатель

жены два рабочих места: питатель и сборочный стан. В соответствии с этим требования к оснастке рабочих мест будут различны.

Питатель должен обеспечить прием трех листовых элементов в горизонтальном положении, поворот полок на 90° и подачу всех трех элементов в сборочный стан.

Сборочный стан должен принять элементы из питателя, обеспечить симметрию расположения и взаимную перпендикулярность полок и стенки, плотное прижатие элементов друг к другу, прихватку их с одной стороны и выдачу собранного двутавра на участок сварки.

Выбор конструктивной схемы.

1. *Питатель. Подача элементов.* В соответствии со схемой поточной линии элемент стенки *1* (рис. 16-18) поступает в питатель непосредственно с рольганга *6*. Элементы полок *2* и *3* переносятся и укладываются в питатель в горизонтальном положении краном *4* из штабеля готовых полок *5*. Оперативность захвата и освобождения, а также предотвращение деформаций гибких полос от собственного веса обеспечивается наличием жесткой траверсы с несколькими магнитными или вакуумными захватами.

Для передачи собираемых элементов в сборочный стан *опорными базами* служат ролики. Их расположение в поперечном

сечении схематически показано на рис. 16-19, *а*. По ширине стенки целесообразно иметь два ролика *1*; полки в горизонтальном положении можно уложить на одиночные ролики *2*. Поворот этих роликов на угол 90° (рис. 16-19, *б*) обеспечивает кантовку полок в проектное положение с опиранием кромок на ролики *3*. По длине следует расположить 7—8 пар роликов каждого типа.

При *настройке* питателя изменение высоты собираемой балки может быть обеспечено поперечным перемещением правой и левой групп роликов относительно оси симметрии (рис. 16-19, *б*). Изменение ширины полки требует вертикального перемещения роликов *3*.

Совместная *выдача* всех трех элементов из питателя в сборочный стан требует привода опорных роликов. Так как кантующие ролики *2* (рис. 16-19, *б*) после их поворота на угол 90° вес полок не воспринимают, то принудительное их вращение не обязательно. Поэтому для перемещения полок и стенки необходим привод только роликов *1* и *3*.

2. *Сборочный стан.* Для приема элементов целесообраз-

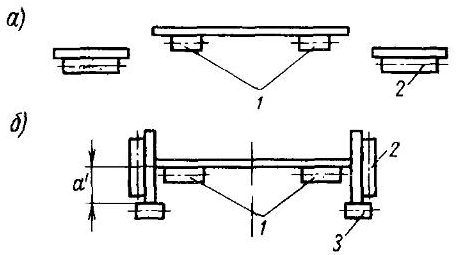


Рис. 16-19. Схема опорных баз питателя

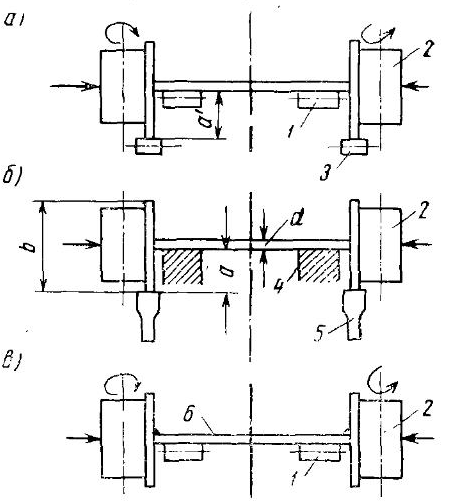


Рис. 16-20. Схемы расположения опорных баз и прижимов сборочного стана:

а) при приеме элементов; *б*) при сборке; *в*) при выдаче собранной балки

но использовать систему роликов, повторяющих расположение роликов питателя (рис. 16-20, *а*). В этом случае *настройка* стана на заданную высоту балки и ширину полок может выполняться путем таких же перемещений роликов, как и в питателе. Боковые ролики *2* (10 пар по длине стана) при сборке следует использовать для плотного прижатия элементов друг к другу, снабдив их гидравлическими цилиндрами. Поэтому *привод движения* при приеме элементов и выдаче собранной балки более просто осуществить не так как в питателе, а принудительным вращением крайних по длине стана боковых роликов *2*.

Задаваемое питателем взаимное расположение элементов балки является ориентировочным, тогда как в сборочном стане система *опорных баз и прижимов* должна обеспечить точность сборки в пределах допустимых отклонений от прямолинейности, симметрии расположения и взаимной перпендикулярности стенки и полок. Магнитный стол *4* (рис. 16-20, *б*), на который стенка опускается под собственным весом в результате отвода опорных роликов *1* (рис. 16-20, *а*), задает плоскость ее расположения и устраняет волнистость. Симметрия расположения полок относительно стенки достигается поднятием полок над опорными роликами *3* с помощью подъемников *5*, настраиваемых на размер $a = \frac{b-d}{2}$. Учитывая необходимость таких перемещений, при настройке питателя и сборочного стана ролики *3* (рис. 16-20, *а*) следует располагать ниже роликов *1* на величину $a' = a + 50$ *мм*. Взаимная перпендикулярность стенки и полок балки обеспечивается выверкой расположения осей нажимных роликов *2* по нормали к поверхности магнитного стола *4*.

Прихватка обеих полок ниточным швом выполняется одновременно наклоненным электродом.

От *закрепления балка освобождается* выключением магнитного стола и сбросом давления в гидроцилиндрах роликов *2*. Опорные ролики *1* (рис. 16-20, *в*) возвращаются в прежнее положение, поднимая балку над поверхностью магнитного стола. *Выдача* балки из стана обеспечивается подачей давления в гидроцилиндры крайних прижимных роликов *2* и включением их вращения.

Конструктивное оформление.

1. *Питатель*. Общая компоновка узлов питателя определяется выбранной конструктивной схемой (рис. 16-21). Два жестких суппорта *4* несут правую и левую группы опорных и приводных роликов. Их перемещение по направляющим *2* станины *1* (сближение или раздвижка) обеспечивает наладку питателя на различную высоту собираемой балки. Такое перемещение суппортов задается оператором с пульта управления включением мотора *5* с помощью ходовых винтов *3*, имеющих правую и левую резьбы.

Подача элементов балки в сборочный стан обеспечивается принудительным вращением горизонтальных роликов; кинематическая схема их привода показана на рис. 16-22. При наладке питателя ролики *2* необходимо перемещать в вертикальном направлении для настройки на заданный размер $a = \frac{b-d}{2} + 50$ *мм*. Это перемещение можно осуществить поворотом коромысла *3* от винта *4* путем вращения гайки *5* с помощью общего для каждого суппорта вала с червяками *6*, включением мотора с пульта управления. Расположение ролика *2* на коромысле *3* позволяет осуществить привод вращения роликов *1* и *2* от одного мотора

с помощью червячной пары *7* и цепных передач со звездочками *8, 9* и *10, 11*. Такая жесткая кинематическая связь вращения роликов *1* и *2* целесообразна для предотвращения относительного смещения полки и стенки в процессе движения. В этом случае привод каждой пары роликов *1* и *2* по длине питателя и на разных суппортах (правом и левом) может быть индивидуальным.

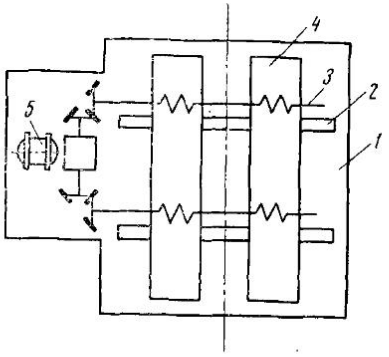


Рис. 16-21. Схема расположения основных узлов питателя

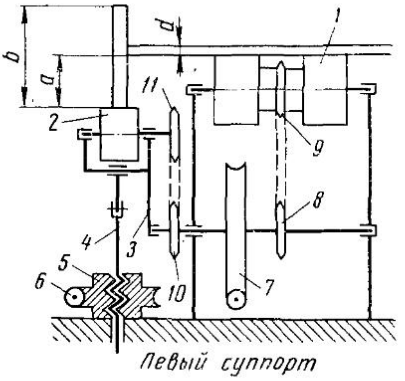


Рис. 16-22. Кинематическая схема привода роликов питателя

Для поворота полок (рис. 16-23) целесообразно использовать общий для каждого суппорта вал *1* с закрепленными на нем рычагами *2*, количество которых соответствует числу неприводных роликов *5*, т. е. 7—8 шт. Поворот вала можно осуществить двумя гидроцилиндрами *3*, включением их с пульта управления. Упор *7* служит для предотвращения соскальзывания полки *6* при повороте. Так как настройка упора может быть грубой и производится сравнительно редко, то можно выполнять ее непосредственным вращением винтов *4* вручную, не вынося на пульт управления.

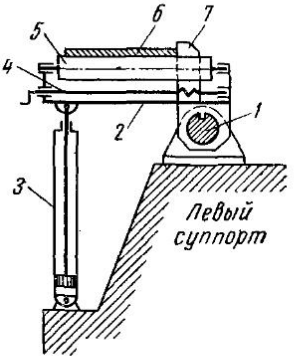


Рис. 16-23. Механизм поворота полок в питателе

2. *Сборочный стан.* Общая компоновка основных узлов сборочного стана может быть такой же, как и у питателя (см. рис. 16-21). Однако требования к жесткости конструкции стана значительно выше из-за большой величины усилия зажатия собираемых элементов.

Механизмы сборочного стана представлены на рис. 16-24. Правая половина рисунка показывает положение элементов при приемке их из питателя. Настройка опорных роликов *2*, поддерживающих полку, на размер $a = \frac{b-d}{2} + 50$ *мм* осуществляется поворотом угловых рычагов *4* с помощью общей тяги *6* вращением гайки *8*. Подъем и опускание роликов *1*, поддерживающих стенку, производится гидравлическим цилиндром *7* через общую тягу *5* и угловые рычаги *3*. Перемещение элементов при приемке

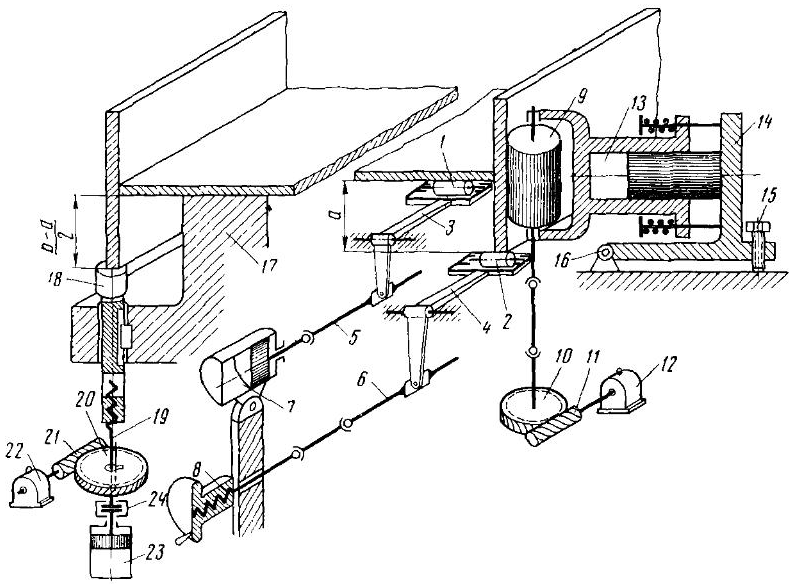


Рис. 16-24. Механизмы сборочного стана

их из питателя и собранной балки при выдаче из стана создается вращением крайних по длине стана прижимных роликов *9* с помощью червячной пары *10—11* от мотора *12*.

Левая половина рис. 16-24 показывает положение элементов перед выполнением прихваточного шва. Стенка балки прижата к поверхности магнитного стола *17*, полка приподнята подъемниками *18* в положение, симметричное относительно стенки. Настройка механизма подъемника производится вращением винта *19* с помощью червячной пары *20, 21* от мотора *22* путем перемещения штока *18*. При сборке балки два штока *18* на каждом суппорте поднимаются и опускаются гидравлическими цилиндра-

ми *23*. Муфты *24* служат для предотвращения вращения штока поршня гидроцилиндра *23* при включении механизма настройки.

Прижатие элементов друг к другу осуществляется десятью парами нажимных роликов *9* с помощью гидравлических цилиндров *13*, развивающих усилие до 5 *Т* каждый. Перпендикулярность образующих роликов *9* к плоскости стенки достигается поворотом оснований гидроцилиндров *14* относительно осей шарнирных закреплений *16* с помощью болтов *15*. Наличие электромеханического и гидравлического приводов позволяет оператору управлять настройкой и работой механизмов сборочного стана дистанционно с пульта управления.

Проектирование оснастки сварочного участка. Задание на проектирование.

Оснастка сварочного участка должна быть специальная, переналаживаемая на заданный диапазон типоразмеров. Требование ТУ выполнять поясные швы в положении «в лодочку» предопределяет необходимость поворота балки перед сварочной операцией и последовательное наложение каждого из швов в отдельности. Так как за 12 *мин* может быть выполнен только один шов длиной 12 *м*, то для обеспечения заданного темпа поточной линии сварочный участок должен иметь несколько рабочих мест. Возможно либо параллельное их расположение, когда на каждом рабочем месте свариваются все четыре шва, либо последовательное, где на каждом из четырех рабочих мест выполняют по одному шву. Принятый в поточной линии завода им. Бабушкина последний вариант представляется более удобным. Первым целесообразно выполнять шов со стороны, где нет прихваточного шва. Это означает необходимость кантовки балки после ее выхода из сборочного стана на 180°. Таким образом, оснастка сварочного участка должна последовательно обеспечивать положения балки, показанные на рис. 16-25. Для этого надо спроектировать кантователи двух типов и предъявить к ним следующие требования:

кантователь на 180° должен иметь быстродействующий захват, надежно воспринимающий вес балки при перевороте. При этом точного фиксирования положения балки относительно кантователя не требуется;

кантователь на 45° должен снять балку с рольганга, установить ее под сварочную головку в положение «в лодочку» и после сварки возвратить на рольганг. Жесткого закрепления балки в процессе сварки не требуется. Для перемещения сварочной головки следует предусмотреть стационарные направляющие. Передача балки с одного рабочего места на другое осуществляется приводным рольгангом.

Выбор конструктивной схемы.

1. *Кантователь на 180°*. Рассмотрим схемы кантователей, показанные на рис. 16-26.

Кантователь в кольцах (рис. 16-26, *а*) представляет собой жесткую рамную конструкцию с неразъемными кольцами *1* для поворота и рольгангом для перемещения балки. Прием осуществляется приводными опорными роликами *2*, поворот — принудительным вращением роликов *3* и выдача после кантовки при-

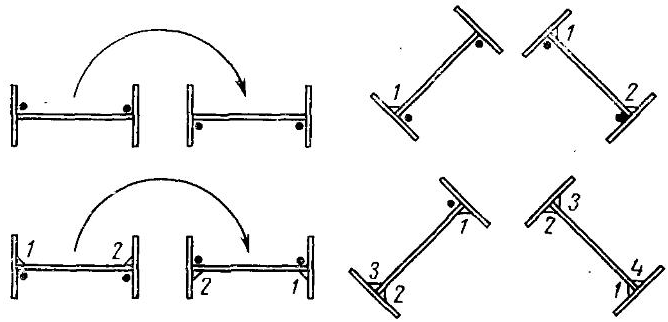


Рис. 16-25. Положения балки на сварочном участке

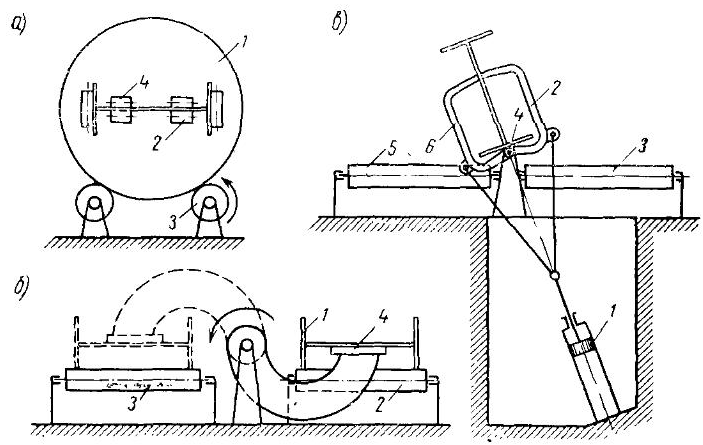


Рис. 16-26. Схемы кантователей на 180°

водными опорными роликами *4*. Положительной стороной такой схемы является возможность расположения кантователя в одну линию со сборочным станом и рольгангом сварочного участка. Однако механизм настройки и привода роликов поворотного рольганга оказывается достаточно сложным.

Рычажный кантователь с магнитами (рис. 16-26, *б*) переворачивает балку *1*, перекладывая ее с одного рольганга *2* на дру-

гой *3*. Такие кантователи не позволяют располагать оборудование в одну линию. Кроме того, большой момент на валу кантователя предъявляет высокие требования к его силовому приводу; для питания магнитов *4* необходим источник постоянного тока, а неровности стенки могут нарушить надежность захвата. Однако кинематическая схема кантователя проста и при переходе от одного типоразмера балки к другому кантователь не требует переналадки.

Кантователь с наклонным цилиндром (рис. 16-26, *в*), как и рычажный кантователь с магнитами, поворачивает балку, перекладывая ее с одного рольганга на другой. Для этого при ходе поршня *1* вверх рычаг *2* приподнимает правую полку балки над рольгангом *3* и, перекатывая левую полку на опоре шарнира *4*, переводит балку в положение, изображенное на рисунке. При ходе поршня вниз балка под собственным весом, поддерживаемая рычагом *6*, опускается на рольганг *5*. Необходимость переналадки кантователя при широком диапазоне типоразмеров балки значительно усложняет конструктивное оформление этой, сравнительно простой, кинематической схемы.

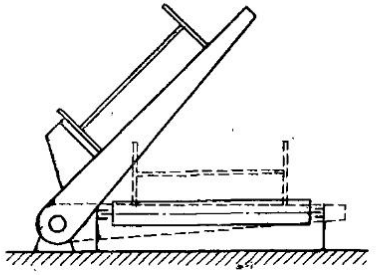


Рис. 16-27. Схема кантователя на 45°

В поточной линии завода им. Бабушкина использован магнитный кантователь с тремя рычагами по длине балки.

2. *Кантователь на 45°*. Так как передача балки с одного рабочего места на другое выполняется рольгангом, то для выполнения сварочной операции кантователь должен снимать балку с рольганга, а после сварки возвращать ее на рольганг. В этих условиях наиболее просто использовать рычажный кантователь с двумя рычагами по длине балки, располагаемыми между роликами рольганга, как схематически показано на рис. 16-27.

Конструктивное оформление.

1. *Кантователь на 180°*. Надежность захвата балки магнитами существенно зависит от предотвращения перекоса и смещения поверхности стенки относительно поверхности магнитов в процессе поворота. Поэтому рычаги должны иметь упоры, предотвращающие смещение балки и поворачиваться строго синхронно. Наличие общего вала с жестким присоединением к нему всех трех рычагов отвечает этому требованию. Так как момент на валу кантователя может достигать величины порядка 12 000 *кГ·м*, то электромеханический привод оказывается слишком громоздким. Более целесообразно использовать силовой

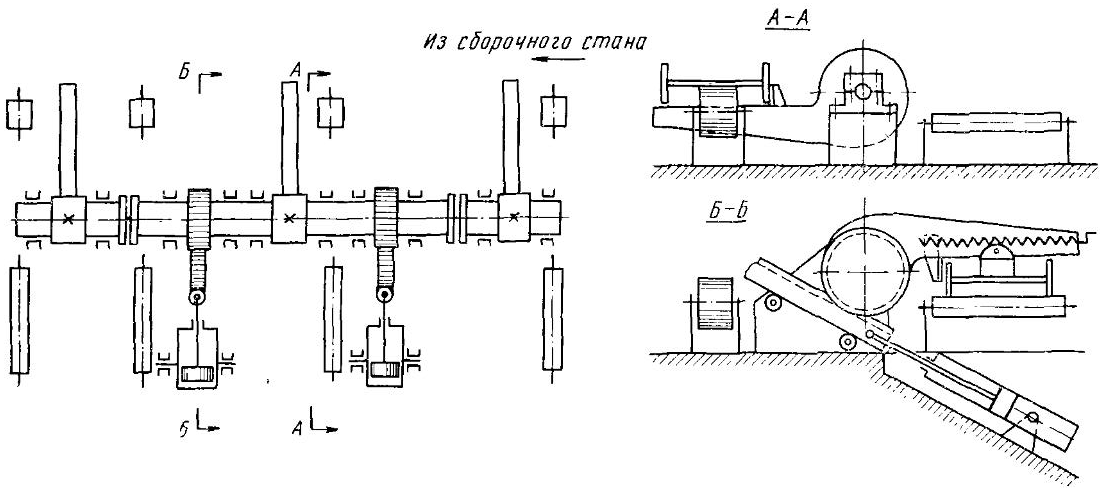


Рис. 16-28. Конструктивная схема магнитного кантователя на 180°

цилиндр и пару: зубчатое колесо — рейка. В этом случае существенным является выбор рабочего тела силового цилиндра. При повороте балки переход через мертвое положение сопровождается переменой направления силы, действующей в паре колесо — рейка, что исключает возможность использования пневматического привода. При использовании гидропривода масло должно заполнять обе полости цилиндра как над поршнем, так и под ним. Плавное опускание балки на рольганг после прохождения мертвого положения в этом случае происходит вследствие выдав-

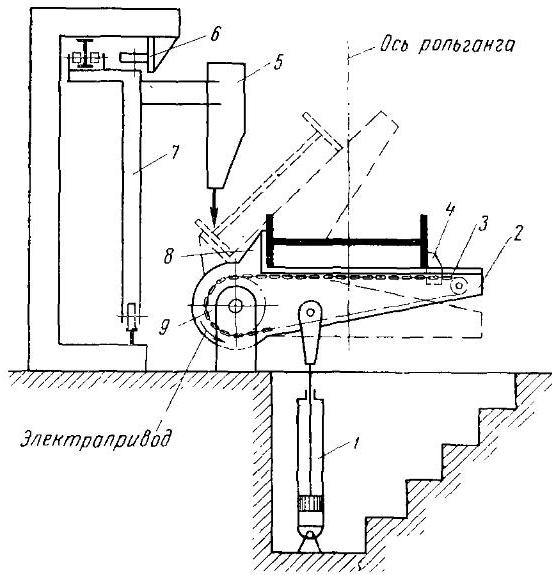


Рис. 16-29. Конструктивная схема магнитного кантователя на 45°

ливания масла через калиброванное отверстие. По длине вала момент целесообразно прикладывать в двух местах, используя два гидроцилиндра и две пары рейка — колесо, для уменьшения размеров гидроцилиндров следует использовать насос с максимальным давлением порядка 200 *ат*. Общая конструктивная компоновка магнитного кантователя показана на рис. 16-28.

2. *Кантователь на 45°*. Для установки под сварочную головку достаточно по длине балки расположить два рычага *2* (рис. 16-29). Их поворот наиболее просто осуществить с помощью двух пневматических или гидравлических цилиндров *1*. Отсутствие жесткой кинематической связи между рычагами хотя и может привести к некоторому перекосу балки в процессе пово-

рота, но на конечное ее положение влияния не окажет. Перед поворотом балку следует сдвинуть вдоль рычага до упора *8*. Такое смещение выполняется досылателем *4* с помощью цепи *3*, звездочки *9* и электропривода. Для перемещения сварочной головки *5* по направляющим *6* целесообразно использовать тележку велосипедного типа *7* с площадкой для сварщика.

§ 3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУТАВРОВОГО СЕЧЕНИЯ

Элементы двутаврового сечения широко используются в строительных конструкциях.

Подкрановые балки обычно выполняют в виде сварного двутавра с ребрами жесткости. Условия их работы предъявляют вполне определенные требования к конструктивному оформлению и технологии выполнения сварных соединений. При нагружении сварного двутавра только продольным изгибающим моментом такие концентраторы, как подрез стенки или непровар корня поясного шва, особой опасности не представляют, так как располагаются параллельно нормальным и касательным напряжениям. Однако сечения подкрановой балки дополнительно испытывают периодическое нагружение сосредоточенной силой от колеса крана, передаваемое с рельса на верхний пояс и через поясные швы на стенку балки. Кроме того, при нарушениях симметрии рельса относительно оси балки возникает дополнительный момент в поперечном направлении, воспринимаемый поясными швами и стенкой. В этом случае непровар корня поясного шва или подрез стенки оказываются расположенными поперек силового потока и поэтому могут служить причиной возникновения усталостных трещин, что подтверждается многолетней эксплуатацией таких балок. Следовательно, конструктивные элементы подобного типа целесообразно выполнять с полным проплавлением стенки и сварку поясных швов производить в положении «в лодочку» для предотвращения подрезов. Установка и приварка ребер жесткости производится после выполнения поясных швов наклоненным электродом. К концам подкрановой балки могут быть приварены планки, нижние грани которых опираются на колонны, задавая положение балки по высоте. Поэтому установка этих планок с монтажными отверстиями должна быть выполнена достаточно точно. Для этой цели можно использовать сборочный фиксатор *1* (рис. 16-30) в виде углового шаблона, на одной из полок которого имеются четыре отверстия. Расположение этих отверстий и размер *c* соответствуют проекту. Требуемая высота балки *H* на опоре обеспечивается совмещением отверстий фиксатора *1* с монтажными отверстиями планки *3* на пробках *2* и прижатием горизонтальной планки фиксатора к верхнему поясу балки.

Сварной двутавровый профиль также широко используется при изготовлении колонн. В этом случае условия работы сечения иные, и проплавление стенки двутавра не является обязательным. Существенные требования к изготовлению колонн предъявляют условия монтажа: перпендикулярность оси колонны к опорной плоскости плиты башмака, параллельность плоскостей опорных плиток подкрановых консолей и опорной плиты башмака и соблюдение проектного расстояния между ними, правильность расположения монтажных отверстий относительно опорных столиков ферм и т. д.

Проследим выполнение этих требований на примере колонны, показанной на рис. 16-31. После сварки основного двутавро-

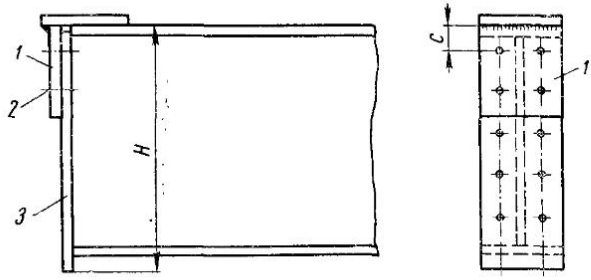


Рис. 16-30. Установочный шаблон для сборки подкрановых балок

вого сечения колонны ее нижний торец отрезается дисковой пилой или обрабатывается на торцефрезерном станке строго перпендикулярно ее оси. Затем с помощью накладных кондукторов, устанавливаемых в упор к торцу, сверлят все монтажные отверстия. Общая сборка колонны начинается с базы, опорная плита которой устанавливается в упор к обработанному торцу колонны. Установка подкрановых консолей *3*, столиков *2*, ребер *1* и других деталей производится с использованием фиксаторов и ранее просверленных монтажных отверстий, с которыми фиксаторы совмещаются с помощью пробок. Конструкция фиксаторов и последовательность их использования показаны на рис. 16-32, *а, б, в*.

Сечение колонны может состоять из нескольких прокатных или сварных профилей. Соединения их между собой обычно выполняются дуговой сваркой, но может также использоваться сварка контактная. Так, например, на рис. 4-15 показано сечение колонны, выполненной во Франции из холоднокатаных двутавров точечной сваркой. Двутавры сваривались попарно, к полке толщиной 32 *мм* приваривалась стенка толщиной 14 *мм*. Для

этой цели спаренные балки укладывались на две тележки, из которых ведущая имела дистанционное управление. Применялась машина *«Sciaky»*, мощностью 450 *ква* с максимальным усилием сжатия электродов 14 *Т*.

Двутавровые сварные балки больших размеров используются в пролетных строениях со сплошной стенкой (рис. 16-33). При изготовлении сварных мостов особое внимание уделяется качеству выполнения сварных соединений и мероприятиям по предотвращению и устранению концентрации напряжений. Поэтому автоматическая сварка используется не только при выполнении отдельных балок пролетного строения, но и при выполнении стыков балок на монтаже. Конструкция и технология сварки таких стыков своеобразна.

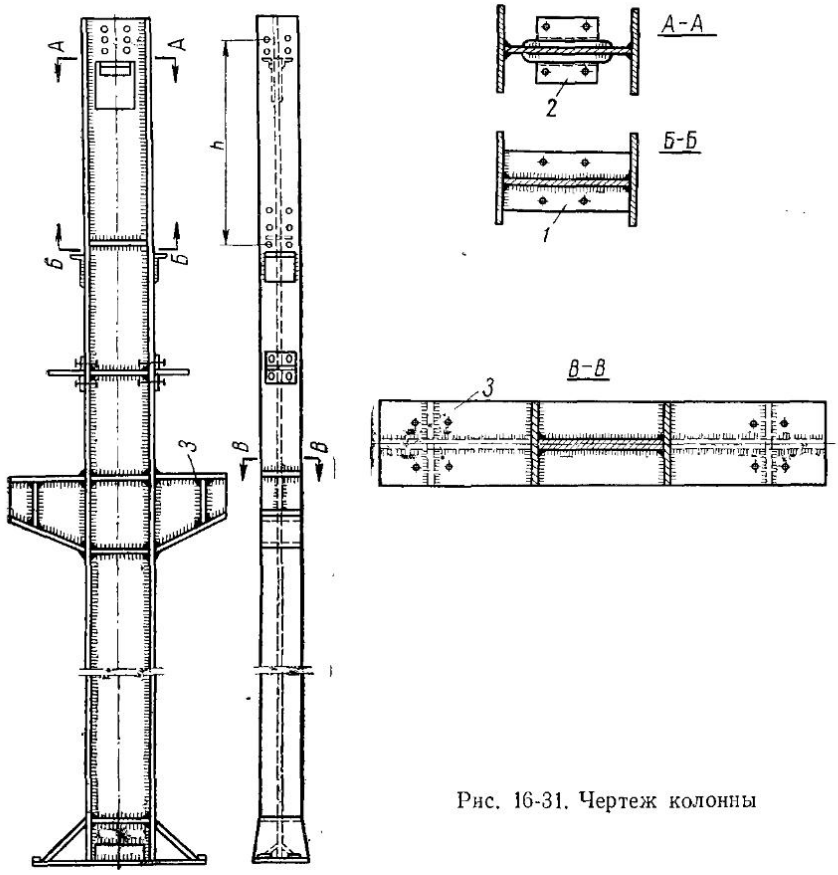


Рис. 16-31. Чертеж колонны

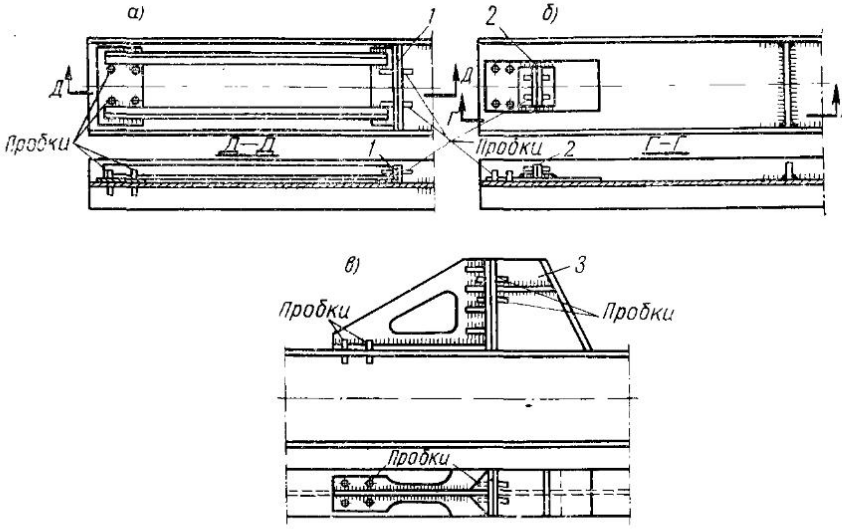


Рис. 16-32. Сборка колонны с помощью фиксаторов:

а) установка ребра *1*; *б)* установка столика *2*; *в)* установка консоли *3*

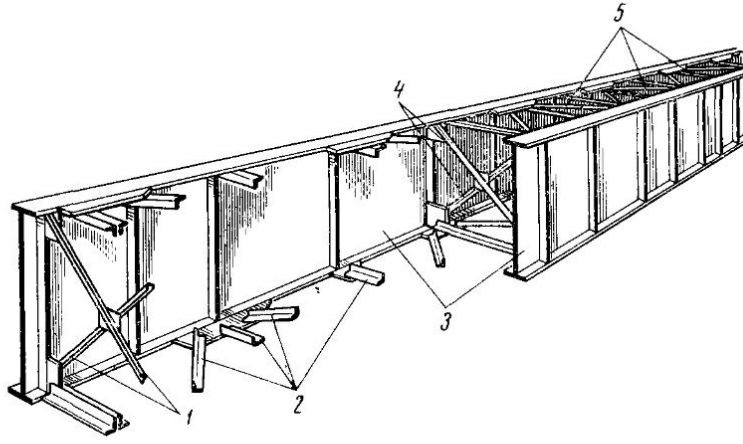


Рис. 16-33. Общий вид пролетного строения со сплошной стенкой:

1 — опорные поперечные связи; *2* — нижние продольные связи; *3* — главные балки; *4* — промежуточные поперечные связи; *5* — верхние продольные связи

Первым собирается стык нижнего пояса (рис. 16-34) с прихваткой выводных планок. Сварка автоматом выполняется многослойным швом на технологической стальной подкладке, поджимаемой снизу более массивной медной подкладкой. После сварки выводные планки и подкладка удаляются и производится тщательная зачистка. Затем устанавливается вставка вертикальной стенки и выполняется сварка автоматами вертикальных швов с принудительным формированием и выведением концов швов на выводные планки. После удаления планок устанавливается и прихватывается горизонтальная вставка верхнего пояса, сваривается один из ее стыковых швов по той же технологии, как и стык нижнего пояса и завариваются роспуски поясных швов

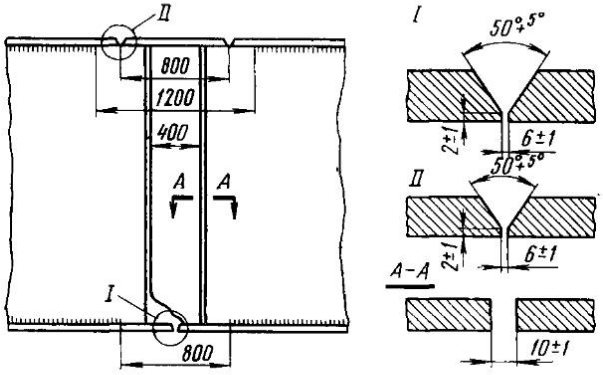


Рис. 16-34. Монтажный стык главных балок

у верхнего пояса в потолочном положении вручную. Такая последовательность позволяет избежать потери устойчивости вертикальной стенки от усадки второго стыкового шва вставки верхнего пояса. В последнюю очередь полуавтоматом завариваются роспуски швов нижнего пояса балки.

Несмотря на отличное качество таких соединений, проблему монтажа цельносварных пролетных строений еще нельзя считать окончательно решенной. Отсутствие монтажных отверстий в стыках позволяет использовать все сечение и уменьшить вес фермы, но не дает возможности временно соединять стыки на болтах без установки временных опор. В результате такие экономически выгодные методы монтажа, как навесная и полунавесная сборка, не могут быть применены, и цельносварные пролетные строения приходится собирать или на временных опорах, устанавливаемых под всеми монтажными стыками, или на подходе к мосту с последующей продольной надвижкой.

§ 4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ БАЛОК КОРОБЧАТОГО СЕЧЕНИЯ

Балки коробчатого сечения чаще всего используются при изготовлении конструкций крановых мостов и могут иметь большую длину. В этом случае полки и стенки составляются из нескольких листовых элементов, свариваемых встык. На общую сборку по́лки обычно поступают в виде полосы требуемой длины, а боковые стенки или подают в готовом виде, или набирают из отдельных листов.

Сборку балки начинают с укладки на стеллаж верхнего пояса (верхней полки), расстановки и приварки к нему диафрагм. Такая последовательность определяется конструкцией балок этого типа, т. е. наличием малых и больших диафрагм, и необходимостью создания жесткой основы для дальнейшей установки боковых стенок. Требования к точности расположения диафрагм вытекают из необходимости обеспечения прямолинейности боковых стенок и их симметрии относительно верхнего пояса. После приварки диафрагм устанавливают, прижимают (рис. 16-35, *а*) и прихватывают боковые стенки. Затем собранный П-образный профиль кантуют и внутренними угловыми швами стенки приваривают к диафрагмам (рис. 16-35, *б*). Сборку заканчивают установкой нижнего пояса. Сварку поясных швов осуществляют после завершения сборки. Поворот балки в положение «в лодочку» обычно не производят, и сварку ведут наклоненным электродом. Это объясняется тем, что для балки коробчатого сечения подрез у поясного шва менее опасен, чем для двутавра.

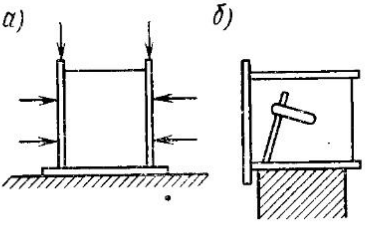


Рис. 16-35. Изготовленне балки коробчатого сечения:

а) установка боковых стенок; *б*) сварка внутренних швов

При отсутствии специализированной оснастки и механизации процессов изготовление балок коробчатого сечения оказывается весьма трудоемким. Организация поточного производства таких балок, как и большинства сварных конструкций значительных размеров, обычно усложняется из-за сравнительно малого выпуска одинаковых изделий одного типоразмера и достаточно большого количества разных типоразмеров. Рассмотрим особенности подобного производства на примере механизированной поточной линии изготовления пролетных балок мостовых кранов на Узловском машиностроительном заводе. Вследствие большой длины балок (до 36 *м*) линия выполнена с поперечным направлением потока и продольным движением оборудования и механизмов

относительно изделия. Общий вид всех пяти рабочих мест этой линии показан на рис. 16-36.

Первое рабочее место — сборка и сварка верхнего пояса, установка и прихватка диафрагм. Транспортировка и раскладка листов верхнего пояса выполняется специальным самоходным порталом, имеющим подъемную траверсу с вакуумными захватами. Такие захваты обеспечивают возможность поштучного подъема листов металла из штабеля, что исключено при работе с магнитами. Портал передвигается по рельсам от места комплектования заготовок вдоль сборочного стенда. Стенд состоит из ряда роликовых опор, между которыми смонтированы магнитные флюсовые подушки, кантующие устройства и склизы. Сборка и сварка листов верхнего пояса выполняется на флюсомагнитных подушках полуавтоматом. Поворот верхнего пояса на 180° для сварки с обратной стороны производится рычажным кантователем, подобным изображенному на рис. 16-26, *в*. Первые рычаги девяти секций кантователя переводят верхний пояс из горизонтального положения в вертикальное (на угол 100°), а затем вторые рычаги подхватывают пояс и кладут его в горизонтальное положение. После этого пояс сдвигается в поперечном направлении на середину стенда и выполняется полуавтоматическая сварка стыковых швов с обратной стороны. Диафрагмы подают передвижной тележкой, по разметке устанавливают на поясе в вертикальное положение и прихватывают. Затем верхний пояс с диафрагмами («гребенка») передается на стеллаж, расположенный между *1* и *2* рабочими местами.

Передача длинной и гибкой «гребенки» со стенда *1* на промежуточный стеллаж и со стеллажа на рабочее место *2* выполняется двумя тележками с упорами и общим приводом через цепную передачу. Провисание «гребенки» предотвращается специальными склизами, смонтированными на стойках стенда *1* (рис. 16-37). Склиз представляет собой балку *1*, опирающуюся на ролик *7*, закрепленный на стойке *6*. На конце этой балки закреплена ось другого ролика *4*, перекатывающегося по направляющим *3*. Захваченная упорами транспортирующих тележек «гребенка» смещается по склизам *1* до упоров *10* и увлекает их за собой, поднимая грузы противовесов *5*. При подходе к соседнему стенду рычаги *8* упираются в его стойки, поворачиваются и убирают упоры *10*, сжимая возвращающие пружины *9*. Увлекаемая транспортирующими тележками «гребенка» сдвигается на соседний стеллаж или стенд, освобождая склизы, которые возвращаются в исходное положение противовесами.

На промежуточном стеллаже производится приварка диафрагм к поясу полуавтоматом под флюсом. Кроме того, этот стеллаж служит компенсатором синхронизации ритма потока между первым и вторым рабочим местом. Передача «гребенки» на вто-

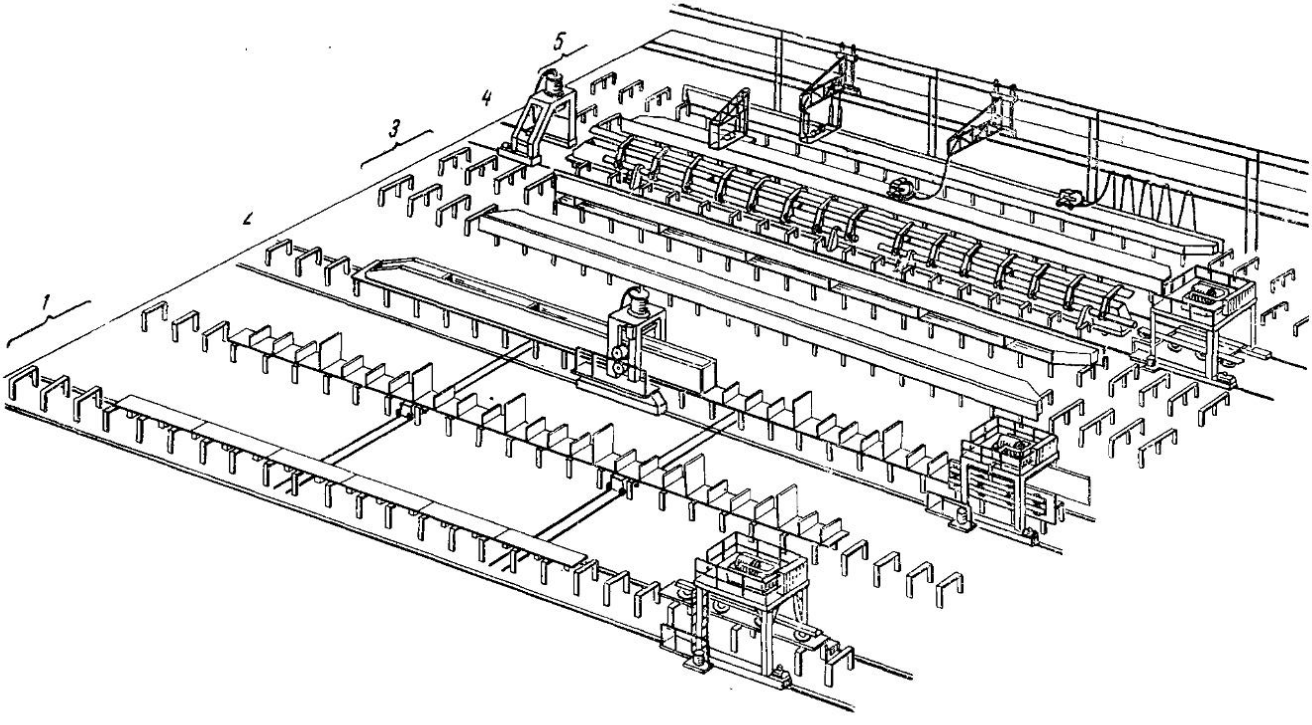


Рис. 16-36. Общий вид сборочно-сварочного участка изготовления балок мостовых кранов

рое рабочее место осуществляется также с помощью тележек и склизов.

Второе рабочее место — сборка листов вертикальных стенок и прихватка их к диафрагмам и поясу.

Стенд для сборки состоит из опорных стоек, на их поверхности закрепляются прокладки различных толщин. Это позволяет задавать верхнему поясу прогиб, равный строительному подъему пролетной балки. При сборке этот предварительный выгиб пояса закрепляется установкой боковых листов, раскрой которых также учитывает требуемый строительный подъем.

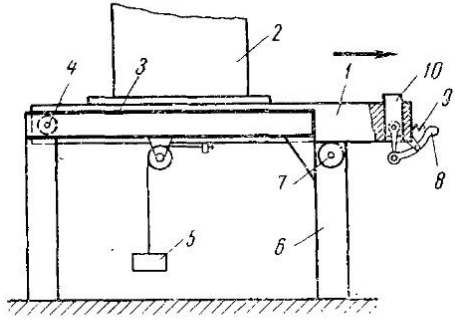


Рис. 16-37. Механизм склиза

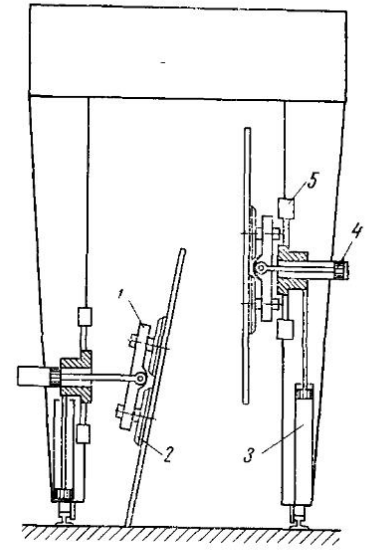


Рис. 16-38. Самоходный транспортирующий портал

Транспортировка и установка листов стенок выполняется самоходным порталом (рис. 16-38), передвигающимся по рельсам от места комплектации заготовок вдоль сборочного стенда. Две траверсы *1* с вакуумными захватами *2* закреплены шарнирно и гидроцилиндрами *4* могут перемещаться в горизонтальном направлении. Кроме того, гидроцилиндры *3* с вертикальными направляющими *5* позволяют опускать траверсу для захвата листа на складе заготовок и поднимать для установки его на место сборки. Листы крепят снизу скобами-ловителями, а сверху — накидными захватами, закрепляемыми на диафрагмах. Затем транспортирующий портал возвращается за следующей парой листов.

По мере установки элементов стенок производится их сборка и прихватка. Для этого используют второй самоходный портал, несущий пневматические прижимы. По тем же рельсам сборочный портал подводится к вертикальным листам, установленным первым порталом. Включением пневмоцилиндров листы одно-

временно прижимаются к диафрагмам и верхнему поясу, и собранное сечение закрепляется прихватками. Затем прижимы выключаются, портал перемещается на расстояние между диафрагмами и цикл повторяется.

Третье рабочее место — сварка стыковых швов вертикальных стенок изнутри и приварка их к диафрагмам (см. рис. 16-36).

Это рабочее место состоит из двух стендов. Передача балки со второго рабочего места на третье осуществляется с одновременной кантовкой балки на 90° специальным четырехкрюковым краном — кантователем. После сварки одной стенки поворот на 180°, а также передача балки на четвертое рабочее место выполняются этим же краном. Наличие второго стенда компенсирует нарушения ритма потока между третьим и четвертым рабочими местами.

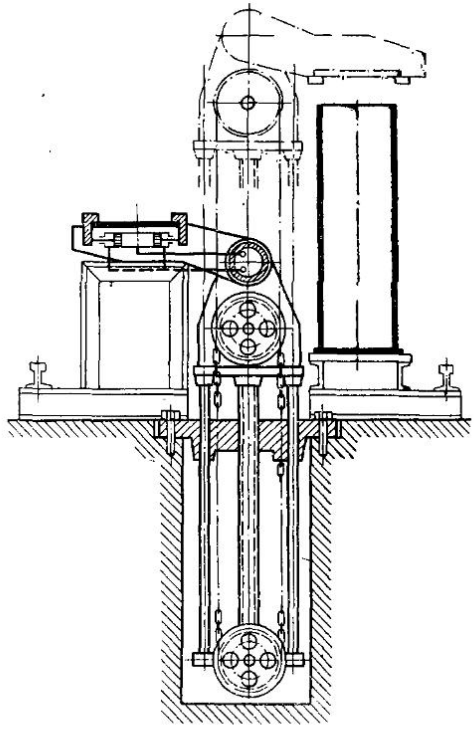


Рис. 16-39. Кантователь нижнего пояса

Четвертое рабочее место — сборка и сварка нижнего пояса, установка его на балку, гибка концов по скосам вертикальных стенок. В соответствии с этим рабочее место состоит из стенда сборки и сварки нижнего пояса, кантователя и стенда установки нижнего пояса на балку (см. рис. 16-36).

Основными узлами стенда для сборки и сварки нижнего пояса являются стойки со свободно вращающимися роликами и две флюсомагнитные подушки. Как и на первом рабочем месте, листы нижнего пояса подаются и раскладываются самоходным порталом, сварка с одной стороны производится полуавтоматом.

Для установки пояса на балку используется оригинальный кантователь, расположенный в приямке между стендами (рис. 16-39). Кантователь имеет рычаги с пневмозахватами и механизмы подъема и поворота, его кинематическая схема показана

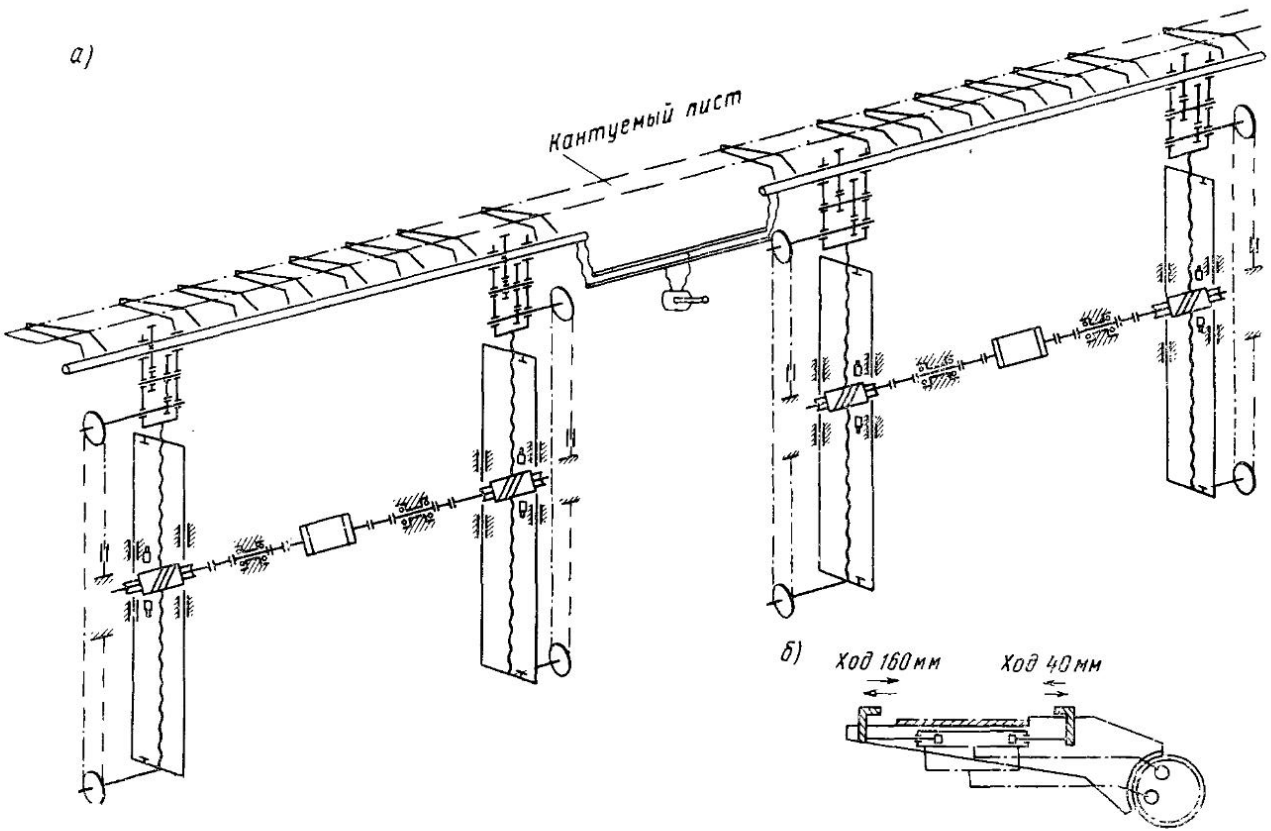


Рис. 16-40. Кинематическая схема кантователя нижнего пояса

на рис. 16-40, *а*. В исходном положении рычаги кантователя располагаются под сваренным поясом на уровне роликов стенда. Гибкий пояс закрепляется на рычагах включением пневмозахватов (рис. 16-40, *б*). Подъем производится ходовыми винтами с помощью гаек, вращаемых червячными парами от электродвигателей. В результате неподвижного закрепления концов цепей подъем пояса сопровождается его поворотом из-за вращения звездочек.

Перед установкой нижнего пояса необходимо выправить гофры, образующиеся на вертикальных листах в процессе сварки их стыков и приварки к диафрагмам. Для этого расположенные на тележках гидродомкраты подводятся к концам балки и, нажимая на верхний пояс, прогибают балку до полной выборки ее строительного подъема. При этом кромка вертикальной стенки оказывается растянутой в упругой области и гофры устраняются. Затем самоходным порталом с вертикальными пневмоцилиндрами пояс прижимается к балке и его прихватывают. Этим же порталом производится гибка концов пояса по скосам вертикальных стенок. После прихватки нижнего пояса и освобождения балки от закрепления строительный подъем восстанавливается, но гофры не возникают. Сварка стыковых швов пояса с внешней стороны выполняется полуавтоматом.

Пятое рабочее место — автоматическая сварка наружных продольных и поперечных швов. На два стенда этого рабочего места балки подаются четырехкрюковым краном-кантователем.

Подача тракторов к месту сварки продольных швов осуществляется самоходными консолями, перемещающимися по направляющим вдоль колонн цеха (см. рис. 16-36). Консоль имеет и механизм подъема, который позволяет устанавливать сварочный трактор на балку или убирать его после окончания сварки. Управление движением консолей осуществляется с кнопочного пульта, смонтированного на сварочном тракторе. Сварка поясных продольных швов выполняется наклоненным электродом при движении трактора непосредственно по балке.

Для сварки поперечных швов стенок используется самоходная тележка, перемещающаяся между двумя стендами. На поворотной консоли этой тележки смонтированы подвесные направляющие для сварочного трактора. Механический привод вертикального перемещения обеспечивает установку направляющих трактора по высоте в соответствии с размером свариваемой балки.

§ 5. ПРИЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ СТЫКОВ БАЛОК

Сварные стыки двутавровых балок могут быть совмещенные, раздвинутые и со вставками (см. рис. 14-15, *а, б, в*). Последний тип соединения применяется сравнительно редко, технология

его выполнения была рассмотрена ранее (см. рис. 16-34). Обычно в условиях монтажа используют совмещенный стык, выполняемый ручной сваркой. При этом последовательность сварки стыковых швов пояса и стенки может быть различной.

Если в первую очередь сварить стыки поясов, то стык стенки придется выполнять в условиях жесткого закрепления, что при неблагоприятных условиях может способствовать образованию трещин в процессе сварки. При другой последовательности, когда стык стенки сваривают первым, в стыках поясов от поперечной усадки возникает высокий уровень остаточных напряжений растяжения, что может способствовать снижению усталостной прочности балки.

С целью облегчить условия сварки стыка балки участки поясных швов на длине L (рис. 16-41) иногда не доваривают, выполняя их после сварки стыковых швов. Так как поперечная усадка шва, свариваемого последним, будет в этом случае восприниматься элементом длиной L, то величина остаточных напряжений окажется меньше, чем при жестком закреплении. Однако для элементов, сваренных в первую очередь, увеличение свободного от закрепления участка L способствует появлению коробления из-за потери устойчивости под напряжениями сжатия. Поэтому для каждого конкретного случая в зависимости от ряда факторов (свариваемости, условий работы стыка балки в конструкции, размеров поперечных сечений элементов и т. п.) оптимальная технология выполнения стыка может быть различной.

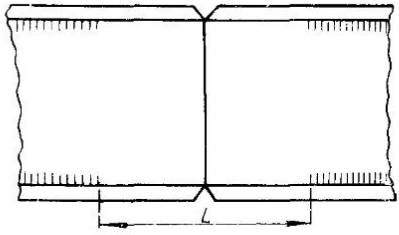


Рис. 16-41. Собранный под сварку стык двутавровой балки

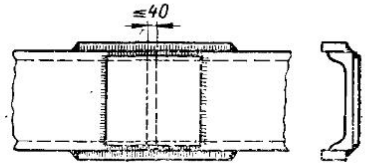


Рис. 16-42. Соединение прокатных профилей с накладками

Непосредственное соединение встык дуговой сваркой с полным проплавлением всего сечения сварных или прокатных профильных элементов требует высокой квалификации сварщика и тщательного контроля.

При изготовлении конструкций, работающих под статической нагрузкой, такой тип соединения используется не всегда. Часто применяют соединения с накладками, приваренными к соеди-

няемым элементам угловыми швами (рис. 16-42). Такое соединение технологически проще, хотя и требует дополнительного расхода металла. Для конструкций, работающих под вибрационной нагрузкой, соединения с накладками непригодны.

Иногда монтажные соединения собирают на болтах в целях их разборки в случае необходимости. При этом обычно используют вспомогательные элементы — накладки, совпадение отверстий достигается сверлением по кондуктору. Примером такого соединения может служить монтажный стык концевой балки моста крана. Каждая из заготовок полок и стенок концевой балки составляется из двух частей, соединенных накладками на прихватках и совместно просверленных по кондуктору. Сваренная из составных заготовок балка поступает на общую сборку. После окончания сварки моста крана прихватки накладок монтажного стыка отбиваются, и обе половины моста разъединяются для транспортировки к месту монтажа.

ГЛАВА XVII

СВАРНЫЕ РАМЫ

Рамы входят в состав различных машин и конструкций: станков, вагонов, крановых тележек, фундаментов, кузнечно-прессовых и прокатных машин, автомобилей, тракторов и др., в металлические конструкции зданий.

Рамы и станины служат для связи в одно целое отдельных частей механизма или станка. Они должны обеспечивать необходимую жесткость и прочность конструкции и удовлетворять требованию рациональной компоновки изделия. При расчетах на прочность рамы и станины представляют собой системы соединенных балок.

§ 1. ТИПЫ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ РАМЫ

Соединения элементов, составляющих рамы, выполняются жесткими, частично жесткими, а в отдельных случаях нежесткими (шарнирными). Абсолютно жестких и идеально нежестких соединений не существует. Каждое соединение является частично жестким. Однако в зависимости от степени приближения соединения к абсолютно жесткому или нежесткому их условно рассматривают как жесткие и шарнирные.

Отнесение к категории жесткого, частично жесткого или шарнирного соединения зависит от способа конструктивного оформления и от общей расчетной схемы конструкции. Поясним сказанное следующими примерами.

1. Балка большого пролета с малым моментом инерции поперечного сечения относительно горизонтальной оси крепится к двум коротким стойкам, обладающим большой жесткостью в плоскости изгиба (рис. 17-1, *а*).

Элемент работает под нагрузкой, как брус с защемленными концами; защемление рассматривается как жесткое соединение.

2. Короткая и жесткая балка прикреплена к длинным стойкам, имеющим малые моменты инерции поперечных сечений

в плоскости изгиба. При любой конструкции соединения брус работает, как свободно опертый по концам, так как шарнирность создается гибкостью стоек (рис. 17-1, *б*). В этом случае соединение балки со стойками является шарнирным.

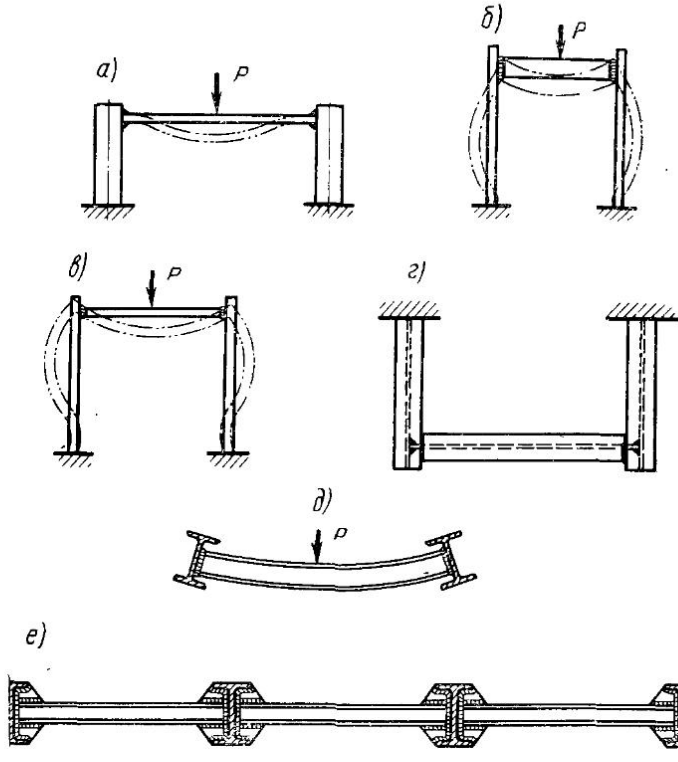


Рис. 17-1. Схема сопряжений балок в раме:

а) балка, защемленная на опорах; *б*) балка с шарнирными опорами; *в*) жесткость определяется статическим расчетом рамы; *г*, *д*) соединения приближаются к шарнирным; *е*) соединения на крайних опорах приближаются к шарнирным, соединения на средних опорах приближаются к жестким

3. При различных соотношениях между жесткостями соединяемых элементов конструкция, изображенная на рис. 17-1, *в*, работает под нагрузкой, как рама. Необходимо произвести ее статический расчет прочности. Изгибающие моменты и поперечные силы являются расчетными усилиями при проверке прочности соединения.

4. Балка (рис. 17-1, *г*), соединенная с двумя другими, имеет частично шарнирные соединения. Величины изгибающего момента соединения зависят от соотношения между жесткостью при изгибе средней балки и жесткостью при кручении крайней (рис. 17-1, *д*). При жесткой средней балке и маложестких крайних изгибающий момент в соединении мал; напротив, он приобретает заметную величину при жестких крайних балках и гибкой средней.

5. Конструкция, изображенная на рис. 17-1, *е*, представляет собой неразрезную многоопорную балку. На средних опорах образуются изгибающие моменты; соединения работают, как жесткие. В крайних опорах изгибающие моменты отсутствуют, сопряжения работают, как шарнирные.

Раньше, чем приступить к проектированию соединения элементов, необходимо произвести его статический расчет. В тех случаях, когда нужно сделать выбор между жесткими и шарнирными соединениями, следует иметь в виду следующие обстоятельства:

а) жесткие соединения требуют наложения бо́льшего количества швов;

б) жесткие соединения повышают жесткость всей конструкции, а также ее устойчивость; например, прогиб балки, свободно опертой на опоры, значительно больше, чем той же балки, у которой концы защемлены;

в) жесткие соединения повышают степень статической неопределимости системы, что в ряде случаев оказывается целесообразным; например, в балке при шарнирных опорах и равномерной нагрузке расчетный изгибающий момент $M = \frac{ql^2}{8}$, а в балке с защемленными концами при том же нагружении $M = \frac{ql^2}{12}$.

В сварных конструкциях наиболее часто применяют соединения жесткого типа. Расчетным усилием для них, как правило, является изгибающий момент. Если момент не может быть определен на основе статического расчета, то соединение целесообразно конструировать равнопрочным основным сечениям изгибаемых элементов. При этом расчетный момент равен

$$M = [\sigma]_p W, \qquad (17.1)$$

где W — момент сопротивления поперечного сечения прикрепляемого элемента;

$[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение.

Условие прочности сопряжений можно записать различными способами, необходимо только выразить условие, что сумма моментов внутренних сил, допускаемых при расчете прочности соединения, равна или больше расчетного момента M.

§ 2. СОЕДИНЕНИЯ БАЛОК В РАМАХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСИЛЕНИЯМИ

Конструкции соединений двутавровых балок показаны на рис. 17-2.

Иногда балки небольшой высоты прикрепляют к высокой путем обваривания по периметру поперечного сечения угловыми

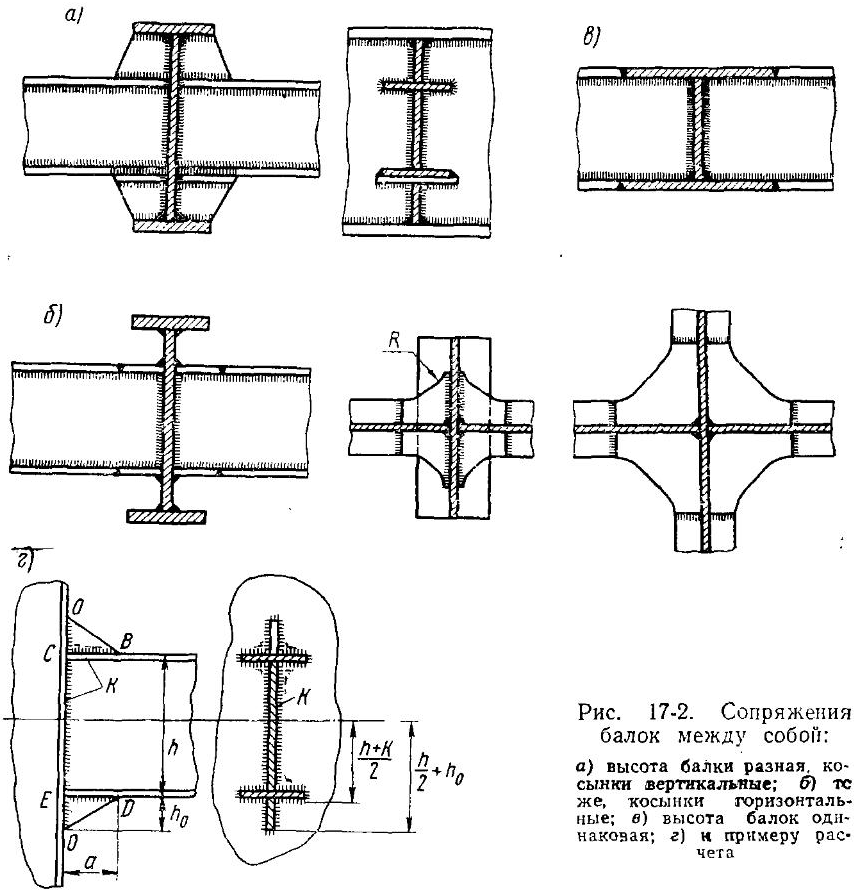


Рис. 17-2. Сопряжения балок между собой:

а) высота балки разная, косынки вертикальные; *б)* то же, косынки горизонтальные; *в)* высота балок одинаковая; *г)* к примеру расчета

швами. В этом случае рационально усилить соединение балок косынками трапецеидального очертания, как указано на рис. 17-2, *а*. Толщины косынок и вертикальной стенки, как правило, равны; остальные размеры стенки устанавливаются с учетом требований жесткости соединения и прочности швов

прикрепления. Подобная конструкция может быть рекомендована при статических нагрузках.

На рис. 17-2, *а* предусмотрена опора в виде столика. Подобного рода опоры очень облегчают монтаж балок.

Основную долю момента M воспринимают швы, обваривающие поперечное сечение по периметру

$$M_{\text{п}} = \tau \frac{J_{\text{п}}}{y_{\max}}, \qquad (17.2)$$

где $J_{\text{п}}$ — момент инерции периметра шва с учетом его ширины, равной $0{,}7\,\kappa$;

$y_{\max}$ — расстояние от оси прикрепляемой балки до крайнего волокна шва.

Косынки дополнительно повышают прочность и жесткость соединения.

Рассмотрим расчет на прочность усиленного косынкой прикрепления балки, работающей на изгиб (рис. 17-2, *г*). При этом целесообразно сделать две проверки прочности.

Первую проверку производят по сечению *ОО*; в рабочую площадь швов следует включить швы, обваривающие по периметру двутавровый профиль и вертикальные участки швов длиной h_0. Момент инерции швов равен

$$J = J_{\text{п}} + 4\left[\frac{h_0^3\, 0{,}7\,\kappa}{12} + h_0 0{,}7\,\kappa\,\left(\frac{h_0}{2} + \frac{h}{2}\right)^2\right],$$

где $J_{\text{п}}$ — момент инерции швов, обваривающих двутавр по контуру.

Напряжение в швах

$$\tau = \frac{M}{J} \cdot y_{\max} \text{ должно быть} \leqslant [\tau'],$$

$$\text{где } y_{\max} = \frac{h}{2} + h_0.$$

Вторую проверку надлежит сделать с учетом возможного разрушения по ломаной линии *BCED*. Момент инерции швов при проверке прочности этого сечения равен

$$J = J_{\text{п}} + 4a\, 0{,}7\,\kappa\,\left(\frac{h}{2} + \frac{\kappa}{2}\right)^2.$$

Напряжение в швах

$$\tau = \frac{M}{J} \cdot y_{\max} \text{ должно быть} \leqslant [\tau'],$$

где $y_{\max} = \dfrac{h + \kappa}{2}$.

Прочность с учетом разрушения по линии *BCED* можно определить и по способу расчленения соединения на составляющие: швы, обваривающие периметр, и горизонтальные швы длиной *a*, в которых образуется пара сил, уравновешивающая в некоторой части момент *M*.

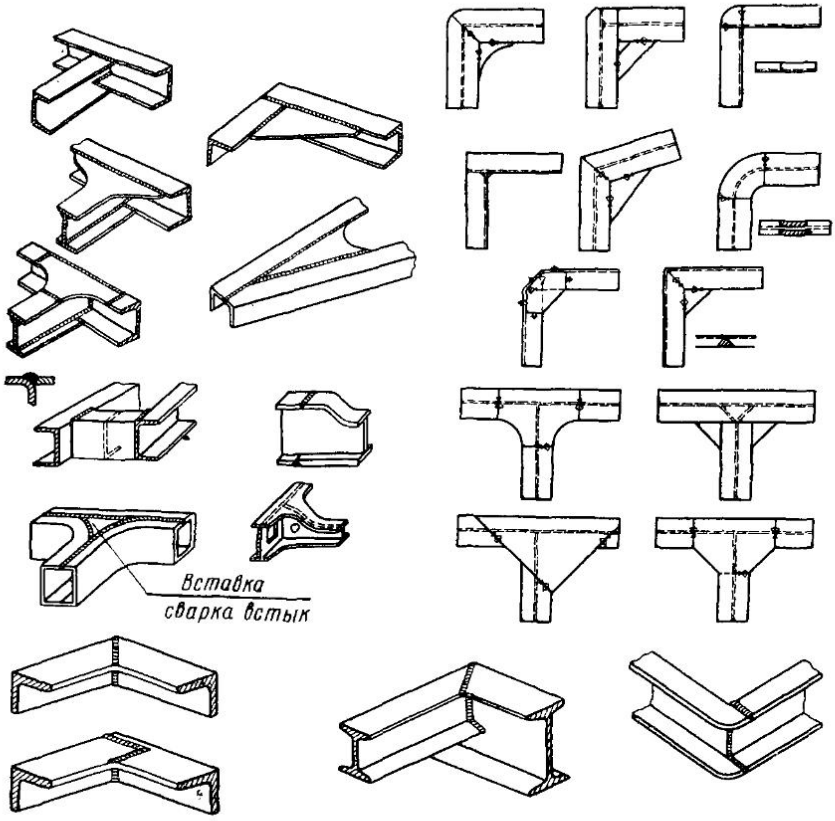


Рис. 17-3. Сопряжения балок разного профиля

В этом случае

$$M = M_{\text{п}} + M_{\text{г. шв}} = \tau \cdot \frac{J_{\text{п}}}{y_{max}} + \\ + 4\tau\, 0{,}7\, ka \left(\frac{h}{2} + \frac{\kappa}{2}\right).$$

Откуда

$$\tau = \frac{M}{\frac{J_{\text{п}}}{y_{max}} + 4 \cdot 0{,}7\ ka \left(\frac{h+\kappa}{2}\right)} \text{ должно быть} \leqslant [\tau'].$$

Для сварного соединения балок, воспринимающих переменные нагрузки, более рационален тип конструкции, приведенный на рис. 17-2, *б*. Увеличением длины шва можно значительно повысить несущую способность конструкции, а устройством выкружек с радиусом R — достигнуть снижения концентраторов напряжений. Расчет соединений элементов при этом следует производить при значении $K_э = 2$ с учетом γ [см. формулу (10.6) и табл. 10.11]. Соединения встык в ответственных конструкциях необходимо механически обработать.

Для соединений балок одинаковой высоты, воспринимающих

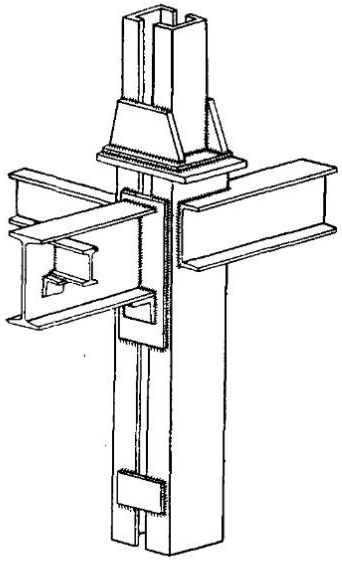


Рис. 17-4. Жесткое сопряжение балки со стойкой

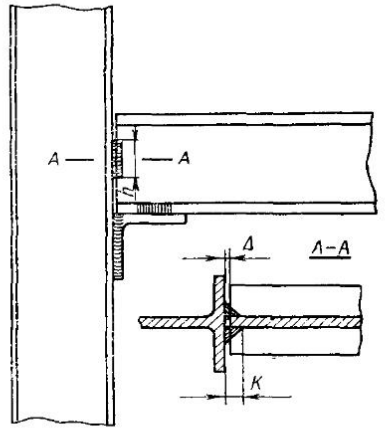


Рис. 17-5. Сопряжение шарнирного типа балки со стойкой

статические и переменные нагрузки, может быть рекомендована конструкция (рис. 17-2, *в*), которая обеспечивает жесткость, устраняет концентраторы напряжений и позволяет накладывать швы в требуемом количестве.

На рис. 17-3 показаны примеры соединений швеллеров, двутавров и уголков. Узлы сконструированы с применением фигурной резки. Во всех случаях при работе балки на изгиб соблюдается следующее условие прочности: момент внутренних сил относительно центра тяжести соединения равен расчетному моменту.

§ 3. СОЕДИНЕНИЯ БАЛОК СО СТОЙКАМИ

На рис. 17-4 приведено сварное соединение балки со стойкой. Оно выполнено обваркой по периметру поперечного сечения балки и установкой уголка и является типовым.

На рис. 17-5 приведен пример сопряжения балки двутаврового профиля со стойкой с помощью коротких вертикальных швов. Между полками балки и стойкой оставлены небольшие зазоры $\Delta = 1 \div 2$ *мм*, которые обеспечивают шарнирность соединения. При этом волокна, наиболее удаленные от нейтральной оси, могут свободно деформироваться. Расчет прочности такого вида сопряжений производят на поперечную силу. Эти соединения применяют в США. У нас их используют редко ввиду недостаточно надежного характера работы.

§ 4. ТОЧЕЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ РАМ, РАБОТАЮЩИХ НА ИЗГИБ

Пример точечного соединения, работающего на изгиб, приведен на рис. 17-6, *а*. Изгибающий момент уравновешивается парой сил T, возникающих в точках.

Усилие в каждой точке

$$T = \frac{M}{h}. \tag{17.3}$$

Напряжение в точке

$$\tau = \frac{T}{F} = \frac{4M}{h\pi d^2}, \tag{17.4}$$

где h — расстояние между центрами точек;

d — диаметр точки.

Пример точечного соединения, работающего на поперечный изгиб, приведен на рис. 17-6, *б*. В соединениях возникают:

изгибающий момент

$$M = Pl; \tag{17.5}$$

поперечная сила

$$Q = P; \tag{17.6}$$

усилие от момента

$$T_M = \frac{M}{h}.$$

Напряжение в точке от изгибающего момента

$$\tau_M = \frac{4M}{h\pi d^2}.$$

Усилие в точке T_Q от поперечной силы Q, равной P, определяется в предположении равномерного распределения усилий между точками, входящими в соединения,

$$T_Q = \frac{Q}{2}.$$

Напряжение в точке от Q

$$\tau_Q = \frac{2Q}{\pi d^2},$$

где τ_M направлено горизонтально, τ_Q — вертикально.

Результирующее напряжение в точке определяется по формуле

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_Q^2} \leqslant |\tau'|. \qquad (17.7)$$

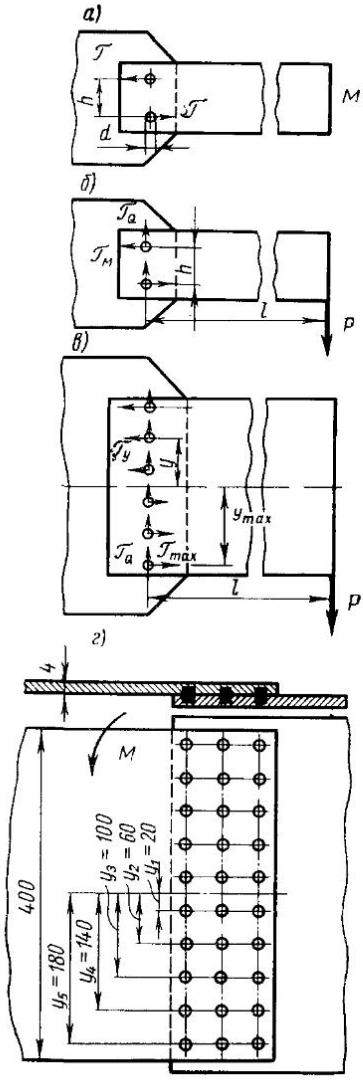


Рис. 17-6. Точечные соединения, работающие на M и Q

Более сложная конструкция точечного соединения приведена на рис. 17-6, *в*. Принимаем, что распределение напряжений в сечении от изгибающего момента происходит по линейному закону. При этом распределение усилий между точками неравномерное; наиболее напряженными в соединении оказываются крайние точки.

В силу линейного закона распределения напряжений

$$\tau_y = \tau_1 y,$$

где τ_y — напряжение в точке, находящейся на расстоянии y от нейтральной оси элемента;

τ_1 — напряжение на расстоянии, равном единице от нейтральной оси.

Момент внутренних сил, возникающих в точках, уравновешивает внешний момент

$$m = \tau_y \frac{\pi d^2}{4} y. \qquad (17.8)$$

Полная величина изгибающего момента равна

$$M = \Sigma \tau_y \frac{\pi d^2}{4} y. \qquad (17.9)$$

Заменяя τ его значением $\tau_1 y$, находим изгибающий момент

$$M = \tau_1 \frac{\pi d^2}{4} \Sigma y^2, \qquad (17.10)$$

откуда

$$\tau_1 = \frac{4M}{\pi d^2 \Sigma y^2}. \qquad (17.11)$$

Напряжение в точке, наиболее удаленной от нейтральной оси, определяется по формуле

$$\tau_{max} = \frac{4M}{\pi d^2 \Sigma y^2} y_{max}. \qquad (17.12)$$

Напряжение, вызванное поперечной силой, равно

$$\tau_Q = \frac{4Q}{n\pi d^2}, \qquad (17.13)$$

где n — количество односрезных точек в вертикальном ряду.

При наличии i вертикальных рядов точек напряжение от изгиба будет

$$\tau_{max} = \frac{4M}{i\pi d^2 \Sigma y^2} y_{max}, \qquad (17.14)$$

а напряжение от Q

$$\tau_Q = \frac{4Q}{in\pi d^2}. \qquad (17.15)$$

Результирующее напряжение должно быть

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_{max}^2 + \tau_Q^2} \leqslant [\tau']. \qquad (17.16)$$

Пример расчета. Требуется сконструировать крепление листа сечением 400×4 *мм*, равнопрочное по изгибу основному элементу (рис. 17-6, *г*). Нагрузка статическая.

Изгибающий момент, воспринимаемый основным листом, равен

$$M = [\sigma]_p W = \frac{[\sigma]_p sh^2}{6} = \frac{[\sigma]_p 0{,}4 \cdot 40^2}{6} =$$
$$= 106{,}6\,[\sigma]_p \ кГ \cdot см.$$

Диаметр сварной точки принимаем равным

$$d = 1{,}5s + 5 = 11 \ мм.$$

Расстояние между односрезными точками при толщине листа 4 *мм* принимаем 4 *см*. Расстояние точек до оси $y_1 = 2$ *см*, $y_2 = 6$ *см*; $y_3 = 10$ *см*; $y_4 = 14$ *см*; $y_5 = 18$ *см*.

Число рядов точек (рис. 17-6, *г*), равное *3*, обозначим через i.

Из формулы (17.14) находим i, заменяя τ_{max} через $[\tau']$,

где $[\tau'] = 0{,}5\,[\sigma]_р$;

$$\Sigma y^2 = (2^2 + 6^2 + 10^2 + 14^2 + 18^2) \cdot 2 = 1320\ см^2.$$

Определим число рядов

$$i = \frac{4 \cdot 106{,}6\,[\sigma]_р \cdot 18}{3{,}14 \cdot 1{,}1^2 \cdot 1320 \cdot 0{,}5\,[\sigma]_р} = 2{,}98.$$

Принимаем три вертикальных ряда точек.

§ 5. СВАРНЫЕ РАМЫ И СТАНИНЫ

Простейшая конструкция рамы, спроектированная из уголков и швеллеров, приведена на рис. 17-7. Для увеличения жесткости

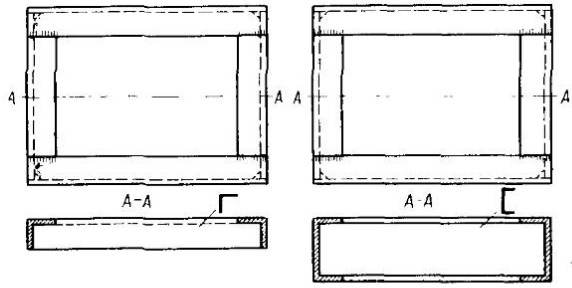


Рис. 17-7. Легкие сварные рамы из уголков и швеллеров

рам в горизонтальной плоскости рекомендуется предусматривать постановку распорок из швеллеров, уголков и т. п.

В целях повышения жесткости целесообразно применять для легких рам тонкостенные гнутые и штампованные уголки, швеллеры, U-образные и другие профили. Для соединения указанных элементов применяют не только дуговую, но и контактную сварку.

Пример расчета. Требуется определить прочность рамы (рис. 17-8, *а*) при следующих условиях: средние поперечные балки *2* пролетом $l = 1{,}0$ *м* двутаврового профиля нагружены по длине равномерной нагрузкой $q = 6{,}0$ *Т/м* (рис. 17-8, *б*); собственным весом балок пренебрегаем. Продольные балки имеют коробчатое сечение. Они обладают большой жесткостью на кручение. Поэтому поперечные балки можно считать защемленными в продольных.

Опорный момент балки, защемленной двумя концами, равен

$$M = \frac{ql^2}{12} = \frac{6{,}0 \cdot 1^2}{12} = 0{,}5 \ T \cdot м = 50\,000 \ кГ \cdot см.$$

Момент инерции поперечной балки по сечению *Б—Б* составит

$$J = \frac{20^3 \cdot 1}{12} + 2\left(16 \cdot 1 \cdot 10{,}5^2 + \frac{1^3 \cdot 16}{12}\right) = 4197 \ см^4.$$

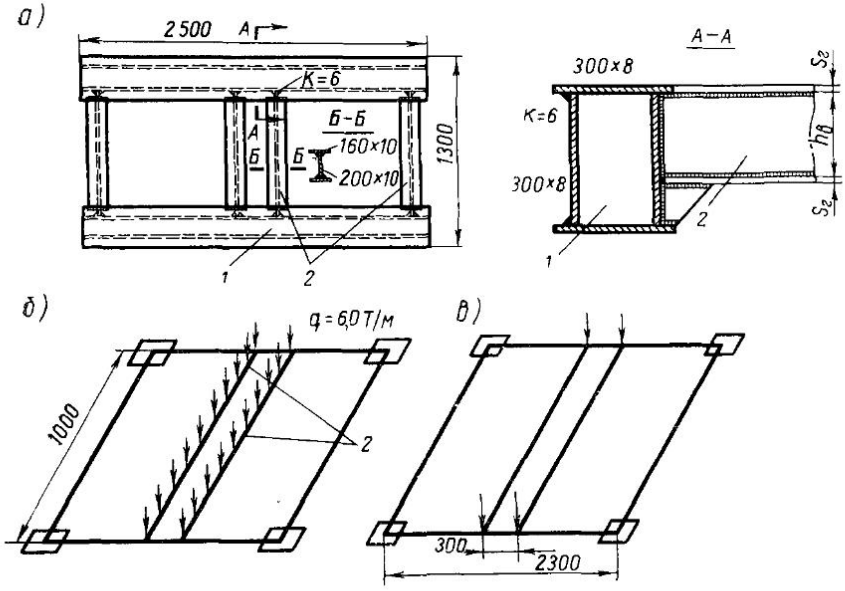


Рис. 17-8. К примеру расчета прочности сварной рамы:

а) конструкция рамы; *б*) схема нагружения поперечной балки; *в*) схема нагружения продольных балок (боковин)

Момент сопротивления поперечной балки

$$W = \frac{4197}{11} = 381 \ см^3.$$

Напряжение в поперечной балке равно

$$\sigma = \frac{50\,000}{381} = 131 \ кГ/см^2.$$

Поперечная сила в балке равна

$$Q = \frac{ql}{2} = \frac{6{,}0 \cdot 1}{2} = 3{,}0 \ T.$$

Статический момент горизонтального листа относительно центра тяжести сечения равен

$$S = 16 \cdot 1 \cdot 10{,}5 = 168 \ см^3.$$

Касательные напряжения в поясных швах поперечной балки у опоры с катетом $к = 6$ *мм* равны

$$\tau = \frac{QS}{J \cdot 2 \cdot 0{,}7к} = \frac{3000 \cdot 168}{4197 \cdot 2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}6} = 143 \ кГ/см^2.$$

Прикрепление поперечных балок к продольным спроектировано следующим образом. Кромки горизонтальных листов поперечной балки скошены и приварены встык. Вертикальная стенка обварена угловыми швами с катетом $к = 6$ *мм*. В прикреплении предусмотрена косынка, показанная на рис. 17-8, *а*. При определении напряжений учитываем в соединении только стыковые и вертикальные угловые швы. Швы, приваривающие косынки, в учет не принимаем. Момент, воспринимаемый парой стыковых горизонтальных швов, определяется по формуле

$$M_{ст} = \sigma F_г (h_в + s_г), \tag{17.17}$$

где σ — напряжение в горизонтальном листе двутавровой балки;

$F_г$ — площадь горизонтального листа двутавровой балки;

$h_в + s_г$ — плечо пары.

Момент, воспринимаемый двумя вертикальными угловыми швами, равен

$$M_в = 2\tau \ \frac{0{,}7 \, к h_в^2}{6}. \tag{17.18}$$

Расчетный момент вычисляется по формуле

$$M = \sigma F_г (h_в + s_г) + 2\tau \frac{0{,}7 \, к h_в^2}{6}. \tag{17.19}$$

Примем в запас прочности, что σ численно равно τ.

При этом касательное напряжение

$$\tau = \frac{M}{F_г (h_в + s_г) + \dfrac{2 \cdot 0{,}7 \, к h_в^2}{6}} =$$

$$= \frac{50\,000}{16 \cdot 1 (20 + 1) + \dfrac{2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}6 \cdot 20^2}{6}} = 127 \ кГ/см^2. \tag{17.20}$$

Продольные балки рассчитывают по схеме рис. 17-8, *в*.

При больших сечениях элементов рам их конструируют из листового металла. На рис. 17-9 показана рама тележки вагона. Конструкция рамы представляет собой Н-образную систему из вертикальных листов, соединенных с горизонтальными листами. В конструкции достигнуто плавное соединение балок между собой.

Определяют усилия и напряжения от заданных нагрузок в основных элементах рам. Сварные швы встык, сваренные

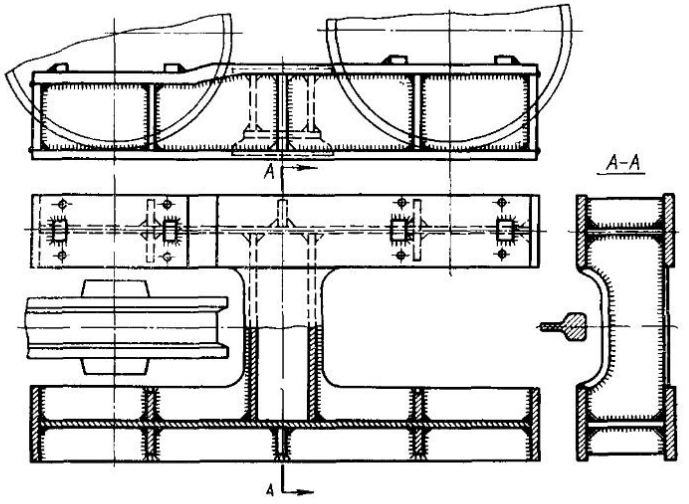


Рис. 17-9. Сварная рама тележки вагона

дугой и электрошлаковой сваркой, испытывают те же напряжения, что и основная конструкция.

§ 6. РАМЫ ПОД ДВИГАТЕЛИ

На рис. 17-10 приведен пример сварной рамы под двигатель. Основные двутавры соединены поперечными меньшего профиля. Соединения поясов сварены встык. Соединения рассчитываются, как жесткие, с учетом требования равнопрочности основному металлу при работе на изгиб.

Автомобильные рамы изготавливают из штампованных элементов, которые соединяют тонкими швами, уложенными

дуговой сваркой. Несмотря на вибрационный характер нагрузок, в раме имеется значительное количество соединений с угловыми швами, что может снизить долговечность. Коробчатые профили обеспечивают хорошее сопротивление кручению и изгибу.

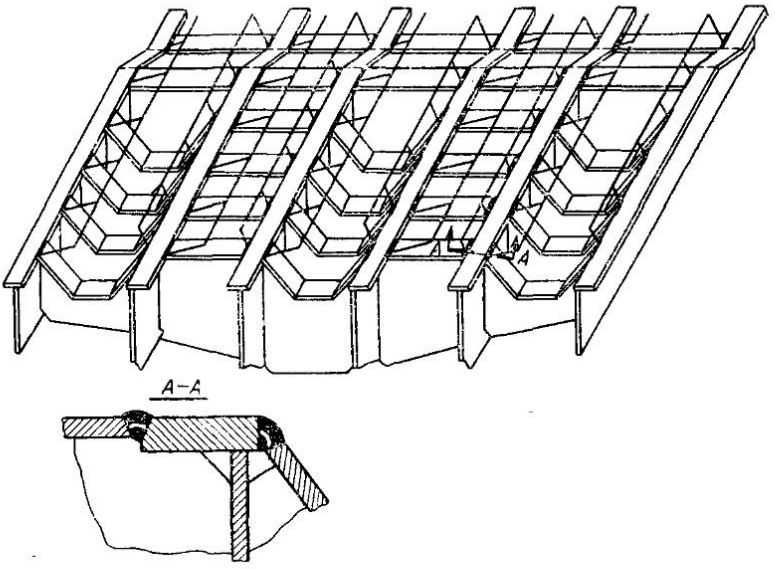


Рис. 17-10. Сварная рама под двигатель внутреннего сгорания

§ 7. ИЗГОТОВЛЕНИЕ РАМ

При разработке технологии изготовления рамных конструкций существенным является оптимальный выбор последовательности сборочно-сварочных операций. Полное завершение сборки до начала сварки часто оказывается нецелесообразным. Так, например, рама тележки мостового крана (рис. 17-11) представляет собой объемную конструкцию с большим количеством деталей. Для нее удобно применить поузловую сборку и сварку с последующей общей сборкой. Технологическими узлами в этом случае являются балки: редукторная *1*, моторная *4*, механизма передвижения *6*, средняя *3* и вспомогательная *2* и стенки блоков *5*. Процесс поузловой сборки показан на рис. 17-12, *а*, *б*, *в*, *г*, *д*.

Сборочная оснастка весьма разнообразна. В случае малой повторяемости изделий для сборки может эффективно использоваться универсальный сборочный стенд и передвижной портал с пневмозажимами (рис. 17-13). Перенастройка обеспечивается

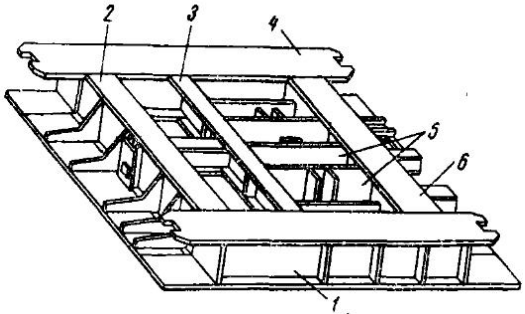


Рис. 17-11. Рама тележки мостового крана

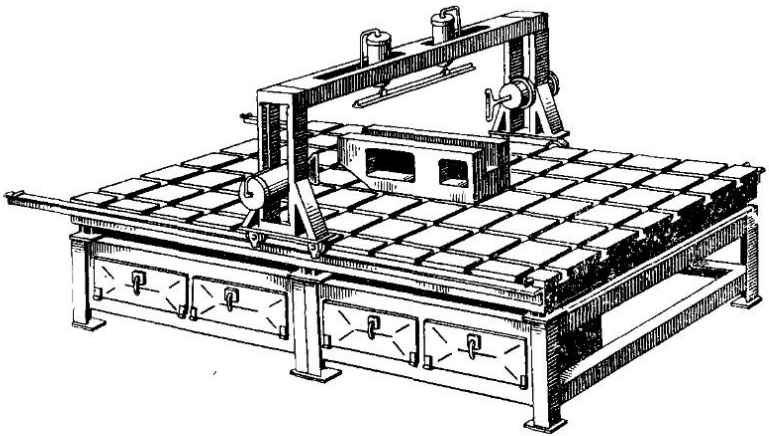


Рис. 17-13. Универсальный стенд для сборки узлов в мелкосерийном и индивидуальном производстве

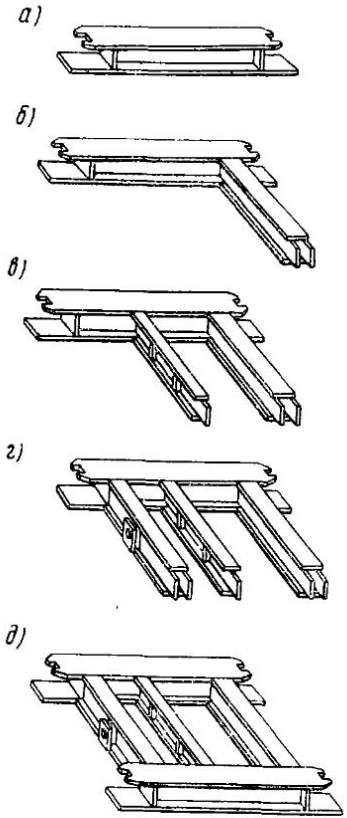


Рис. 17-12. Процесс поузловой сборки рам тележек мостового крана

установкой различных фиксаторов, упоров и прижимов на плите стенда.

Требования к точности сборки определяются техническими условиями и припусками на механическую обработку и могут быть весьма жесткими. Примером этому может служить нижняя рама экскаватора, представляющая собой закрытую со всех сторон коробку с жесткой внутренней решеткой из пересекающихся листов и нескольких деталей: центральной цапфы *1*, подшипников *2*, картера *3* (рис. 17-14). Эти детали из литья и поковок поступают на сборку после предварительной механической обработки и имеют припуск на окончательную обработку после сварки.

Положение вертикальных листов задается прижатием их к базовым стойкам *4*, установленным на опорной плите сборочного стенда (рис. 17-14, *а*). При выборе расположения таких стоек следует иметь в виду возможность поводки собранной конструкции при прихватке. Поэтому опорные стойки *4* должны располагаться так, чтобы после завершения сборки и освобождения от закреплений имелась возможность смещения собранной рамы по диагонали стенда. Прижатие вертикальных листов может осуществляться наклонными ребрами *5* на уровне опорной плиты и клиньями *6* поверху (рис. 17-14, *б*). Вварные детали фиксируются по предварительно обработанным поверхностям оправками. Закрепление деталей с помощью клиньев и оправок и последующее освобождение от них собранной рамы требует значительных затрат времени и ручного труда. Более эффективны приспособления, использующие для прижатия листов пневмоцилиндры, а для центровки предварительно обработанных деталей — оправки с кулачками, разжимаемыми клином с помощью винта или пневмоцилиндра.

Порядок сборки следующий: на стенд устанавливается картер *3*, его расположение центрируется сквозной оправкой. Между стойками закладываются все вертикальные листы рамы, прижимаются к опорным стойкам и прихватываются друг к другу тремя-четырьмя прихватками длиной 50—70 *мм* швом с катетом 8 *мм*. Затем в диафрагмах устанавливают литые подшипники, верхний настил и по отверстию центрируют верхнюю центральную цапфу. После прихватки рама освобождается от закреплений и снимается со стенда.

Сварочные операции выполняют в два приема: сначала сваривают решетку после сборки ее с первым настилом и затем окончательно сваривают после закрытия вторым настилом и установки всех деталей.

Для поворота рамных конструкций в удобное для сварки положение используют различные позиционеры и кантователи. Значительные размеры рам по ширине заставляют принимать специальные меры, облегчающие доступ к месту сварки. Для

этой цели используют передвижные подъемные площадки для сварщиков, располагают позиционеры в специальных углублениях, чтобы сварка производилась на уровне пола, применяют

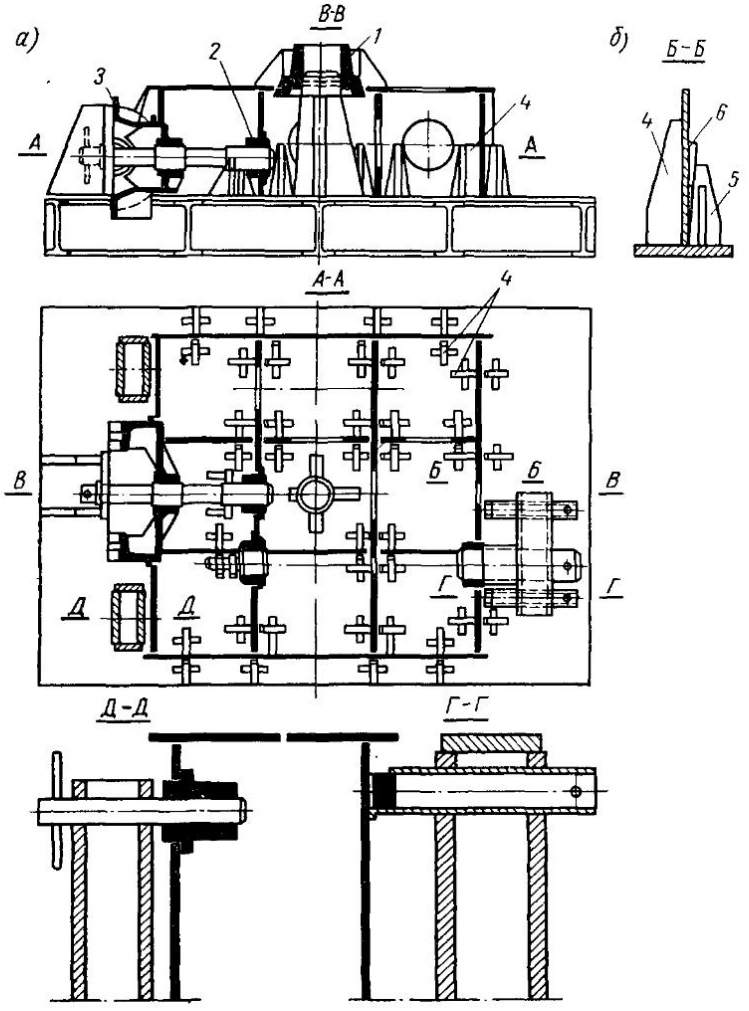


Рис. 17-14. Стенд для сборки нижней рамы экскаватора СЭ-3:
а) общий вид; б) крепление листового элемента

наклоняющиеся или подъемно-поворотные устройства. Пример кантователя последнего типа показан на рис. 17-15.

При сварке рамы экскаватора целесообразно использовать позиционер с рабочей площадкой для сварщиков. Нижняя рама

экскаватора *1* мостовым краном подается к позиционеру, устанавливается на его планшайбу *2* и закрепляется (рис. 17-16). Механизмы наклона и вращения планшайбы позволяют устанавливать раму в положения, удобные для полуавтоматической и автоматической сварки «в лодочку» различных швов. Сварка осуществляется со специальной площадки *3*, которая предназначена для перемещения сварщиков и оборудования относительно изделия.

При серийном производстве рамных конструкций целесообразно использование специализированной сборочной и сварочной оснастки. В зависимости от количества изделий одного типоразмера такая оснастка может быть либо переналаживаемой, либо специализированной. Так, например, серийное производство мостовых кранов предусматривает широкую номенклатуру типоразмеров при небольшом количестве изделий каждого из них. Поэтому установка для общей сборки крановых мостов, показанная на рис. 17-17, может переналаживаться. Она состоит из двух поперечных опор — неподвижной *12* и передвижной *7*, перемещающейся по рельсовому пути *8* с помощью тяговой электролебедки *10* и блока *1*, установленных между рельсами в углублении.

Точная установка передвижной опоры обеспечивается закрепленным на ней барабаном *5*, на котором навито несколько витков тягового троса. При передвижении опоры лебедкой барабан не вращается, а после выключения лебедки поворачивается вручную. Это обеспечивает медленное перемещение опоры до совпадения фиксаторов *2* с теми отверстиями в рельсах, что соответствуют пролету собираемого крана.

Опоры имеют по два суппорта *4* с ложементами для колес крана. Перемещение суппортов посредством ходовых винтов позволяет настраивать опору на требуемый размер концевой балки. При этом суппорты, расположенные со стороны приводных колес крана, закрепляются штифтами и становятся базовыми, а противоположные суппорты вращением ходового винта прижимают концевые балки к базовым.

При сборке крана концевые балки становятся на суппорты опор и их ходовые колеса закрепляются в ложементах по упорам винтовыми прижимами *3* строго в вертикальной плоскости. Кроме того, концевые балки закрепляются накидными зажимами *6* и винтовыми прижимами *9*. Затем по разметке на концевые балки кладутся пролетные балки, собранные с площадками обслуживания, и свариваются с концевыми. После сварки производится монтаж механизмов крана. Готовые мосты приподнимаются с установки четырьмя винтовыми домкратами *11* и снимаются мостовым краном.

Серийное производство рам с большим выпуском изделий определенного типоразмера имеет место при изготовлении транспортных конструкций (локомотивы, вагоны, автомобили и т. п.).

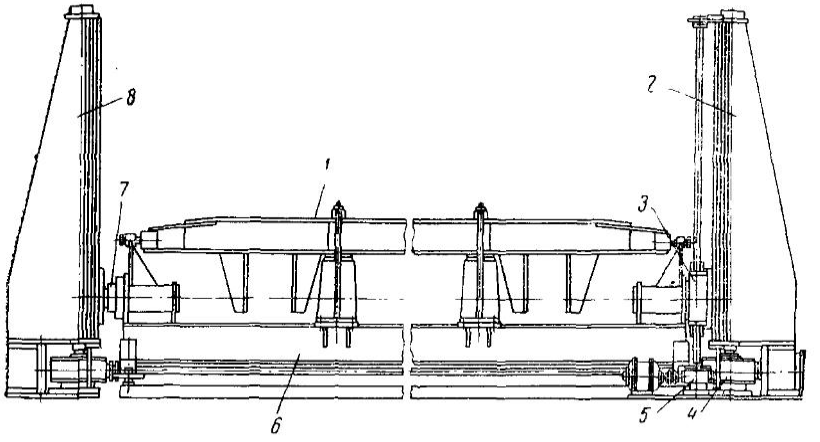


Рис. 17-15. Подъемно-поворотный кантователь для сварки рам:

1 — свариваемое изделие; *2* и *8* — стойки; *3* — ползун; *4* — редуктор подъема; *5* — редуктор поворота; *6* — поворотная рама; *7* — цапфа

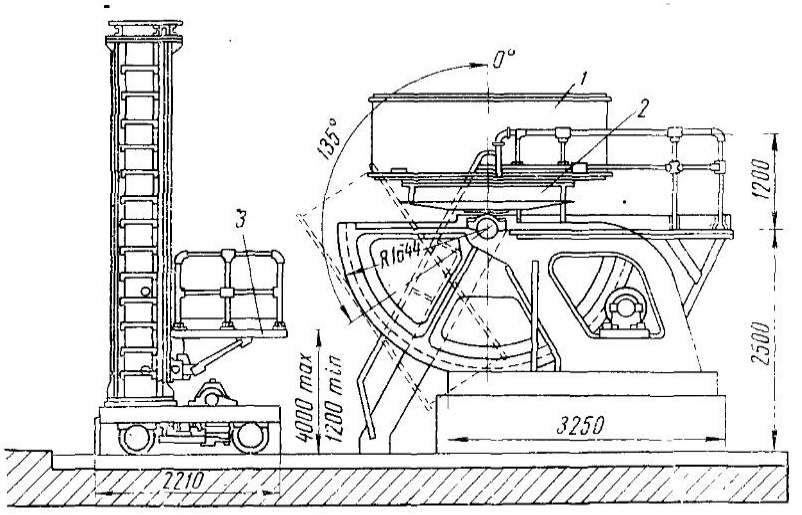


Рис. 17-16. Позиционер грузоподъемностью 15 *Т* с рабочей площадкой для сварщика

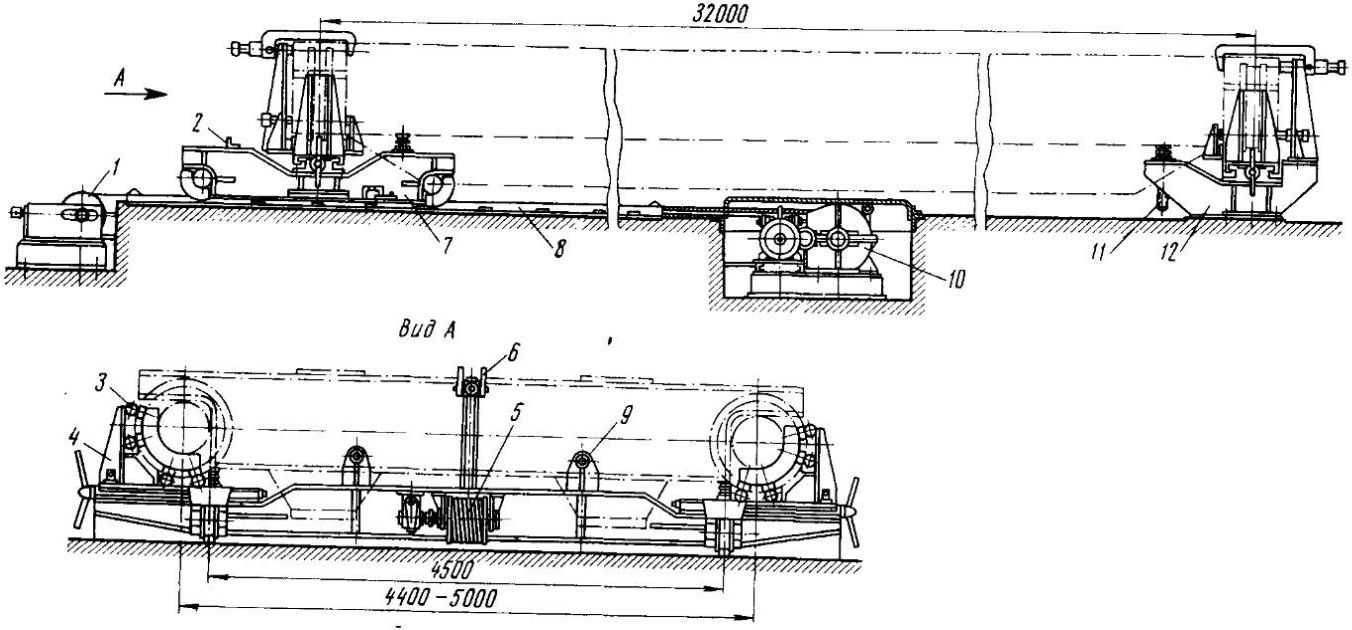


Рис. 17-17. Установка для сборки мостовых кранов

Наиболее целесообразной формой организации производства в этом случае является механизированная поточная линия, оснащенная специализированной оснасткой.

Примером такой оснастки может служить кондуктор-кантователь для сборки и сварки каркаса рамы тепловоза ТГМ-3, показанный на рис. 17-18. Поворотная рама представляет собой

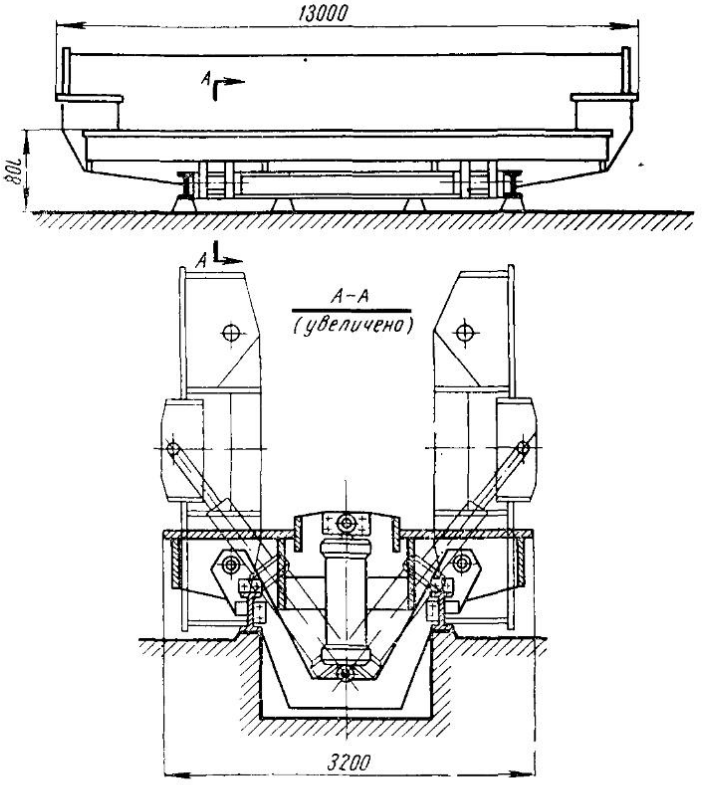


Рис. 17-18. Кантователь-кондуктор с гидродомкратами

сборочный кондуктор с пневмоприжимами, упорами и фиксаторами. Поворот кондуктора осуществляется двумя гидродомкратами, шарнирно закрепленными на основании. Оси поворота выполнены выдвижными и приводятся четырьмя гидроцилиндрами. Расположение пневмоцилиндров для зажатия деталей показано на эскизе рамы (рис. 17-19).

Продольные балки *1*, состоящие из двутавра с двумя накладными поясами, прижимаются в горизонтальном направлении

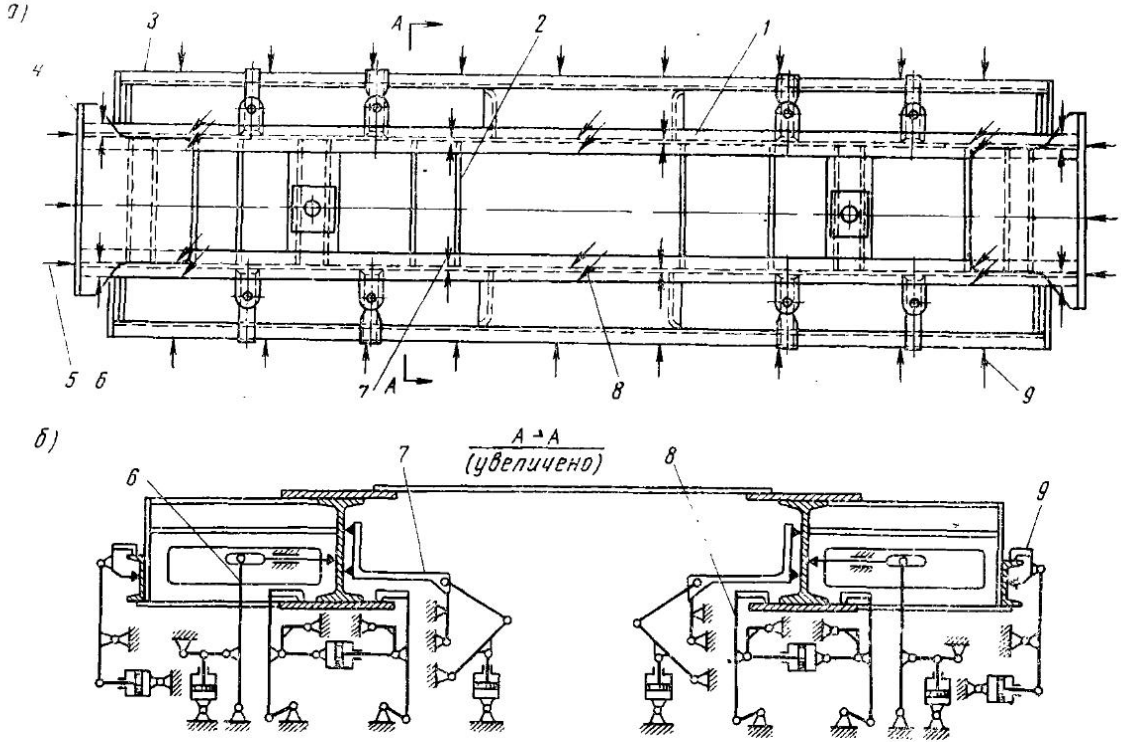


Рис. 17-19. Эскиз рамы и схемы расположения прижимов

к упорам *7* четырьмя прижимами *6*, а в вертикальном направлении — к раме кантователя тремя парными прижимами *8*. Тремя торцовыми прижимами *5* закрепляются буферные брусья *4* и лобовые листы. Диафрагмы *2* и другие дополнительные детали устанавливаются по гнездам и закрепляются винтовыми зажимами. Боковые швеллеры *3* прижимаются в вертикальном и горизонтальном направлениях откидными пневмозажимами *9*. Конструктивное оформление прижимов *8* и *6* показано на рис. 17-20, *а*, *б*.

Сравнительно сложные рычажные системы этих устройств оправданы их целевым назначением. В первом случае (рис. 17-20, *а*) свободно подвешенный пневмоцилиндр *1* с малым ходом поршня обеспечивает прижатие пояса балки *2* к основа-

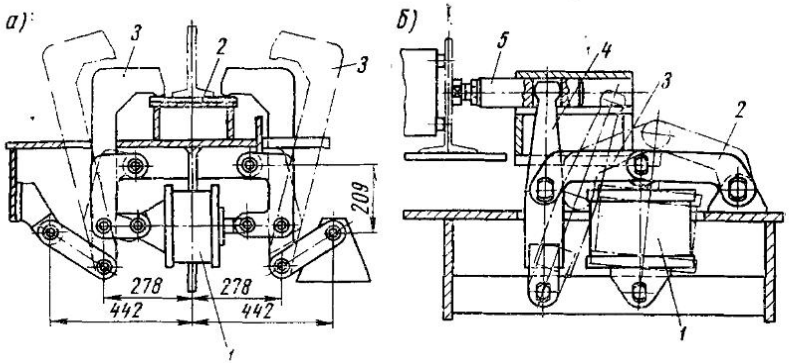


Рис. 17-20. Конструктивное оформление рычажных пневмоприжимов для закрепления элемеитов рамы

нию сразу с двух сторон при значительном перемещении прижимов *3*, облегчающих установку деталей и съем собранной рамы. Во втором случае (рис. 17-20, *б*) требуемый ход прижима *5* осуществляется шарнирно закрепленным на основании пневмоцилиндром *1* через рычаги *2* и *3* и коромысло *4*. В крайнем левом положении прижима усилие достигает максимума за счет распора рычагов *2* и *3*.

После сборки и прихватки производится сварка. При этом кондуктор с закрепленной на нем рамой поворачивается кантователем в удобное для сварки положение (см. рис. 17-18), а вдоль стенда перемещаются тележки для сварщиков.

После сборки и сварки каркаса рамы обычно проходят еще ряд сборочных и сварочных операций, выполняемых на различных рабочих местах поточной линии. Для транспортирования подобных крупногабаритных изделий целесообразно использование тележечного конвейера. На рис. 17-21, *а* показана схема

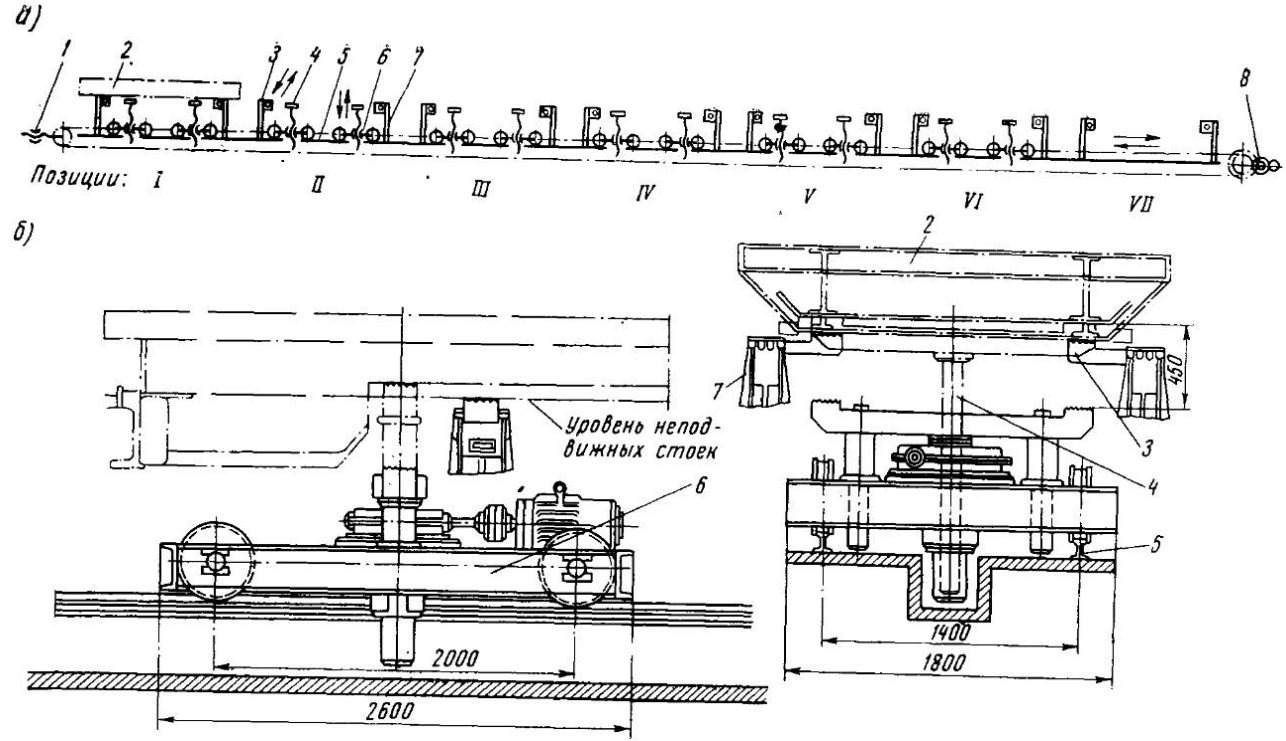


Рис. 17-21. Конвейер тележечный для крупногабаритных изделий:
а) схема расположения позиций; *б*) конструктивное оформление узлов конвейера

и на рис. 17-21, *б* — разрезы такого конвейера, используемого для изготовления рам тепловозов ТЭ-3.

Каркас рамы *2* укладывается мостовым краном на выдвижные опоры *3* стоек *7* позиции *1* поточной линии (рис. 17-21, *а, б*). Тележки конвейера *6* с опущенными домкратами *4* находятся на шести исходных позициях (по две тележки на каждую позицию). По окончании операции домкраты тележек поднимают рамы на всех позициях, выдвижные опоры стоек освобождаются и убираются. После этого приводной станцией *8* с помощью каната, натянутого устройством *1*, все тележки по рельсовому пути *5* передвигаются на одну позицию, опоры стоек ставятся в рабочее положение, домкраты опускаются и рамы ложатся на стойки. Затем все тележки одновременно возвращаются в исходное положение и начинается следующий цикл.

При последовательном прохождении рабочих мест на каркас рамы устанавливают и приваривают верхние и нижние настильные листы, шкворни, обносные швеллеры и другие детали. Поворот рамы на рабочих местах осуществляется подъемно-поворотными кантующими устройствами, сварка выполняется автоматами под слоем флюса и полуавтоматами в среде углекислого газа.

ГЛАВА XVIII

РЕШЕТЧАТЫЕ КОНСТРУКЦИИ (ФЕРМЫ)

§ 1. ТИПЫ ФЕРМ

По назначению фермы разделяют на стропильные, крановые, мостовые и др. Стержни в узлах ферм соединяют сваркой. Ферма при расчете на прочность представляет собой многократно статически неопределимую систему.

Многочисленные эксперименты показали, что усилия в стержнях реальных ферм близки по величине к усилиям, вычисленным в предположении шарнирности узлов ферм. Обоснованное экспериментами допущение, что узлы ферм шарнирны, значительно облегчает проектанту задачу конструирования и расчета. Проектирование фермы начинается с выбора рациональной ее системы. Система ферм зависит от их назначения, общей компоновки конструкции, требований эксплуатации. Очень часто рациональная система ферм определяется на основе опытного проектирования и сравнения нескольких вариантов. Из ряда вариантов выбирают ту конструкцию, которая отличается наименьшим весом и трудоемкостью при изготовлении. Рассмотрим некоторые виды ферм.

Для стропильных ферм больших пролетов (рис. 18-1, *а*) желательны системы, имеющие опорные стойки. Длины панелей этих ферм d составляют 1,5—3 *м*, отношение высоты к пролету $h/l = 1/10 \div 1/14$.

Примеры крановых ферм приведены на рис. 18-1, *б*. Длина панели верхнего пояса, по которой перемещается тележка с грузом, принимается $d = 1{,}5 \div 2{,}5$ *м*, отношение высоты к пролету $h/l = 1/12 \div 1/18$. Это отношение определяется требованиями жесткости и компактности конструкции. Чем больше h/l, тем меньше прогибы ферм под нагрузкой, но зато тем значительнее должна быть высота цеха.

Панели мостовых ферм значительно больше, чем крановых и стропильных.

Мостовые фермы должны обладать большой жесткостью, поэтому часто принимают в них отношение $h/l = 1/5 \div 1/8$.

Приведенные системы ферм показаны как плоские системы. В действительности конструкции составляются всегда из двух или бо́льшего числа ферм, связанных между собой элементами, называемыми *связями*. Связи, расположенные в горизонтальных плоскостях, называются *продольными*, в вертикальных — *поперечными*.

В настоящее время в СССР проводится большая работа по типизации ферм с учетом величины перекрываемых пролетов,

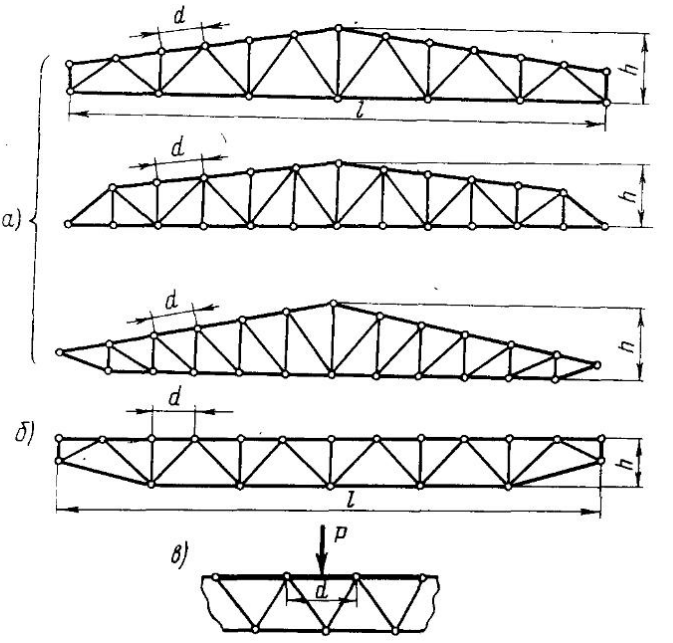


Рис. 18-1. Схемы ферм больших пролетов:

а) стропильных; *б*) крановых; *в*) схема загружения панели пояса сосредоточенной силой

нагрузок, материала. Это позволит применять наиболее рациональные конструкции и организовывать серийное их производство.

§ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК И УСИЛИЙ СТЕРЖНЕЙ

В значительном большинстве случаев нагрузки приложены в узлах ферм, т. е. в местах соединения стержней. Это часто имеет место в стропильных и, как правило, в мостовых конструкциях. Величина полезной нагрузки указывается в техническом

задании на проектирование. Определение продольных сил в элементах ферм от нагрузок, приложенных в узлах, производится любым аналитическим, графо-аналитическим или графическим методом строительной механики. Целесообразно отдельно определять величины продольных сил от собственного веса, полезной нагрузки и суммарные расчетные силы.

Допустим, что нагрузки приложены не в узлах ферм, а по длине панели (рис. 18-1, *в*); тогда их следует разложить по узлам и обычным путем от этих нагрузок определять продольные силы в стержнях фермы. В нагруженных панелях, помимо продольных сил, действуют поперечные силы Q и изгибающие моменты M, которые определяются при рассмотрении нагруженного пояса фермы в качестве балки. В первом приближении вычисляют Q и M в нагруженной панели, как в однопролетной балке, у которой пролет равен длине панели. Допустим, что панель (стержень пояса) нагружена сосредоточенной силой P, приложенной на ее середине. В этом случае изгибающий момент в двухопорной балке с шарнирными опорами определится по формуле

$$M = \frac{Pd}{4},$$

где P — приложенная сила;

d — длина панели.

Учитывая, что пояс представляет собой балку неразрезную, при расчете часто принимают расчетный момент равным

$$M = \frac{Pd}{6}.$$

Расчетная поперечная сила $Q = \frac{P}{2}$.

После вычисления величин продольных сил N, моментов M и поперечных сил Q определяют прочность элемента по формулам сложного сопротивления (см. «Стойки», гл. XV).

Расчетное напряжение определяют по формуле

$$\sigma = \pm \frac{M}{J} y_{max} + \frac{N}{F} \leqslant [\sigma]_p, \qquad (18.1)$$

где J — момент инерции поперечного сечения пояса относительно горизонтальной оси;

F — площадь сечения пояса;

y_{max} — расстояние от центра тяжести сечения до крайнего волокна, в котором напряжение имеет тот же знак, что и сила N.

В сжатом поясе производится проверка на продольный изгиб, как указано в гл. XV «Стойки».

После определения требуемых поперечных сечений приближенным способом иногда производят вторичный расчет пояса с учетом изгибающего момента, вычисленного уточненным методом. При этом пояс рассматривается как многоопорная балка. Точность практических расчетов достаточна при условии рассмотрения пояса в качестве трехпролетной неразрезной балки.

§ 3. ЛИНИИ ВЛИЯНИЯ УСИЛИЙ СТЕРЖНЕЙ

При загружении ферм движущейся нагрузкой, например, тележкой крана, целесообразно определять усилия в стержнях методом линий влияния. Линии влияния усилий стержней фермы выражают зависимость величины усилий в стержнях от положения груза, равного единице, на ферме. Таким образом, для каждого стержня (элемента) фермы строится соответствующая линия влияния.

Груз может перемещаться как по верхнему, так и по нижнему поясу фермы в соответствии с загружениями реальными силами.

При построении линии влияния усилий стержней ферм учитываются продольные силы, возникающие в стержнях. Если сила, равная единице, перемещается непосредственно по поясу, то в нем возникают изгибающий момент и поперечная сила, которые учитываются особо. В дальнейшем рассмотрим линии влияния только продольных сил.

Грузы могут перемещаться непосредственно по поясам фермы, например, тележки — по кранам или подвижной состав — по железнодорожным мостам. При этом пояса испытывают продольные усилия и подвергаются поперечному изгибу. Чтобы построить линию влияния продольного усилия в поясе, необходимо сделать такое предположение. Вообразим, что по узлам верхнего пояса фермы расположены поперечные брусья, которые поддерживают продольные бруски длиной, равной панели фермы d (рис. 18-2, a). По продольным брускам перемещается груз, равный единице, воспринимаемый фермой через поперечные брусья. Таким образом, осуществляется передача нагрузки на ферму по узлам.

В действительности такая надстройка нередко осуществляется в сооружениях. Если же она в действительности отсутствует, то для построения линий влияния продольных усилий поясов следует допустить, что она все же имеет место.

Докажем, что при перемещении груза от узла к узлу пояса линия влияния усилия в стержнях фермы определяется уравнением прямой линии.

Определим усилия в каком-либо стержне, например $2'3'$, когда $P=1$ последовательно находится в узлах $2'$ и $3'$.

Обозначим величину усилия рассматриваемого стержня $2'3'$ при положении груза в узле $2'$ через N_2, а при положении в узле $3'$ — N_3.

Если груз, равный 1, находится на панели на расстоянии z от узла $2'$ (рис. 18-2, $а$), то ферма испытывает нагружения:

в узле $2'$

$$P_{2'} = 1 \cdot \frac{d-z}{d},$$

в узле $3'$

$$P_{3'} = 1 \cdot \frac{z}{d}.$$

Таким образом, при перемещении груза от узла $2'$ до узла $3'$ усилие в стержне $2'3'$ может быть найдено по формуле

$$N = y_2 P_{2'} + y_3 P_{3'} = \\ = N_2 \frac{d-z}{d} + N_3 \frac{z}{d},$$

где N_2 и N_3 — усилия от единичных сил в узлах $2'$ и $3'$; величины, не зависящие от z;

d — **длина** панели.

Полученное уравнение представляет собой линейную функцию z.

Таким образом, усилие в элементе при перемещении груза от узла к узлу изменяется по закону прямой линии. Это используют при построении линий влияния элементов ферм.

Рассмотрим линии влияния усилий в стержнях фермы с па-

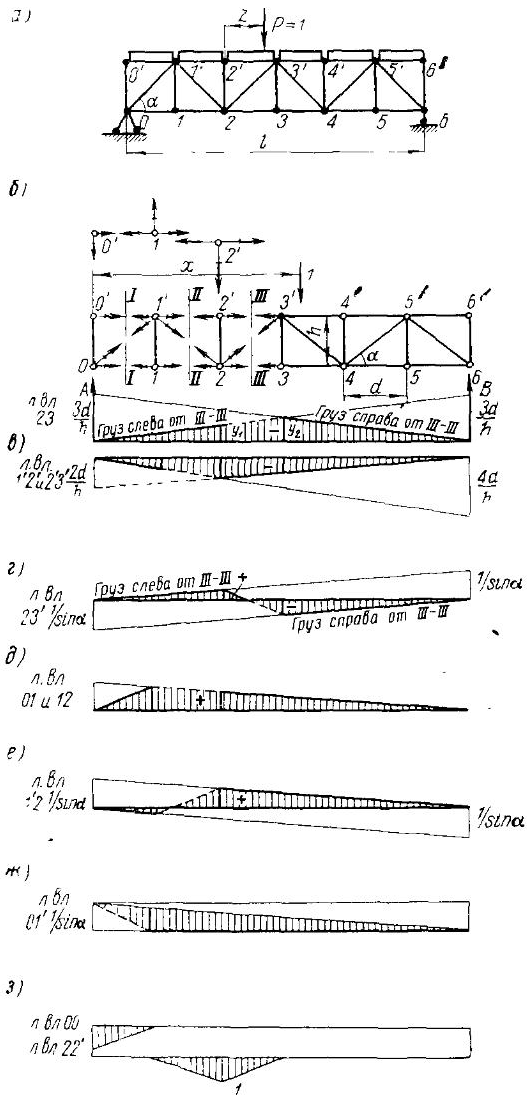


Рис. 18-2. Построение линий влияния усилий в стержнях фермы с параллельными поясами

раллельными поясами, опирающейся на две опоры (рис. 18-2, *а*). Производим последовательно разрезы *III—III* и *II—II* (рис. 18-2, *б*).

Для построения линии влияния *23* рассмотрим уравнение равновесия $\Sigma M_{3'} = 0$.

При грузе, находящемся справа от разрезанной панели *III—III*, уравнение равновесия для левой части фермы будет

$$A3d - 23h = 0,$$

$$23 = A\,\frac{3d}{h}.$$

Обозначим через x расстояние от груза до левой опоры A. Тогда при $x=0$ $A=1$ и $23=\frac{3d}{h}$; при $x=l$ $A=0$ и $23=0$.

Проводим правую линию влияния *23*, которая верна при условии, что груз находится на участке от узла *6′* до узла *3′*.

При грузе, находящемся слева от разрезанной панели *III—III*, уравнение равновесия для правой части фермы будет

$$B3d - 32h = 0,$$

откуда

$$32 = B\,\frac{3d}{h}.$$

Аналогичным образом находим левую линию влияния, которая верна при грузе, находящемся на участке от узла *O′* до узла *2′*.

При перемещении груза от *2′* до *3′* линия влияния изменяется по закону прямой, изображенной на рис. 18-2, *б*, являющейся продолжением левой линии влияния.

Можно значительно упростить технику построения линии влияния усилия в стержне *23*, если учесть следующее. При нахождении единичной силы в точке *3′* безразлично, рассматривают ли равновесие левой отрезанной части фермы и выражают *23* через величину реакции A или правой части фермы и определяют *32* через реакцию B. В обоих случаях в уравнения равновесия не входит член, зависящий от единичной силы. Это означает, что ордината левой линии влияния (груз слева от разрезанной панели), определяемой из соотношения $B\frac{3d}{h}$, равна ординате правой линии влияния (груз находится справа от разрезанной панели), вычисляемой по $A\frac{3d}{h}$, т. е. правая и левая линии влияния пересекаются под моментной точкой. Это важное свойство линий влияния, облегчающее их построение. В самом деле, проводим правую линию $23=A\frac{3d}{h}$, которая верна пока груз находится на участке между узлами *3′* и *6′*. Левая линия влияния, определяемая через реакцию B, имеет ординату, равную нулю на

опоре A, и пересекается с правой линией под точкой $3'$. Эта прямая верна на участке между узлами $0'$ и $2'$. Между узлами $2'$ и $3'$ линия влияния выражается линейной функцией, т. е. прямой, представляющей собой продолжение левой линии влияния.

Аналогично пишем условия равновесия $\Sigma M_2=0$ и строим линию влияния $2'3'$ (рис. 18-2, *в*).

Рассмотрим в сечении *III—III* условия равновесия $\Sigma У=0$.

При грузе, находящемся справа от разрезанной панели, уравнение равновесия для левой части фермы запишется

$$A + 23' \sin\alpha = 0.$$

$$\text{При } x=0 \quad 23' = -\frac{1}{\sin\alpha}; \text{ при } x=l \quad 23'=0.$$

Проводим правую линию влияния $23'$, которая верна при грузе, находящемся на участке от узла $6'$ до узла $3'$ (рис. 18-2, *г*).

При грузе, расположенном слева от разрезанной панели, уравнение равновесия для правой части фермы запишется

$$B - 3'2 \sin\alpha = 0.$$

$$\text{При } x=0 \quad 3'2=0; \quad \text{при } x=l \quad 3'2=\frac{1}{\sin\alpha}.$$

Левая линия влияния верна при грузе, находящемся на участке $0'2'$.

При перемещении груза от $2'$ до $3'$ линия влияния $23'$ определяется пунктирной прямой (см. рис. 18-1, *г*).

Линию влияния усилия $23'$ можно построить более простым способом, если учесть, что левая и правая прямые пересекаются под моментной точкой.

Находим сначала правую прямую, которая строится по уравнению $23'=A/\sin\alpha$.

Известно, что левая прямая имеет ординату на левой опоре, равную нулю, и должна пересечь правую под моментной точкой. Моментная точка при определении усилия в раскосе находится на пересечении направлений параллельных поясов, т. е. в бесконечности. Это указывает, что левая и правая линии влияния раскоса $23'$ параллельны между собой.

Линия влияния $1'2'$ строится из рассмотрения условия равновесия узла $2'$ — проектирования всех сил на горизонтальную ось

$$\Sigma X = 0,$$

откуда следует: $2'1'=2'3'$.

Линия влияния $O'1'$ строится с учетом условия равновесия узла O'

$$\Sigma X = 0,$$

откуда следует: $O'1'=0$.

Для построения линии влияния *12* проводится разрез *II—II* и пишутся условия равновесия $\Sigma M_{1'}=0$.

Очертание линии влияния *12* показано на рис. 18-2, *д*.

Из условия равновесия $\Sigma X=0$ в узле *1* следует, что линия влияния *1O* равна линии влияния *12*.

Для построения линии влияния *1'2* следует использовать условие равновесия $\Sigma Y=0$.

При грузе, находящемся справа от разрезанной панели *II—II*,

$$A - 1'2 \sin\alpha = 0,$$

откуда

$$1'2 = \frac{A}{\sin\alpha}.$$

При $x=0$ $1'2=\frac{1}{\sin\alpha}$; при $x=l$ $1'2=0$.

Проводим правую линию влияния *1'2*, которая верна при грузе, находящемся на участке от узла *6'* до узла *2'* (рис. 18-2, *е*).

При грузе, находящемся слева от разрезанной панели *II—II*,

$$B + 21' \sin\alpha = 0; \quad 21' = -\frac{B}{\sin\alpha}.$$

При $x=0$ $21'=0$; при $x=l$ $21'=-\frac{1}{\sin\alpha}$.

Проводим левую линию влияния на участке *O'1'*. При перемещении груза от *1'* до *2'* линия влияния определяется уравнением прямой, изображенной на рис. 18-2, *е* пунктирной линией.

Аналогично строим линию влияния усилия в стержне *O1'* (рис. 18-2, *ж*).

Построим линию влияния усилия в стойке *11'*. Из условия равновесия сил, приложенных в узле *1*, $\Sigma Y=0$ вытекает, что усилие $11'=0$ (рис. 18-2, *б*).

Ординаты линии влияния стойки *33'* также равны нулю.

При построении линии влияния усилия в стержне *22'* следует рассмотреть условия равновесия $\Sigma Y=0$ в узле *2'*.

Если груз находится вне второй и третьей панелей, то усилие $2'2'=0$.

Если груз находится в узле *2'*, то условие $\Sigma Y=0$ пишется таким образом: $-2'2-1=0$, при этом $2'2=-1$.

При перемещении груза от *1'* к *2'* и от *2'* к *3'* линия влияния имеет очертание треугольника (рис. 18-2, *з*).

Линия влияния усилия в опорной стойке *O'O* находится из условия равновесия $\Sigma Y=0$ в узле *O'* (рис. 18-2, з).

При отсутствии груза на первой панели — $O'O=0$.

При нахождении груза в узле O' уравнение равновесия запишется

$$-1 - O'O = 0,$$

откуда

$$O'O = -1.$$

При перемещении груза от узла O' до узла $1'$ линия влияния усилия в стержне OO' определяется уравнением прямой, изображенной на рис. 18-2, *з* наклонной линией.

§ 4. ПОПЕРЕЧНЫЕ СЕЧЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ

При подборе поперечных сечений стержней ферм необходимо учитывать следующие обстоятельства. Стержни должны обладать достаточной прочностью и жесткостью. Превышение расчетного напряжения относительно допускаемого ни в коем случае не должно быть более 5%. Стержни по возможности должны быть экономично сконструированы, т. е. расчетные напряжения — близки к допускаемым. Однако поперечные сечения стержней, нагруженных небольшими продольными силами, часто подбирают из условий жесткости, поэтому в этих стержнях напряжения могут иметь весьма малую величину.

Наибольшая величина гибкости λ стержней стальных ферм промышленных сооружений (см. гл. XV) не должна превышать λ:

основные сжатые стержни (пояса и опорные раскосы)	120
прочие сжатые стержни	150
основные растянутые стержни	250
прочие растянутые стержни	350
сжатые второстепенные стержни (связи)	200
растянутые связи	400

В фермах гибкость ограничивается не только в сжатых, но и в растянутых стержнях. Это делается с целью устранить их провисание при весьма большой гибкости и вибрации при динамических нагрузках. Сортамент применяемого металла должен быть по возможности однообразным, т. е. следует иметь как можно меньшее количество разнородных элементов (позиций). Это упрощает и удешевляет изготовление ферм на заводе. Фермы в значительном большинстве случаев конструируют из прокатных профильных элементов. Целесообразнее применять гнутые элементы: они имеют малую толщину и повышенную жесткость, по сравнению с прокатными.

При конструировании ферм следует стремиться сократить объем сварочных работ, располагать швы в элементах по возможности симметрично и обеспечивать удобное выполнение сварки как на заводе, так и на монтажной площадке.

§ 5. СЕЧЕНИЯ СЖАТЫХ И РАСТЯНУТЫХ ПОЯСОВ, РАСКОСОВ И СТОЕК

Подбор сечений сжатых поясов. Типы поперечного сечения сжатых поясов, имеющие наибольшее распространение, приведены на рис. 18-3, *а—и*. Сечения в форме уголков (рис. 18-3, *а*) применяют в слабо нагруженных фермах или в нерабочих элементах. Сечения в форме двух уголков (рис. 18-3, *б*) проектируют часто в фермах с небольшими усилиями (в легких стропильных фермах, мачтах). Замкнутые сечения (рис. 18-3, *в*) целесообразны в тонкостенных конструкциях и в конструкциях, где требуется повышенное сопротивление кручению. Их иногда применяют в авиационных конструкциях. Сечения, приведенные на рис. 18-3, *г, д*, встречаются в крановых фермах, в которых верхние пояса, помимо силы сжатия, испытывают изгибающие моменты. На рис. 18-3, *е, ж* приведены двустенчатые конструкции, которые применяют при средних и больших усилиях (в стропильных и крановых фермах). Конструкцию, представленную на рис. 18-3, *з*, применяют в мостовых пролетных строениях. Трубчатая конструкция, приведенная на рис. 18-3, *и* рациональна в отношении требований прочности и экономична. Возможно применение и других видов конструкций, если это оправдывается требованиями рационального конструирования и экономичности.

Уголки и швеллеры могут быть получены прокаткой и гнутьем.

Требуемая площадь сжатого элемента пояса при отсутствии момента равна

$$F_{тр} = \frac{N}{[\sigma]_р \varphi}, \qquad (18.2)$$

где N — расчетная продольная сила;

φ — коэффициент продольного изгиба.

При подборе сечения следует предварительно задаться коэффициентом φ, который обычно принимается равным $0{,}5 \div 0{,}7$. Свободная длина стержня берется в зависимости от конструкции сооружения. Например, в стропильных фермах горизонтальная жесткость ферм обеспечивается постановкой горизонтальных связей. При этом свободную длину пояса принимают равной расстоянию между центрами узлов. Подбор сечения сжатого пояса производят так же, как и сжатой стойки (см. гл. XV).

Напряжение в подобранном сечении должно быть

$$\sigma = \frac{N}{F\varphi} \leqslant [\sigma]_p \varphi. \qquad (18.3)$$

В стержнях, сечения которых приведены на рис. 18-3, соединительные швы конструируют непрерывными. Их выполняют

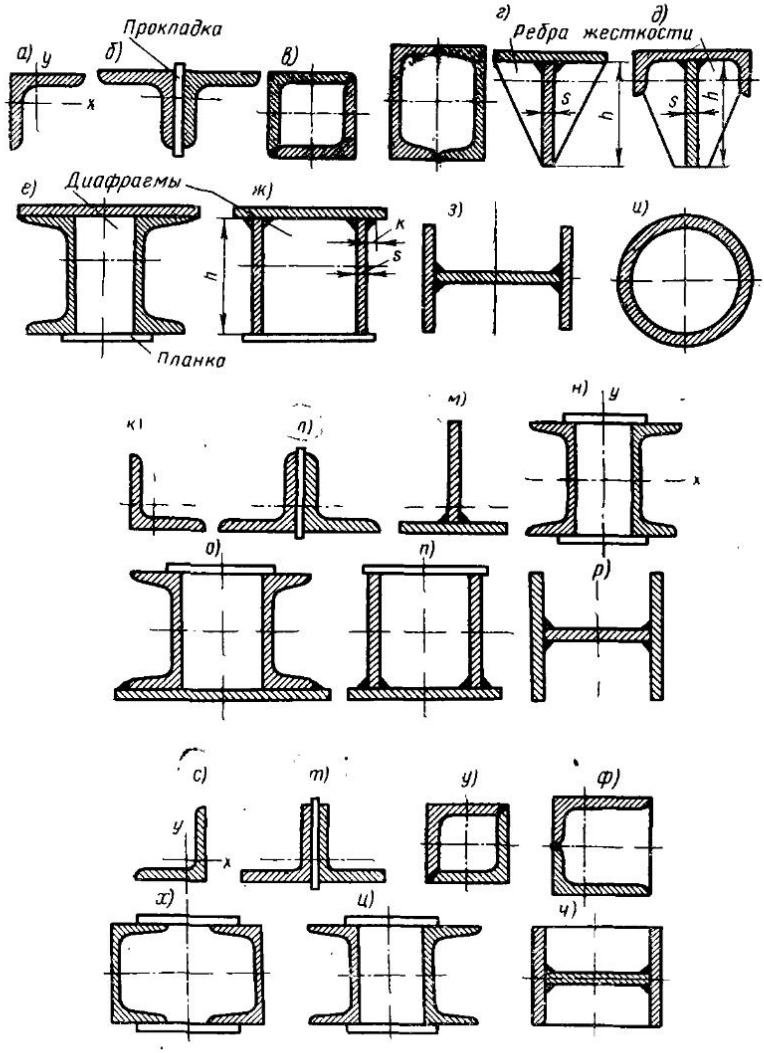


Рис. 18-3. Виды поперечных сечений стержней ферм:

а)—и) сжатые пояса; к)—р) растянутые пояса; с)—ч) сжатые и растянутые раскосы и стойки

обычно автоматической сваркой под флюсом; при этом катет шва принимают $\kappa = 0{,}4 \div 0{,}6s$ листа. Нередко κ принимают равным $4 \div 5$ *мм*.

Если на панели фермы отсутствует нагрузка, то поперечная сила в ней $Q = 0$. Для расчета же швов определяется условная поперечная сила, которая вычисляется, как и в стойках, по формулам (15.15) и (15.16).

Так как Q всегда незначительна, то напряжения в швах пояса также имеют небольшую величину. Они вычисляются по формуле

$$\tau = \frac{QS}{J \cdot 2 \cdot 0{,}7\kappa}, \qquad (18.4)$$

где J — момент инерции поперечного сечения;
S — статический момент вышележащей части пояса относительно центра тяжести сечения;
κ — катет шва.

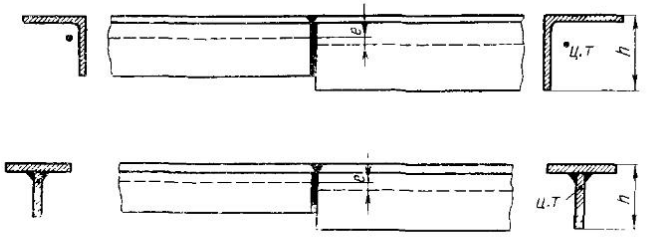


Рис. 18-4. Стык пояса, имеющего эксцентриситет

Для повышения устойчивости элементов (рис. 18-3, *а*—*з*) применяют соединительные планки, диафрагмы, ребра жесткости, расположенные в плоскости, перпендикулярной оси элемента. Их ставят без расчета на прочность и приваривают к основным элементам вручную или с помощью шланговых полуавтоматов.

В фермах с большими пролетами, рассчитанных под тяжелые нагрузки (например, в мостовых), поперечные сечения пояса иногда меняются от панели к панели, и сечение подбирается отдельно для каждой панели. Так поступают всегда, когда длина панелей значительна, например, превышает 6— 8 *м*. В крановых фермах средней и малой грузоподъемности, в стропильных фермах и других типах легких ферм сечения поясов часто остаются неизменными по длине.

Следует иметь в виду, что перемена сечения не должна значительно изменять положения центра тяжести, так как это вызывает образование эксцентриситета усилий (рис. 18-4). Последнее

приводит к появлению добавочного изгибающего момента в узле, что нецелесообразно. Это иногда вынуждает отказаться от изменения сечения и сохранять его одинаковым по всей длине фермы. Величина допустимого эксцентриситета зависит от наибольшей высоты соединяемых элементов, т. е. $e \leqslant 0{,}02h$. Если e превышает указанный предел, то необходимо учесть дополнительные напряжения от изгибающего момента.

Подбор сечений растянутых поясов. Конструирование поперечных сечений растянутых поясов значительно проще, чем сжатых, так как в этом случае допускаемое напряжение в металле не зависит от гибкости элементов.

Требуемая площадь поперечного сечения при растяжении определяется по формуле

$$F_{тр} = \frac{N}{[\sigma]_р}. \qquad (18.5)$$

Типы поперечных сечений растянутых поясов приведены на рис. 18-3, *к*—*р*. Поперечные сечения нижних поясов зависят от выбранных ранее сечений верхних поясов. Сечения в форме уголка (рис. 18-3, *к*) применяют для слабонагруженных и ненагруженных элементов. Сечения в форме двух уголков и тавра (рис. 18-3, *л* и *м*) распространены в стропильных и крановых фермах. Конструкции, приведенные на рис. 18-3, *н*—*р* — двустенчатые, их применяют тогда, когда сечения верхних поясов ферм составлены из двух стенок. Н-образные профили (рис. 18-3, *р*) распространены в пролетных строениях мостов.

Условия изменения величины сечения от панели к панели в растянутых поясах те же, что и в сжатых.

Соединительные швы конструкций, изображенных на рис. 18-3, *м*—*р*, нерабочие, катеты швов $к = 4 \div 5$ *мм*; швы непрерывные, их следует сваривать на автоматах под флюсом.

Подбор сечения раскосов и стоек. Типы поперечных сечений раскосов и стоек приведены на рис. 18-3, *с*—*ч*. Уголки применяют тогда, когда элементы поясов сконструированы тоже из уголков; парные уголки с зазором (рис. 18-3, *т*) применяют весьма часто в фермах, работающих под легкими и средними нагрузками; сечения элементов, приведенные на рис. 18-3, *у* и *ф*, могут быть рекомендованы для сжатых элементов; на рис. 18-3, *х* и *ц* приведены сечения стержней, которые применяют часто, если пояса имеют двустенчатые сечения; на рис. 18-3, *ч* приведены конструкции раскосов и стоек мостовых ферм.

В растянутых раскосах и стойках требуемая площадь поперечного сечения элемента определяется по формуле

$$F_{тр} = \frac{N}{[\sigma]_р},$$

а в сжатых раскосах и стойках — по формуле

$$F_{тр} = \frac{N}{[\sigma]_p \varphi},$$

где φ — предварительно принимают равным $0{,}4 \div 0{,}7$.

Порядок подбора сечений аналогичен описанному в гл. XV.

Свободная длина l раскосов и стоек равна теоретической при определении гибкости указанных элементов в плоскости, перпендикулярной ферме. (При вычислении гибкости этих элементов в плоскости фермы допускается принимать расчетную длину, равную 0,8 теоретической длины раскосов и стоек; это объясняется наличием частичного защемления элементов в узлах фермы).

Если поперечное сечение элемента состоит из двух ветвей, как показано на рис. 18-3, *у* и *х*, то определяются гибкости λ:

λ_x — относительно оси *х*;

λ_y — относительно оси *у*;

λ_0 — приведенная, равная $\sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}$

λ_1 — гибкость ветви, которую по техническим условиям для сжатых элементов принимают $\leqslant 40$.

Коэффициент φ находится по наибольшей из гибкостей. Сечение каждого раскоса и стойки подбирается независимо от других. Однако нередко, чтобы сохранить однообразие сортамента, ряд элементов решетки фермы (раскосы, стойки) принимают одинакового сечения.

Прочность соединительных швов в растянутых элементах не рассчитывается; в сжатых элементах (рис. 18-3, *у, ф, ч*) она проверяется, как указано в § 4 главы XV. Из-за удобства технологии катет шва, как правило, в обоих случаях назначается равным $4 \div 5$ *мм*, но не менее $0{,}3s$. Расстояние между планками берется таким, чтобы гибкость ветви растянутого элемента была $\leqslant 200$. Расчет прочности соединительных планок (рис. 18-3, *х, ц*) в сжатых элементах производится так же, как планок на сжатых стойках (см. гл. XV).

§ 6. УЗЛЫ ФЕРМ

Общие требования. Условия рационального конструирования узлов ферм следующие: геометрические оси соединяемых стержней должны пересекаться в одной точке — центре узла; должна быть обеспечена возможность наложения швов, прочно прикрепляющих раскосы и стойки к поясам в удобном для производства сварочных работ положении; не должно быть скученных швов.

Требуемая длина швов, соединяющих стержни в узле, вычисляется по формуле

$$L = \frac{N}{0{,}7\kappa\,[\tau']}, \qquad (18.6)$$

где N — расчетная сила;

κ — катет шва;

$[\tau']$ — допускаемое напряжение в шве при срезе.

Если присоединяемый элемент является уголком, то расчет сварных швов производят, как указано в гл. IV.

Результаты подбора сечений элементов представляют по форме табл. 18.1.

Таблица 18.1

Схема подбора сечений элементов

Элементы	Усилие N, $кГ$	Тип сечения и площадь F, $см^2$	Наименьший момент инерции J, $см^4$	Наименьший радиус инерции r, $см$	Длина l, $см$	Наибольшая гибкость, $l/r = \lambda$	Коэффициент φ	Расчетное напряжение, $кГ/см^2$

В узлах часто применяют косынки, имеющие различную форму: надставок, вставок, прокладок, накладок.

Узлы без косынок. Этот тип узлов наиболее прост при изготовлении узлов ферм. Его следует применять, если могут быть соблюдены все правила рационального конструирования узловых соединений.

Пример конструкций узла фермы без косынок с одностенчатым профилем пояса приведен на рис. 18-5, *а*. На рис. 18-5, *б, в* приведены конструкции, у которых нижние пояса и раскосы имеют двустенчатые сечения, что позволяет весьма компактно соединять элементы в узле.

Узлы с надставками. Примеры конструкций узлов с надставками приведены на рис. 18-6, *а, б*. Надставки приварены втавр угловыми швами с катетом κ. Это создает возможность прочного прикрепления раскосов к поясам.

Расчет прочности швов, прикрепляющих раскосы к надставке, производится обычным путем. Требуемая длина швов прикрепления раскоса определяется по формуле

$$L = \frac{N}{0{,}7\kappa[\tau']}.$$

Приближенно расчет швов, прикрепляющих надставку к поясу, может быть выполнен с учетом следующих соображений. В узле $\Sigma Y=0$. Следовательно, усилия в раскосах должны быть разных знаков. Допустим, например, что элемент N_1 растянут,

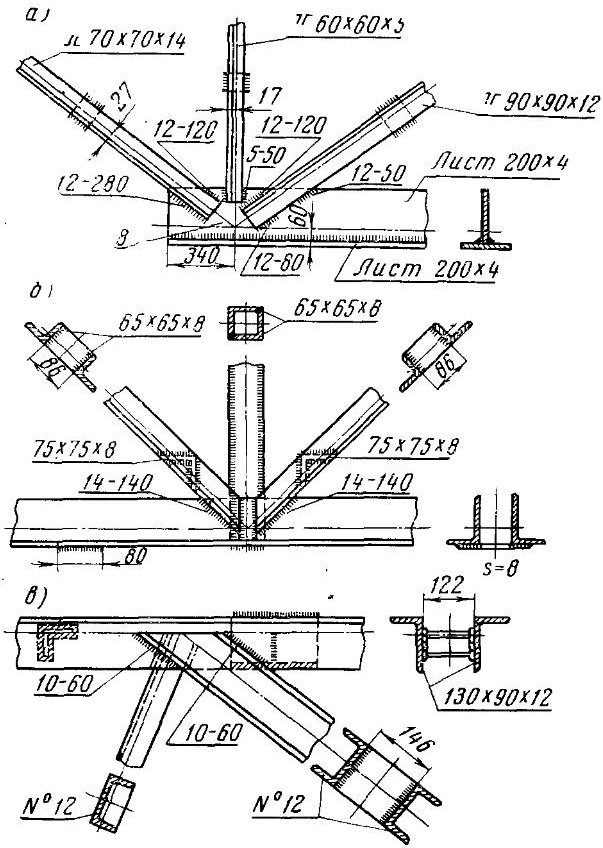


Рис. 18-5. Узлы без косынок:
а) сечение пояса одностенчатое; *б*) *в*) сечение пояса двустенчатое

а элемент N_2 сжат (рис. 18-6, *а*). Из условия $\Sigma X=0$ приходим к выводу, что горизонтальные швы, прикрепляющие надставку, срезаются силой, равной

$$T = N_1 \cos \alpha_1 + N_2 \cos \alpha_2. \qquad (18.7)$$

Напряжение в шве

$$\tau = \frac{T}{0{,}7\, k l}, \qquad (18.8)$$

где l — длина надставки (см. рис. 18-6, *а*).

Как правило, напряжения τ невелики.

На рис. 18-6, *б* изображен узел фермы с тавровыми поперечными сечениями поясов, в узле к стенке приварена косынка.

Узлы со вставками. На рис. 18-7, *а, б, в* приведены узлы со вставками. Вертикальные листы поясов обрываются и вместо них вставляются фигурные листы, размеры которых позволяют обеспечить прочное прикрепление раскосов и стоек. Вставку к вертикальному листу можно прикрепить как прямы-

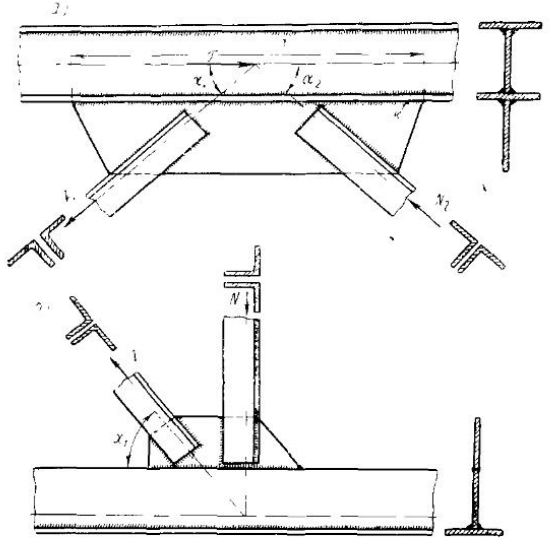


Рис. 18-6. Узлы ферм с надставками:

а) сечение пояса двутавровое; *б*) сечение пояса тавровое

ми, так и косыми стыковыми швами. Узлы со вставками применяют в фермах, работающих под переменными нагрузками.

Узлы с прокладками. Такие конструкции узлов применяют, когда сечения стержней ферм состоят из парных элементов — уголков, расставленных с зазором относительно друг друга, достаточным для того, чтобы поместить в узле прокладку. Примеры конструкций узлов с прокладками приведены на рис. 18-8. Прочность швов, приваривающих прокладки к поясам, определяется так же, как и прочность швов, прикрепляющих надставки.

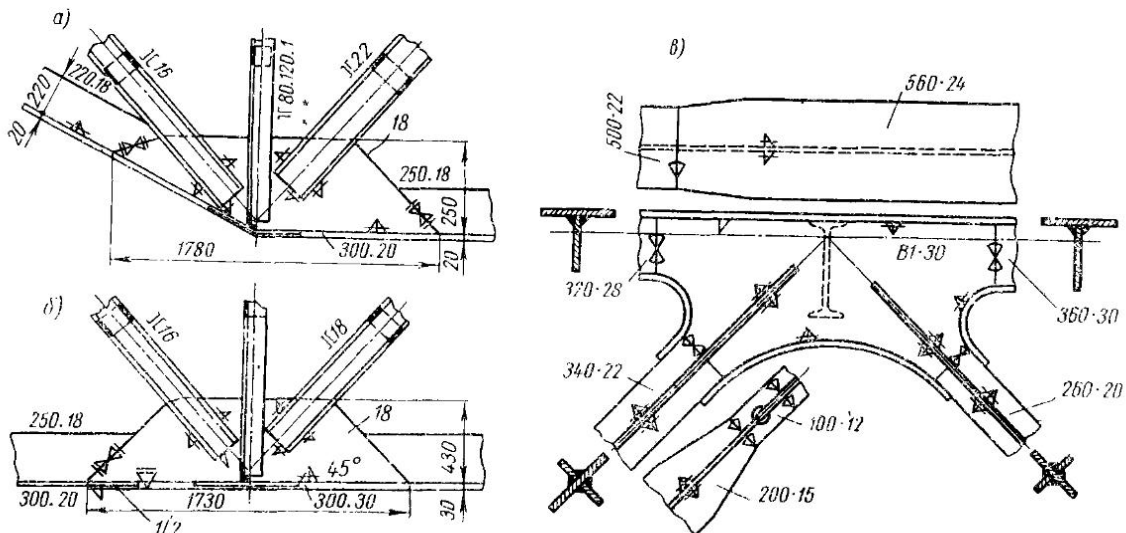


Рис. 18-7. Узлы ферм с вставками:

а), *в*) вставки с косыми швами; *б*) вставка с прямым швом

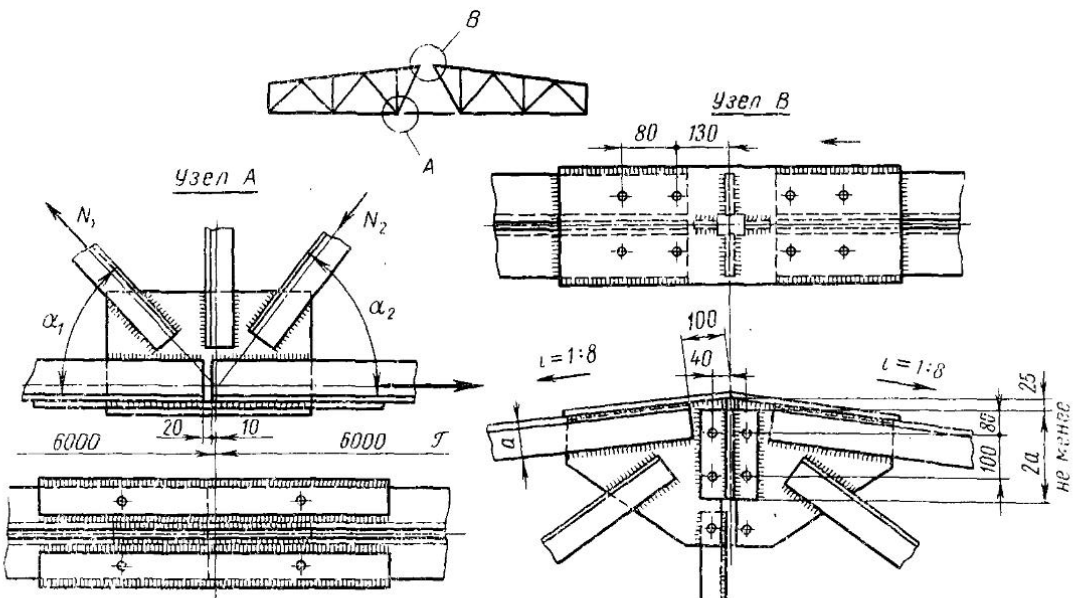


Рис. 18-8. Узлы с прокладками:

узел *A* — узел нижнего пояса; узел *B* — узел верхнего пояса

Усилие, сдвигающее прокладку относительно пояса, равно

$$T = N_1 \cos \alpha_1 + N_2 \cos \alpha_2, \qquad (18.9$$

где N_1 и N_2 — усилия в раскосах;

α_1 и α_2 — углы наклона раскосов.

Распределение усилий происходит неравномерно.

Усилие со стороны обушка $T_1 = 0{,}7T$, а с противоположной стороны — $T_2 = 0{,}3T$.

Определив T_1 и T_2, находим напряжение в швах.

Узлы с накладками. Пример узла с накладкой приведен на рис. 18-9. Узлы с накладками в настоящее время проек-

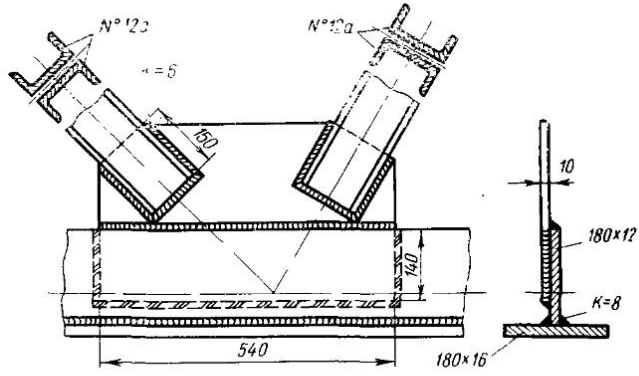


Рис. 18-9. Узел с накладкой

тируют редко. В большинстве случаев они могут быть лишь в легких фермах. Применение накладок заимствовано из практики конструирования клепаных изделий. В узлах с накладками концентрация напряжений значительная, поэтому в конструкциях, работающих под переменными нагрузками, их применять не следует.

Опорные узлы. Конструкции опорных узлов зависят от назначения ферм и устройств креплений. При конструировании опорных узлов ферм необходимо соблюдать следующие условия: направление реакции должно проходить через центр опорного узла; сжатый пояс должен проходить над опорой, не прерываясь; узел должен обладать достаточной жесткостью. Пример опорного узла стропильной фермы приведен на рис. 18-10, *а*, одного из пролетных узлов фермы железнодорожного моста — на рис. 18-11.

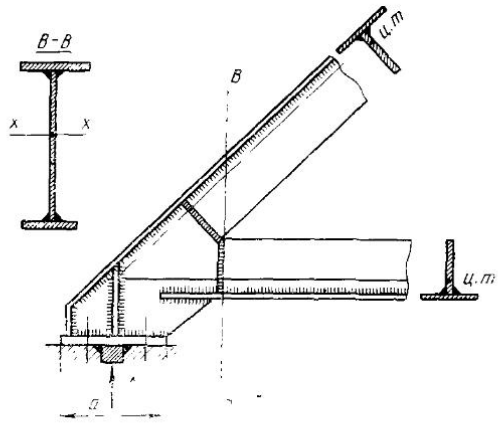


Рис. 18-10. Пример опорного узла стропильной фермы

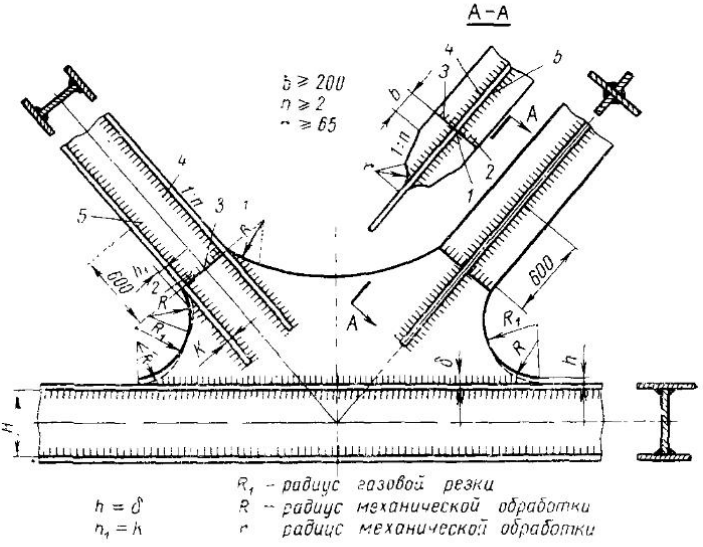


Рис. 18-11. Пример узла фермы железнодорожного моста

§ 7. СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ФЕРМ

Трубчатый узел Ленинградской башни телецентра высотой $h=316$ *м* изображен на рис. 18-12. Соединение элементов решетки с вертикальными поясами башни производилось с помощью торцовых листов *1*. Последние приваривались к трубам и косынкам на заводе угловыми швами. Косынки *2* приваривались также в заводских условиях. Монтажные соединения выполнены на болтах. Стык пояса на монтаже собирался с помощью фиксаторов. На заводе фиксаторы сверлились и приваривались к каждой из стыкуемых труб с учетом оставления необходимого зазора. На монтаже производилась сборка фиксаторов на болтах, а затем сваривались стыки труб на подкладных кольцах.

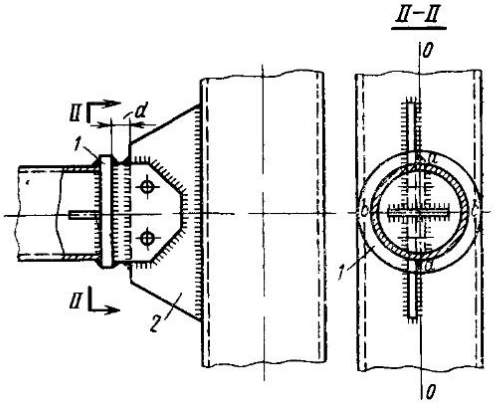


Рис. 18-12. Монтажный узел башни телецентра

На рис. 18-13 изображены различные узлы трубчатых стержней, применяемых в фермах. Узлы предназначены для легких ферм. В некоторых из них допущены небольшие эксцентриситеты. Для усиления узлов поставлены накладки, ребра жесткости. Оригинальна последняя из конструкций, показанная на рис. 18-13. Элементы прикрепляются к сфере, формирующей узел.

Другая группа узлов показана на рис. 18-14. В местах соединений некоторые трубы раскосов сплющиваются, это упрощает сборочно-сварочные операции.

На рис. 18-15 приведен пример плоско-сворачиваемой фермы. Каждый из стержней сварен роликовой сваркой из двух тонкостенных полос (разрез *1—1*, рис. 18-15, *а*). После сборки и нагнетания между полосами воздуха при повышенном давлении плоские элементы фермы раздуваются (разрез *2—2*, рис. 18-15, *б*). Такие фермы имеют ряд преимуществ: преодолеваются ограничения при перевозке ферм большого пролета и высоты, сокращается объем монтажной сварки. Но пока еще такое предложение находится в стадии экспериментальной разработки. Для его производственного осуществления необходимо создать рациональные конструктивные формы узлов, проверить их прочность, исследовать деформации ферм при раздувании.

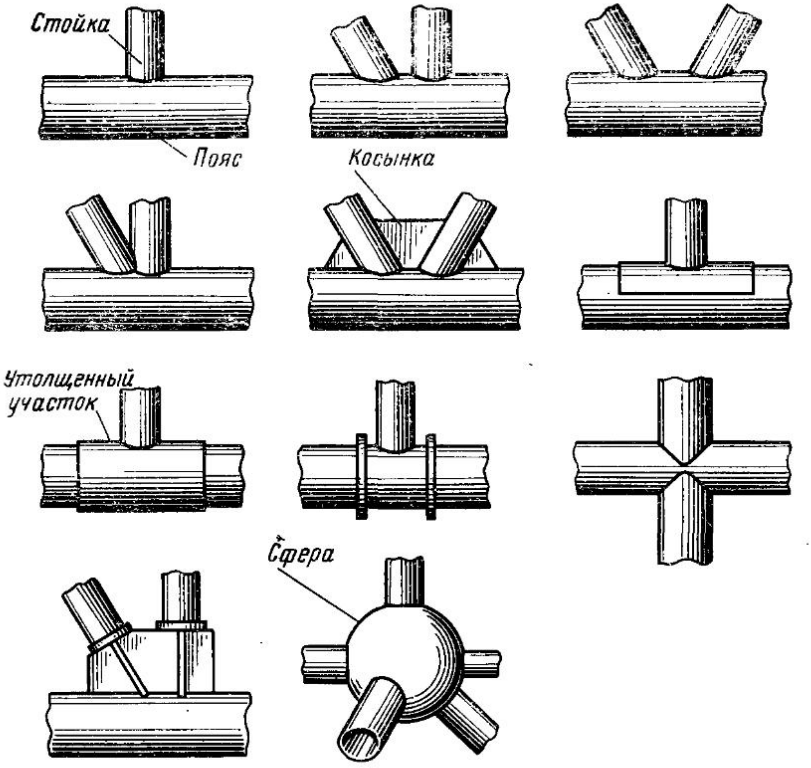


Рис. 18-13. Узлы трубчатых стержней разных типов

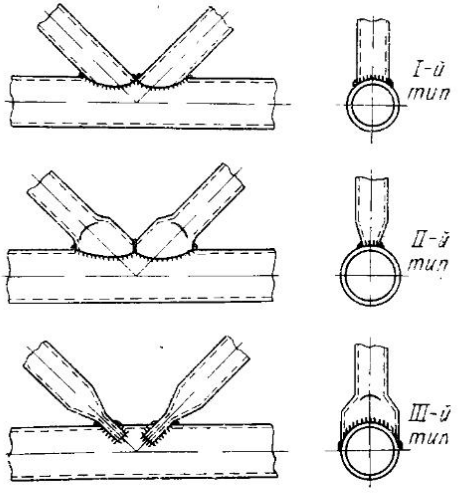


Рис. 18-14. Узлы трубчатых стержней со сплющиванием труб

На рис. 18-16 показана ферма, имеющая тонкостенные трубчатые поперечные сечения элементов из гнутых профилей. Для увеличения их жесткости предусмотрены гофры. Каждый стержень составлен из двух гнутых половин, соединенных между собой двумя продольными связующими швами. По длине элементы сварены встык, узлы сконструированы втавр. Жесткие элементы верхнего пояса работают на момент.

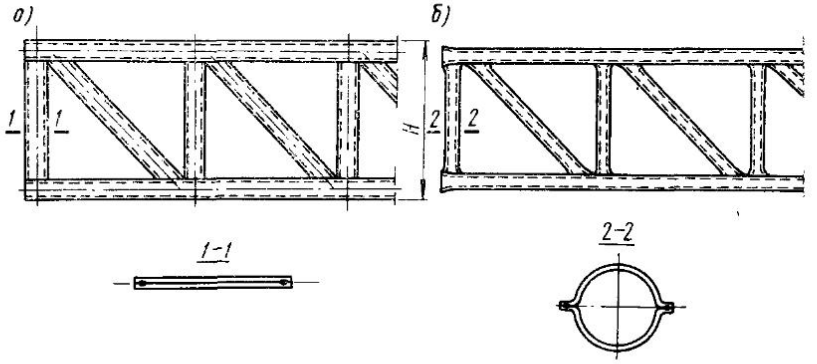


Рис. 18-15. Примеры узлов плоскосворачиваемой фермы:
а) в плоском состоянии; *б*) в раздутом виде

На рис. 18-17 приведен узел арматурной фермы из стержней периодического профиля. В узле соединения раскосов и стоек с поясом усилены треугольными косынками жесткости. На рис. 18-18 дано несколько примеров арматурных узлов из стержней гладкого профиля. Приведены (в процентах) показатели относительной прочности узлов: за 100% принята прочность верхнего узла на фасонках.

§ 8. СТЫКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ПОЯСОВ

Стыковые соединения поясов ферм подразделяют на три вида:

1) технологические; их применяют, если отсутствуют элементы требуемой длины; эти соединения следует конструировать равнопрочными с целым элементом, так как положение их не всегда возможно определить заранее;

2) конструктивные; их применяют для изменения поперечного сечения пояса от панели к панели; положение конструктивных стыковых соединений задано проектантом, поэтому расчет прочности можно производить по действующему расчетному усилию;

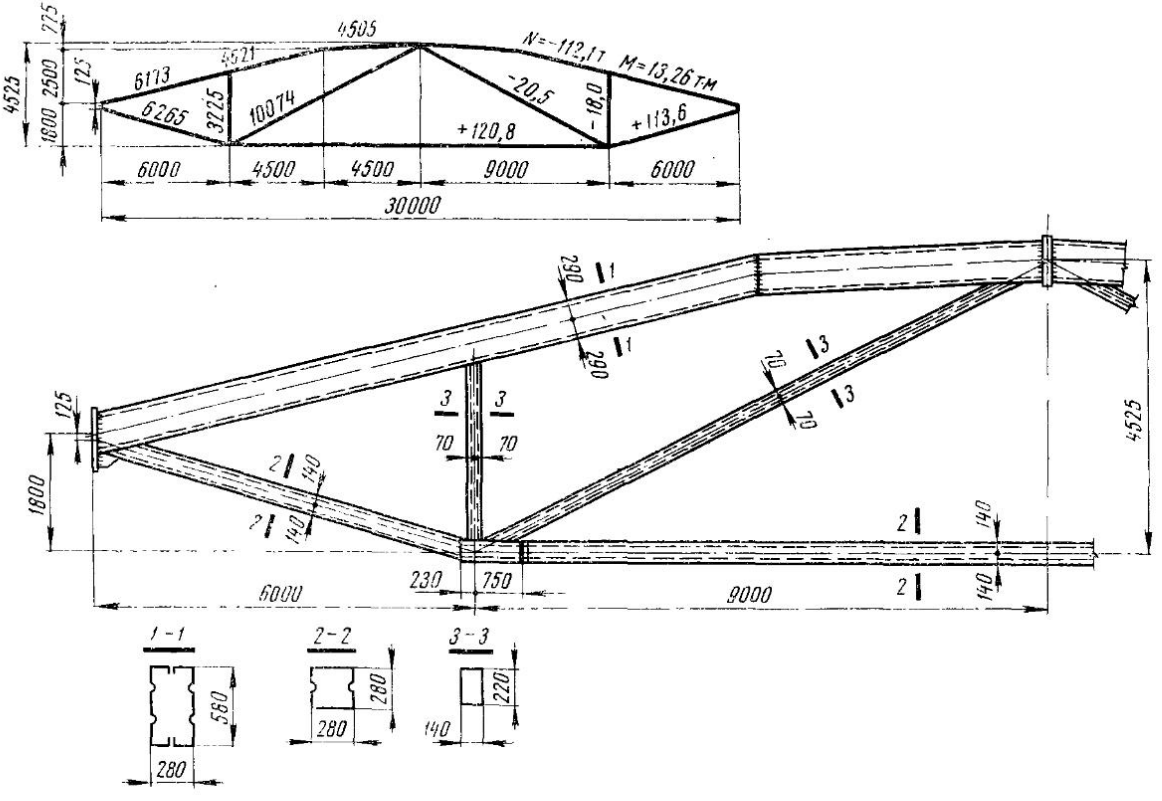


Рис. 18-16. Стропильная ферма из гнутых элементов

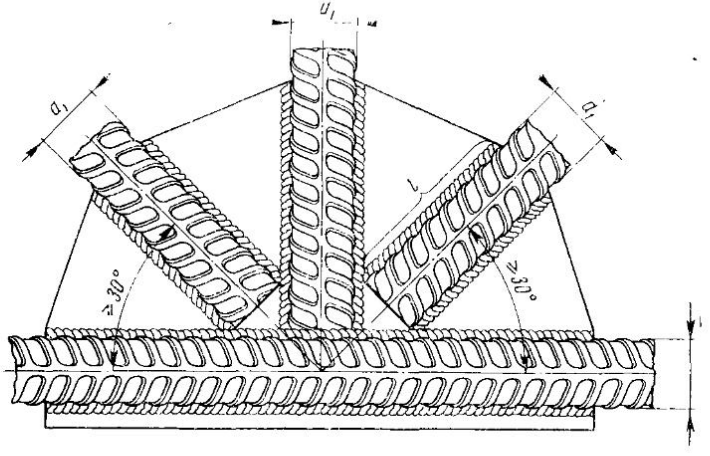


Рис. 18-17. Узел стержней арматуры периодического профиля

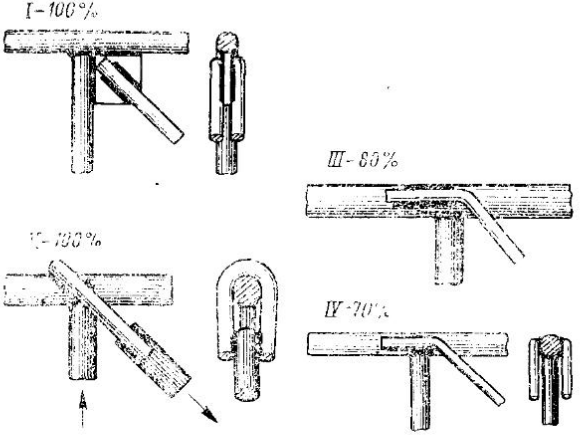


Рис. 18-18. Узлы стержней арматуры гладкого профиля. Относительная прочность сварных соединений с дополнительными конструктивными элементами

их располагают в элементе на расстоянии $1/2 \div 1/5$ длины панели от узла;

3) монтажные; их назначают в зависимости от условий транспорта и наличия подъемно-транспортных средств на строительстве.

При монтаже элементы предварительно собирают на болтах или струбцинах; после этого производят сварку соединений. Положение монтажных стыковых соединений всегда назначается проектантом. Примеры стыковых соединений элементов ферм приведены на рис. 18-19.

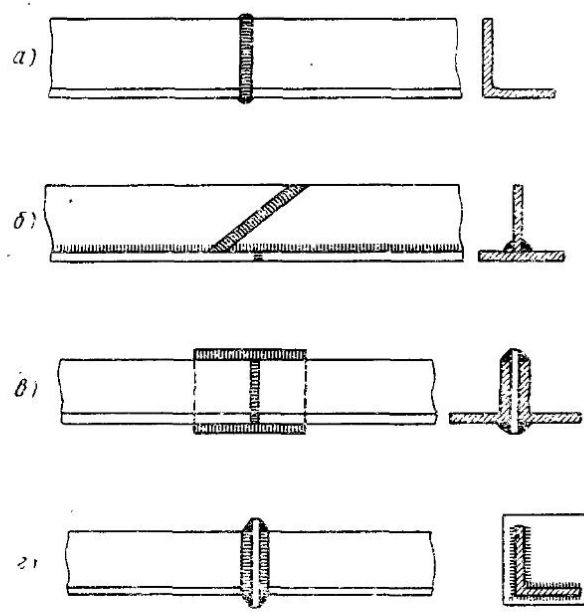


Рис. 18-19. Стыки поясов фермы

Наиболее целесообразны соединения, сваренные встык прямыми и косыми швами (рис. 18-19, *а, б*). Эти типы соединений могут быть рекомендованы не только для уголковых и тавровых профилей, но и для Н-образных, П-образных и других разновидностей поперечных сечений.

Указанные типы стыковых соединений применяют при работе элементов на растяжение и сжатие, в особенности при динамических нагрузках.

Для соединений поясов легких ферм в растянутых элементах можно допустить конструкции соединений, приведен-

ные на рис. 18-19, *в*, а в сжатых — конструкции, приведенные на рис. 18-19, *г*.

Расчет прочности стыков производится согласно общим правилам расчета сварных соединений, изложенным в гл. IV.

В настоящее время ведутся различные разработки по дальнейшему улучшению конструкций ферм. В целях уменьшения их веса проектируют системы ферм из алюминиевых сплавов, внедряют углеродистые и низколегированные термообработанные

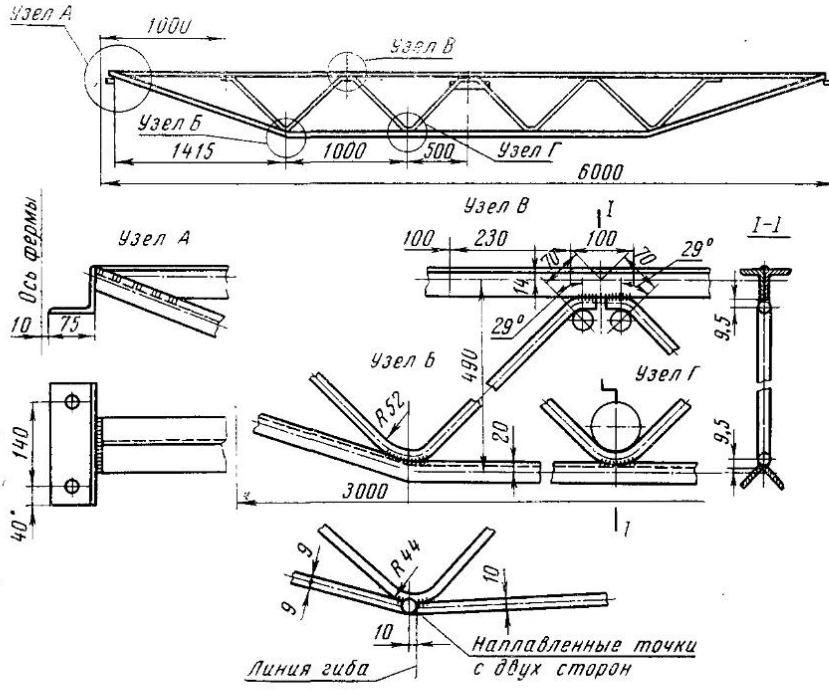


Рис. 18-20. Конструкция сварной легкой фермы с прутковыми раскосами

стали. Применяют предварительно напряженные конструкции. Для этого с помощью затяжек образуют в элементах усилия, обратные по знаку тем, которые возникают в конструкции в процессе ее эксплуатации. Указанные мероприятия позволяют значительно снизить вес ферм.

§ 9. СВАРНЫЕ ЛЕГКИЕ ПРУТКОВЫЕ ФЕРМЫ

В строительной промышленности при изготовлении прогонов междуэтажных перекрытий, кровель и т. п. применяют легкие фермы из круглой стали, называемые прутковыми. На рис. 18-20

приведен пример легкой фермы. В ней верхние и нижние пояса сконструированы из уголков легкого профиля, раскосы — из прутков. Узлы сварены дуговой сваркой вручную.

Фермы указанного типа обладают малым весом, требуют незначительного объема сварочных работ и экономичны, но могут быть рекомендованы лишь для работы под статическими нагрузками. В этих фермах целесообразно применение точечных соединений, которые обеспечивают хорошие свойства соединений круглой стали с плоской.

§ 10. ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ФЕРМ

Алюминиевые сплавы могут быть рекомендованы для ферм, требующих предельного сокращения веса, например, для стрел подъемных кранов, сборно-разборных мостов, гидротехнических

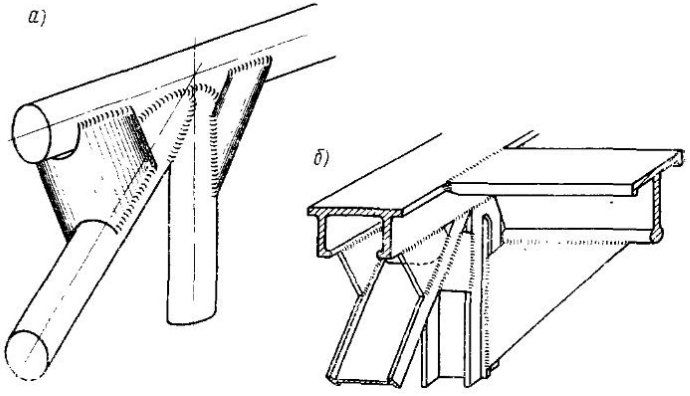


Рис. 18-21. Узлы из алюминиевых сплавов

затворов и т. п., для объектов, работающих в условиях агрессивных сред и некоторых типов перекрытий.

Важным преимуществом сварных алюминиевых ферм является их хорошая сопротивляемость ударным нагрузкам вне зависимости от понижения окружающих температур. Недостатком алюминиевых ферм, по сравнению со стальными, является повышенная величина прогибов при нормальном использовании расчетных напряжений и малое значение коэффициентов φ при подборе сечений элементов, работающих на сжатие. При изготовлении ферм из алюминиевых сплавов применяют гнутые элементы, полученные прокаткой, прессованием, выдавливанием

и другими способами. Как правило, конструкции ферм сваривают дуговой сваркой (аргонодуговой, под флюсом), реже — контактной. Для обеспечения плотности соединений и улучшения антикоррозионных свойств иногда применяют склейку.

На рис. 18-21, *а, б* приведены примеры узлов без косынок с широким использованием соединений встык и втавр.

§ 11. ПРИМЕР РАСЧЕТА АЛЮМИНИЕВОЙ ФЕРМЫ

Разработать конструкцию фермы из сплава АМг-6 пролетом 12 *м* по схеме, изображенной на рис. 18-22, *а*. Высота фермы $h=1$ *м*, длина панели $d=1$ *м*, $\alpha=45°$, $P=0{,}8$ *т*.

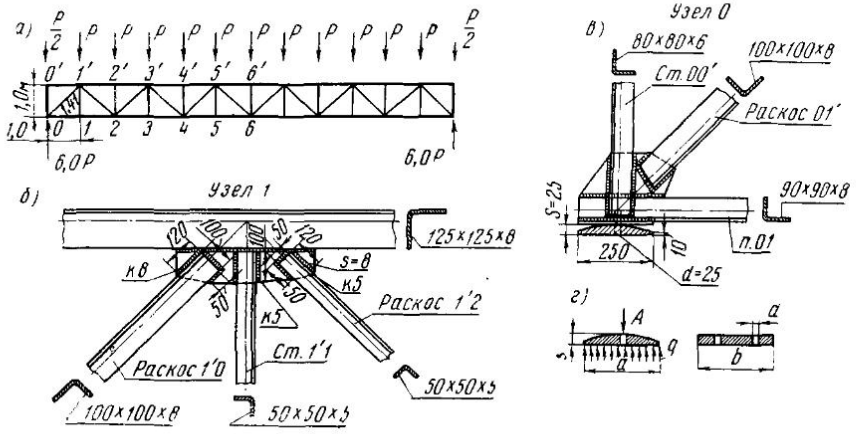


Рис. 18-22. Примеры расчетов фермы из алюминиевого сплава:
а) схема фермы; *б)* узел верхнего пояса; *в)* опорный узел; *г)* опорная плита

Определяем расчетные усилия, пользуясь методом разрезания фермы и отсечения отдельных узлов. Значения расчетных усилий приведены в табл. 18.2.

Согласно нормам строительного проектирования расчетное сопротивление R для этой марки сплава — 14 *кГ/мм*^{2}. Чтобы перейти к цифрам допускаемых напряжения, следует R разделить на коэффициент перегрузки n, который принимаем равным 1,1, и умножить на коэффициент условия работы $m=0{,}8$. Таким образом,

$$[\sigma]_p = \frac{14 \cdot 0{,}8}{1{,}1} = 10{,}18 \ кГ/мм^2.$$

Принимаем следующие размеры уголков для стержней фермы, *мм*:

Таблица 18.2

Величины расчетных усилий в стержнях алюминиевой фермы

Стержень	N, кГ	Стержень	N, кГ	Стержень	N, кГ
0'1'	0	*34*	+10800	*33'*	0
1'2'	— 8000	*45*	+14000	*55'*	0
2'3'	— 8000	*56*	+14000	*01'*	—6280
3'4'	—12800	*00'*	—400	*1'2*	+5140
4'5'	—12800	*22'*	—800	*23'*	—4000
5'6'	—14400	*44'*	—800	*3'4*	+2960
0 1	+ 4400	*66'*	—800	*45'*	—1710
1 2	+ 4400	*11'*	0	*5'6*	+ 570
2 3	+10800				

верхнего пояса ∠125×125×8;
нижнего пояса ∠90×90×8;
опорных стоек ∠80×80×6;
всех прочих стоек ∠50×50×5;
раскоса *01'* ∠100×100×8;
раскоса *23'* и *45'* ∠80×80×8;
раскосов *1'2*; *3'4*; *5'6* ∠50×50×5.

В табл. 18.3 приведены значения усилий геометрических характеристик сечений и расчетных напряжений в стержнях фермы. Значения φ взяты из табл. 15.1.

Таблица 18.3

Величины расчетных напряжений в стержнях фермы из АМг-6

Элемент	N, кГ	Состав сечения, мм	F, см²	r_{min}, см	l, см	l/r_{min}	φ	σ, кГ/см²
5'6'	—14400	125×125×8	19,7	2,49	100	40	0,77	—936
5 6	+14000	90×90×8	13,9					+1008
6'6	— 800	50×50×5	4,8	0,98	100	102	0,273	— 611
0 1'	—6280	100×100×8	15,6	1,98	141	71	0,45	— 895
1'2	+5140	50×50×5	4,8					+1071
23'	—4000	80×80×8	12,3	1,57	141	90	0,32	—1010
3'4	+2960	50×50×5	4,8					+ 617
4 5'	—1710	80×80×8	12,3	1,57	141	90	0,32	— 433
5'6	+ 570	50×50×5	4,8					+ 119

Расчет сварных соединений производится с учетом расчетного сопротивления для угловых швов при сварке сплава АМг-6, которое примем равным 900 *кГ/см²*. Допускаемое напряжение для угловых швов равно

$$[\tau'] = \frac{900 \cdot 0{,}8}{1{,}1} = 655 \ кГ/см^2.$$

Производим расчет сварных соединений в узле *1'* (рис. 18-22, *б*).

Раскос *1'О* прикреплен лобовым и фланговыми швами с расположением, обеспечивающим равномерное распределение напряжений в соединении. Полная длина швов, прикрепляющих этот раскос, составляет $L_1 = 12+5+10 = 27$ *см*.

Напряжение при катете шва $к = 8$ *мм* равно

$$[\tau] = \frac{6\,280}{0{,}7 \cdot 0{,}8 \cdot 27} = 415 \ кГ/см^2.$$

Полная длина швов, прикрепляющих раскос *1'2*, равна

$$12 + 5 + 5 = 22 \ см.$$

Напряжение в швах при $к = 5$ *мм*

$$\tau = \frac{5140}{0{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 22} = 667 \ кГ/см^2.$$

Расчетная длина двух фланговых швов, прикрепляющих стойку *6'6*, составляет $L = 10+4 = 14$ *см*. (За расчетную длину левого на рис. 18-22, *б* флангового шва принимаем 3/7 от длины правого шва, т. е. 4 *см*).

Напряжение в прикреплении стойки при катете шва $к = 5$ *мм* равно

$$\tau = \frac{800}{0{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 14} = 163 \ кГ/см^2.$$

Надставка приваривается к поясу фермы встык при двустороннем проваре шва, что позволяет получить соединения, равнопрочные основному металлу.

На рис. 18-22, *в* показана конструкция опорного узла *О* фермы, который также спроектирован с применением надставки. Опорная стойка *ОО'* состоит из уголка 80×80×6 *мм*, который приварен к уголку пояса втавр. Опорная плита стальная, ее длина — 250 *мм*. Опорное давление (рис. 18-22, *г*) уравновешивается равномерно распределенными усилиями под плитой $q = \frac{A}{a}$. Изгибающий момент на оси плиты равен

$$M = \frac{qa}{2} \cdot \frac{a}{4} = \frac{qa^2}{8} = \frac{Aa}{8}; \qquad (18.10)$$

$$M = \frac{6Pa}{8} = \frac{6 \cdot 800 \cdot 25}{8} = 15\,000 \ \kappa\Gamma \cdot см.$$

Ширину плиты принимаем $b = 12$ *см*, диаметр отверстия — 25 *мм*.

Момент сопротивления плиты равен

$$W = \frac{s^2(b-2d)}{6} = \frac{s^2\ (12-5)}{6} = 1{,}18\,s^2 \ см^3.$$

Принимаем $[\sigma]_р = 1500 \ \kappa\Gamma/см^2$, тогда

$$M = [\sigma]_р W = [\sigma]_р \cdot 1{,}18\,s^2,$$

откуда толщина плиты равна

$$s = \sqrt{\frac{15\,000}{1500 \cdot 1{,}18}} \approx 2{,}9 \ см.$$

§ 12. ПРИМЕР РАСЧЕТА СТАЛЬНОЙ ФЕРМЫ

Разработать конструкцию фермы из стали 15ХСНД при условиях, указанных в предыдущем примере. Расчетное сопротивление для стали 15ХСНД $[\sigma]_р = 2900 \ \kappa\Gamma/см^2$. Принимая коэффициент перегрузки равным 1,2, а коэффициент условий работы — 0,85, находим величину допускаемого напряжения

$$[\sigma]_р = \frac{2900 \cdot 0{,}85}{1{,}2} \approx 2100 \ \kappa\Gamma/см^2.$$

Усилия в элементах фермы указаны в табл. 18.4.

Таблица 18.4

Величины расчетных напряжений в стержнях фермы из стали 15ХСНД

Элемент	N, $\kappa\Gamma$	Состав сечения	F, $см^2$	r_{min}, $см$	l, $см$	l/r_{min}	φ	σ, $\kappa\Gamma/см^2$
5′6′	−14 400	100×100×5	9,75	2,0	100	50	0,84	−1760
5 6	+14000	75×75×5	7,25	1,49	100	67	—	+1931
6′6	— 800	50×50×4	3,84	0,99	100	101	0,45	— 462
0 1′	−6280	75×75×5	7,25	1,49	141	95	0,50	−1735
1′2	+5140	50×50×4	3,84	0,99	100	101	—	+1339
2 3′	−4060	75×75×5	7,25	1,49	141	95	0,50	−1120
3′4	+2960	50×50×4	3,84	0,99	141	143	—	+ 771
4 5′	−1710	50×50×4	3,84	0,99	141	143	0,24	−1855
5′6	+ 570	50×50×4	3,84	0,99	141	143	—	+ 149

Принимаем гнутые уголки следующих размеров (в *мм*) для стержней:

верхнего пояса $\angle 100\times100\times5$;
нижнего пояса $\angle 75\times75\times5$;
опорных стоек $\angle 75\times75\times5$;
прочих стоек $\angle 50\times50\times4$;
раскосов *O1′* и *23′* $\angle 75\times75\times5$;
прочих раскосов $\angle 50\times50\times4$.

Все соединения в узлах выполняются точечной контактной сваркой. Диаметры точки $d=1{,}5s+5$ *мм* $=1{,}5\cdot5+5=13$ *мм*.

Допускаемые напряжения при срезе принимаем для стали 15ХСНД

$$[\tau]' = 0{,}4\,[\sigma]_p = 0{,}4\cdot 2100 = 840\ кГ/см^2.$$

Допускаемые усилия на одну точку

$$T_1 = [\tau']\,\frac{\pi d^2}{4} = 840\,\frac{3{,}14\cdot 1{,}3^2}{4} = 1140\ кГ.$$

Производим расчет соединений в узле *1′* (рис. 18-23, *а*). Раскос *1′O* прикреплен к косынке точками с допускаемым усилием на каждую 1140 *кГ*. Усилия в раскосе *1′O* равны 6280 *кГ*. Определяем требуемое число точек для прикрепления

$$i = \frac{6280}{1140} = 5{,}6;$$

принимаем 6 точек.

Расстояния между точками $3d=3\cdot1{,}3=3{,}9$ *см*.

Расстояние от точки до края листа $2d=2{,}6$ *см*.

Раскос *1′2* имеет усилие 5140 *кГ*.

Требуемое число точек для его прикрепления

$$i = \frac{5140}{1114} = 4{,}6;$$

принимаем 5 точек.

Стойка *6′6* имеет усилие 800 *кГ*.

Требуемое число точек

$$i = \frac{800}{1114} = 0{,}7;$$

принимаем 4 точки из соображений рационального конструирования.

Усилие, сдвигающее косынку (накладку) относительно пояса:

$$T = (6280 + 5140)\,\sin 45^\circ = 8073\ кГ.$$

Число точек, прикрепляющих косынку к поясу,

$$i = \frac{8073}{1114} = 7{,}3;$$

принимаем 9 точек из соображений рационального конструирования.

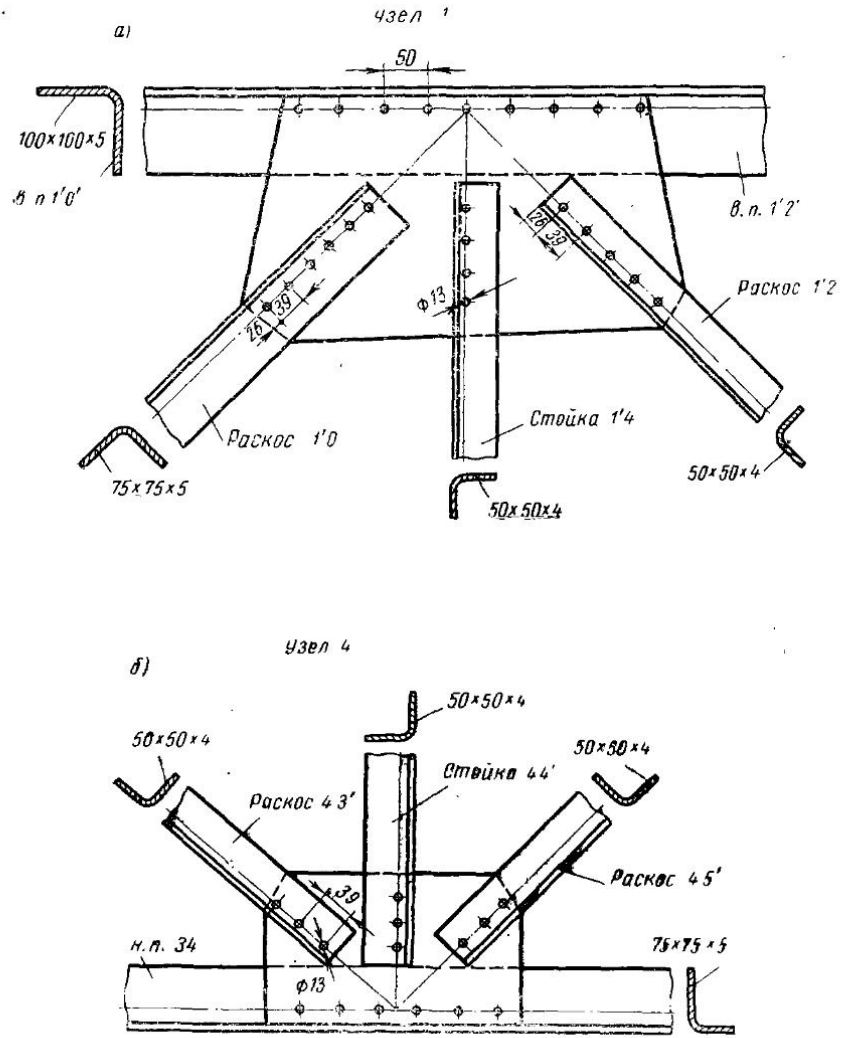


Рис. 18-23. Пример расчета фермы из стали 15ХСНД:
а) узел верхнего пояса; *б)* узел нижнего пояса

§ 13. ПРИМЕНЕНИЕ ПАЙКИ

До последнего времени паяные соединения применялись главным образом в приборо- и машиностроении. В настоящее время проводится разработка вопроса о пайке строительных конструкций, в частности мачтовых ферм для линий электропередачи.

Паяные соединения имеют некоторое преимущество перед сварными: пайка конструкций в печах более производительна, процессы механизированы. Качество паяных соединений высоко. Во многих случаях паяные соединения обладают меньшими концентраторами напряжений, чем сварные, например фланговые. При пайке можно производить соединения такого рода, вы-

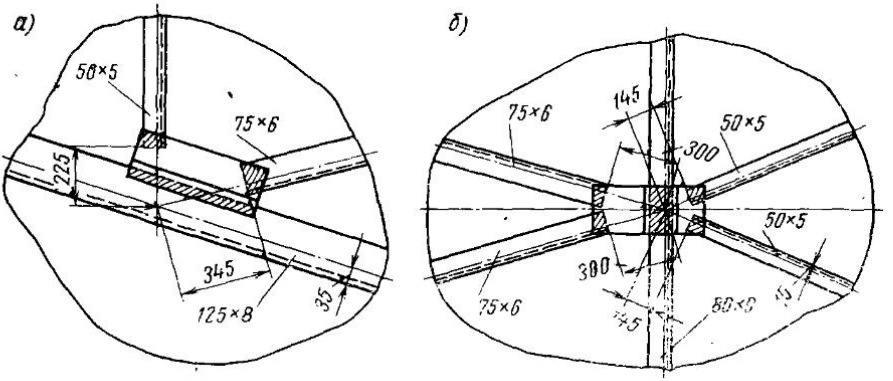


Рис. 18-24. Примеры паяных узлов мачтовой фермы

полнение которых при сварке затруднительно, например, соединения сотовых конструкций. При пайке широко используют соединения внахлестку.

На рис. 18-24, *а, б* изображены паяные узлы одной из мачтовых ферм. Сами швы показаны заштрихованными. Размеры площади спая легко изменяются в зависимости от величины расчетных усилий соединений.

Расчет прочности паяных швов в соединениях производится по формуле

$$\tau = \frac{P}{F} \leqslant [\tau'], \qquad (18.11)$$

где P — действующее усилие;

F — площадь паяного шва;

$[\tau']$ — допускаемое напряжение паяного шва, зависящего от припоя и технологического процесса.

Проведенные исследования подтвердили достаточно удовлетворительную работу паяных соединений при статических и усталостных нагрузках.

§ 14. ПРИМЕР РАСЧЕТА КРАНОВОГО МОСТА *

Требуется разработать сварную конструкцию кранового моста пролетом 24 *м*, грузоподъемностью 20,0 *Т*. Материал металлоконструкции — низколегированная конструкционная сталь 15ХСНД, допускаемое напряжение для нее $[\sigma]_р = 21$ *кГ/мм*^{2}.

Выбор схемы кранового моста. Главные фермы моста, по которым перемещается тележка с грузом, имеют параллельные пояса, около опор их высота понижается. Высота главных ферм с учетом необходимой жесткости в вертикальной плоскости h принимается равной $\frac{l}{12} = 2$ *м*; на опорах $h_0 = 1$ *м*; длина панели $d = 2$ *м*.

Параллельно главным фермам устанавливают фермы жесткости, которые имеют ту же схему, что и главные. Постановка ферм жесткости, соединенных с главными фермами, обеспечивает устойчивость последних. Расчет прочности кранового моста ведется в предположении, что полезная нагрузка от веса тележки с грузом передается только главным фермам.

В плоскостях верхних и нижних поясов главных ферм и ферм жесткости располагают продольные связи. Верхние и нижние связи имеют одинаковые схемы. Полагают, что верхние продольные связи воспринимают усилия, возникающие в мосте от динамических нагрузок. Нижние связи ставят для получения общей жесткости кранового моста в горизонтальной плоскости. Расстояние между поясами главных ферм и ферм жесткости (высота ферм связей) $h_2 = 1{,}8$ *м*. Расстояние между осями колес крана $n = \frac{l}{5} = 4{,}8$ *м*. Расстояние между главными фермами m определяется размером крановой тележки: принимаем $m = 2{,}2$ *м*. Общая схема кранового моста представлена на рис. 18-25. Между главными фермами *III* и фермами жесткости *I* предусматривается установка поперечных связей *IV* для повышения сопротивляемости моста скручиванию. Расчету прочности они не подлежат.

Определение расчетных нагрузок. Собственный вес одной главной фермы из стали Ст. 3 можно определить пред-

---

* Пример расчета кранового моста составлен по упрощенной схеме. Крановые мосты проектируются и рассчитываются согласно техническим условиям на проектирование мостовых кранов Всесоюзного научно-исследовательского института подъемно-транспортного машиностроения, изданным отделом технической информации (1960 г.), учитывающих все специфические условия работы кранов.

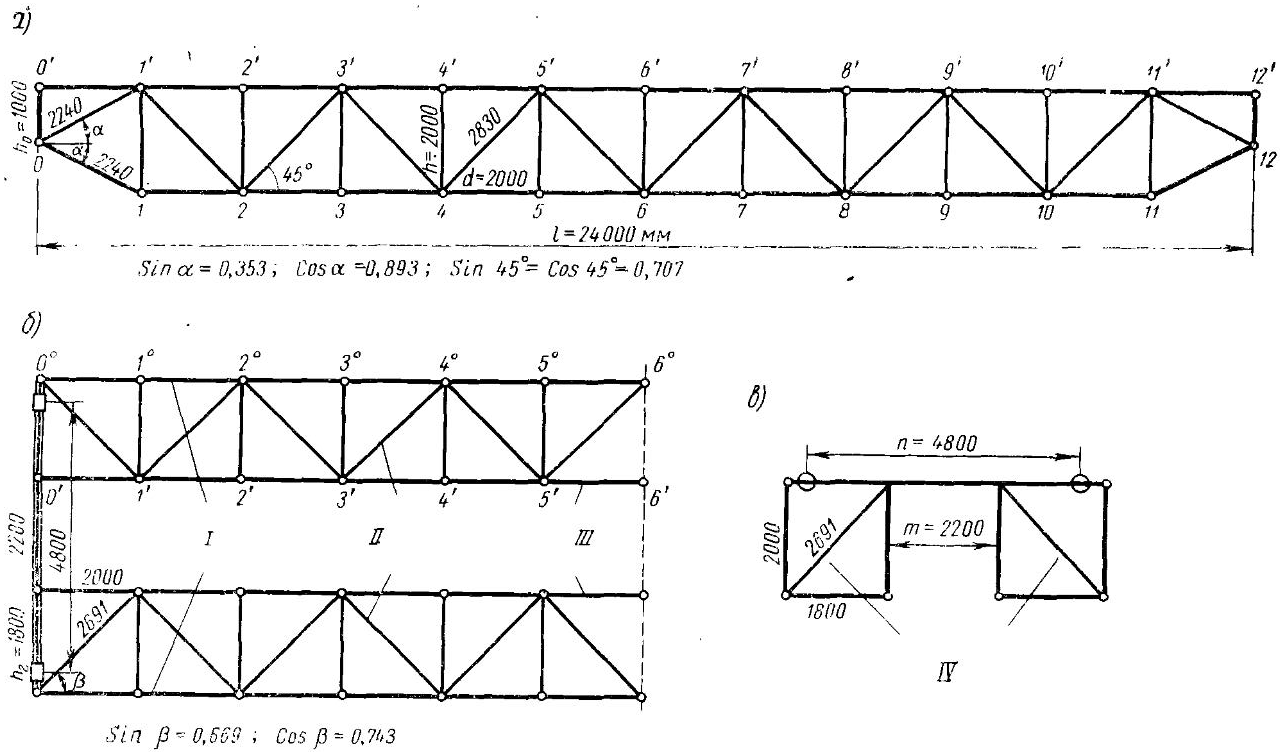


Рис. 18-25. Схема кранового моста:

а) главная ферма *(III)*; *б)* план моста и ферма жесткости *(I)*; *в)* поперечный разрез; *II* — продольные связи; *IV* — поперечные связи

варительно по справочникам или по следующей приближенной формуле:

$$P_1 = 0{,}01\, Q\,(l - 5) + 0{,}7\ ,$$

где Q — грузоподъемность моста, T;
l — пролет моста, $м$.

Таким образом, в данном случае

$$P_1 = 0{,}01 \cdot 20{,}0\,(24 - 5) + 0{,}7 = 4{,}5\ \ T.$$

При применении низколегированной стали вес конструкции окажется меньше, чем при стали Ст. 3, приблизительно на 20%.

Поэтому примем $P_1 = 0{,}8 \cdot 4{,}5 = 3{,}6\ T$.

Собственный вес одной фермы жесткости составляет около половины веса главной, т. е. $P_2 = 1{,}8\ T$.

Собственный вес одной продольной фермы связей может быть принят равным 1/3 веса главной, т. е.

$$P_3 = \frac{3{,}6}{3} = 1{,}2\ \ T.$$

Вес настила площадки примем $P_4 = 1{,}1\ T$.

Вес механизма передвижения — $P_5 = 3{,}7\ T$.

Каждая из двух главных ферм воспринимает постоянно действующую нагрузку, состоящую из ее собственного веса P_1, половины веса верхних и нижних продольных связей $2 \cdot \frac{P_3}{2}$, половины веса настила $\frac{P_4}{2}$ и половины веса механизма перемещения $\frac{P_5}{2}$.

Общая нагрузка на главную ферму будет

$$P_q = 3{,}6 + \frac{2 \cdot 1{,}2}{2} + \frac{1}{2} \cdot 1{,}1 + \frac{1}{2} \cdot 3{,}7 = 7{,}2\ \ T.$$

Равномерно распределенная нагрузка на 1 $м$ длины главной фермы составит

$$q = \frac{7{,}2}{24} = 0{,}3\ \ T/м.$$

Кроме того, на главную ферму в середине пролета передается половина веса моторного узла, равного 0,8 T

$$P_6 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}8 = 0{,}4\ \ T.$$

Определим полезную нагрузку, воспринимаемую главной фермой.

Вес тележки крана P_0 для заданной грузоподъемности равен 8,0 T, расстояние между ее осями $d = 2{,}0$ $м$, динамический

коэффициент поднимаемого груза, равного 20,0 T, принимаем 1,2. Поэтому сила, действующая на каждое из четырех колес тележки, равна

$$P' = \frac{8{,}0 + 1{,}2 \cdot 20{,}0}{4} = 8{,}0 \ T.$$

При отсутствии динамического коэффициента $P = \frac{8{,}0 + 20{,}0}{4} = 7{,}0 \ T.$

Найдем нагрузку, передаваемую на верхние продольные фермы связи. Последние воспринимают горизонтальные усилия при торможении крана. Эти усилия определяются умножением величин весов крана, тележки и поднимаемого груза на коэффициент 0,1.

От P_q горизонтальная равномерно-распределенная нагрузка q на ферму связей равна

$$q_г = 0{,}1q = 0{,}1 \cdot 0{,}3 = 0{,}03 \ T/м.$$

От узла электродвигателя сосредоточенная горизонтальная сила в узле 6 составит

$$P_6 = 0{,}1 P_6 = 0{,}1 \cdot 0{,}4 = 0{,}04 \ T.$$

От тележки и полезного груза P горизонтальная сила прикладывается в месте нахождения каждого из колес тележки

$$P_г = 0{,}1 \cdot \frac{8{,}0 + 20{,}0}{4} = 0{,}7 \ T.$$

(Динамический коэффициент 1,2 не учитывается).

Каждая из вертикальных ферм жесткости воспринимает нагрузку: от собственного веса P_2, половину веса верхних и нижних продольных связей $2 \cdot \frac{P_3}{2}$, половину массы настила $\frac{1}{2} P_4$ и половину массы механизмов $\frac{1}{2} P_5$.

Общая нагрузка на ферму жесткости равна

$$P'_q = 1{,}8 + 2\,\frac{1{,}2}{2} + \frac{1}{2}\ 1{,}1 + \frac{1}{2}\ 3{,}7 = 5{,}4 \ T.$$

Равномерно распределенная нагрузка на 1 $м$ длины фермы жесткости составит

$$q' = \frac{5{,}4}{24} = 0{,}22 \ T/м.$$

В середине пролета на ферму жесткости передается половина веса моторного узла $P_6 = 0{,}4\ T$.

Определение усилий в стержнях главной фермы. Определение усилий в стержнях ферм может быть произведено разными способами. Наиболее целесообразно в данном случае применить метод линий влияния, поскольку вычисляются усилия от грузов, перемещающихся по пролетам. Схема фермы представлена на рис. 18-26, *а*. Все стержни по этой схеме

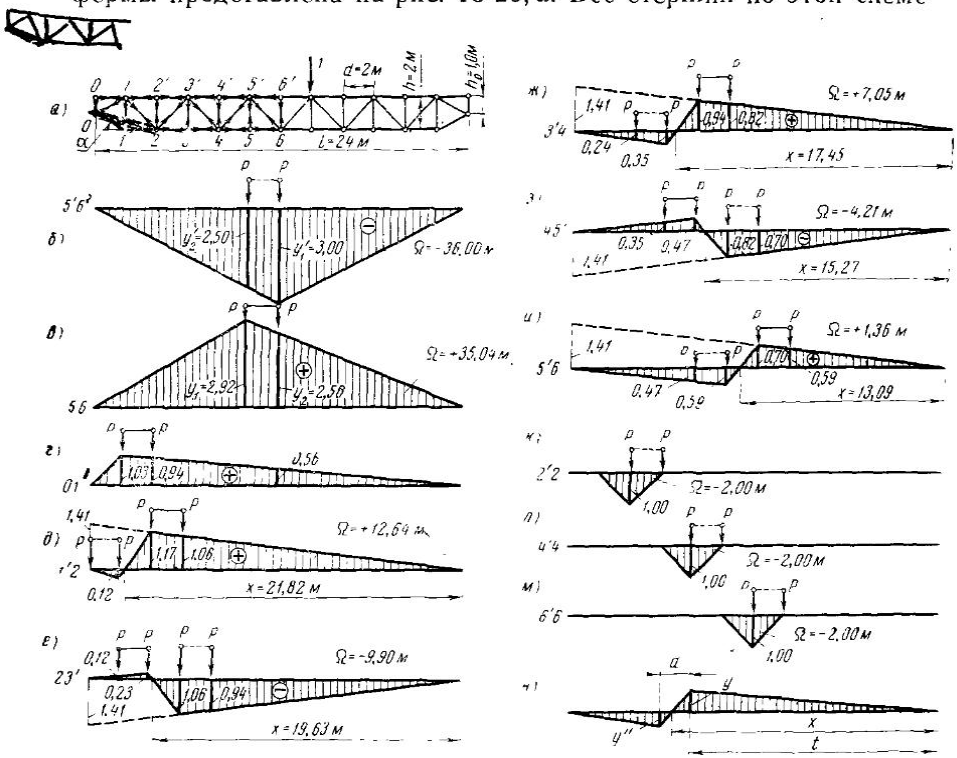


Рис. 18-26. К определению усилий методом линий влияния. Сплошными линиями показаны положения крановой тележки над положительными ординатами линий влияния усилий в стержнях главной фермы, пунктирными — над отрицательными

условно показаны растянутыми (стрелки от узлов). Отрицательные значения вычисленных усилий указывают на наличие сжатия.

Построим линии влияния усилия для средней панели *5′6′* верхнего пояса главной фермы. Линии влияния поясов для ферм рассматриваемого типа имеют треугольные очертания. Для па-

нелей *5'6'* линия влияния имеет вид треугольника, как указано на рис. 18-26, *б*. Моментной точкой является узел *6*.

Ордината линии влияния находится путем умножения величины реакции A при нахождении единичного груза в узле *6'* (эта реакция равна 0,5) на $6d$ и деления на высоту фермы h. Таким образом, для стержня *5'6'* ордината линии влияния равна

$$y_1' = 0{,}5 \cdot \frac{6 \cdot 2{,}0}{2{,}0} = 3{,}0.$$

Аналогичным путем находим ординату линии влияния стержня *5 6* нижнего пояса (рис. 18-26, *в*). Его моментная точка находится в узле *5'*. Ордината линии влияния *5 6* равна реакции A при нахождении груза в узле *5'*, умноженной на $5d$ и деленной на h,

$$y_1 = 1 \cdot \frac{14}{24} \cdot \frac{5 \cdot 2{,}0}{2{,}0} = 2{,}92.$$

Построение линии влияния для других панелей поясов в данном случае не имеет смысла, так как при сравнительно небольшом пролете фермы изменять сечения поясов по их длине не следует.

Линия влияния стержня *O1* имеет треугольное очертание (рис. 18-26, *г*). Ее высота $y = Ad/h \cos\alpha$, где $A = 0{,}92$; $\cos\alpha = 0{,}893$. Поэтому

$$y = \frac{0{,}92 \cdot 2}{2 \cdot 0{,}893} = 1{,}03.$$

Для построения линии влияния усилия наиболее нагруженного раскоса *1'2* (рис. 18-26, *д*) поступают следующим образом. При нахождении единичного груза справа от рассматриваемой панели (второй) усилие в раскосе *1'2* равно $A/\sin 45°$. Линия влияния имеет ординату, равную 1,41 на левой опоре. При нахождении груза слева от указанной панели усилие в раскосе *1'2* равно $-\frac{B}{\sin 45°}$ и определяется прямой с ординатой 1,41 на правой опоре. Между узлами *1'* и *2'* линия влияния имеет характер прямой. Как следует из рис. 18-26, *д*, наибольшая по абсолютной величине положительная ордината линии влияния +1,17, отрицательная — 0,12.

С помощью аналогичных рассуждений строят все прочие линии влияния усилий раскосов *23'*; *3'4*; *45'*; *5'6* (рис. 18-26, *е*, *ж*, *и*). Усилия в стойках *2'2*; *4'4*; *6'6* образуются при нагружениях панелей верхнего пояса, примыкающих к соответствующим узлам.

Стойка *2'2* (рис. 18-26, *к*) работает лишь при нахождении единичного груза в панелях *1'2'* или *2'3'*. При нахождении груза,

равного 1, в узле *2′* усилие в стойке *2′2* равно —1. При нахождении указанного груза в узле *1′* или левее его, а также в узле *3′* или правее его усилие в стойке *2′2* равно 0. Поэтому линия влияния усилия *2′2* имеет очертание треугольника с высотой, равной 1, в узле *2′* и длиной, равной $2d$. Аналогично строят линии влияния усилий в стойках *4′4* и *6′6* (рис. 18-26, *л, м*). Стойки *3′3* и *5′5* являются нерабочими и испытывают совершенно незначительные усилия от собственного веса и веса панелей нижнего пояса, примыкающих к узлам. Эти усилия ввиду их малости можно вовсе не учитывать.

Линию влияния стойки *1′1* легко построить из рассмотрения равновесия узла *1* (рис. 18-26, *а*).

В раскрытой форме $\Sigma Y = 0$ напишется так:

$$O1 \sin\alpha + 11' = 0,$$

откуда

$$11' = -O1 \sin\alpha,$$

где

$$\sin\alpha = 0{,}353.$$

Таким образом, усилие в стойке *11′* равно 0,353 от усилия в поясе *O1′*, но обратно ему по знаку. Линия влияния *O1* имеет очертание, показанное на рис. 18-26, *г*. Усилие в стержне *O1′* находится проектированием всех сил в узле *O* на горизонтальную ось $\Sigma X = 0$. Откуда следует, что $O1' = -O1$. Усилие в раскосе *O1* равно по величине и обратно по знаку *O1′*.

Построив линии влияния для основных интересующих нас стержней главной фермы, укажем путь определения расчетных усилий от заданных нагрузок. Как известно, усилие от любого загружения может быть найдено по следующему соотношению (14.3):

$$N = \Sigma y_i P_i + q\Omega,$$

где P_i — величины сосредоточенных грузов, *T*;

y_i — ординаты линии влияния под сосредоточенными грузами;

q — равномерно распределенная нагрузка, *T/м*;

Ω — площадь, ограниченная линией влияния, соответствующая длине загруженного участка фермы, *м*.

Для определения расчетных усилий в стержнях фермы над каждой линией влияния устанавливают тележки так, чтобы они вызывали в рассматриваемом элементе максимальные усилия. Одно из колес тележки будем располагать над вершиной треугольной линии влияния, другое — со стороны соседней бо́льшей ординаты. Установки тележки над положительными участками

линии влияния показаны сплошными линиями, а над отрицательными — пунктирными (рис. 18-26). Над двузначными линиями влияния производят две установки тележки в целях определения наибольшей положительной растягивающей силы и наибольшей отрицательной сжимающей.

Площадь, ограниченная линией влияния, вычисляется по формуле

$$\Omega = \frac{yx}{2},$$

где y — наибольшая ордината линии влияния в рассматриваемом участке;

x — длина линии влияния.

Пояса имеют $x = l$. Величины x для линий влияния раскосов находят из соотношения (рис. 18-26, *и*)

$$x = t + d\,\frac{y}{y+y''}.$$

В графах 2—4 табл. 18.5 приведены значения положительных ординат линии влияния, в графах 5—7 — отрицательных. Умножением Σy и $\Sigma y'$ на P (величина нагрузки на колесо тележки) получаем расчетные усилия в стержнях от полезной нагрузки.

В графах 8 и 9 указаны длины положительных и отрицательных участков линии влияния, а в графах 10—12 — величины положительных и отрицательных их площадей. Умножением Ω сумм (для элементов, имеющих двузначные линии влияния) на интенсивность загружения q вычисляем расчетные усилия от равномерного нагружения всего крана. Умножением $y_l/_2$ на величину P_6 находим усилие, вызываемое весом мотора.

В графах 2—5 табл. 18.6 приведены усилия от q, ΣP, P_6, в графах 6—7 — большее и меньшее усилия (по абсолютной величине, взятое со своим знаком).

Коэффициент r в колонке 8 выражает отношение $\frac{N_{min}}{N_{max}}$.

В графах 9 приведены значения коэффициента понижения допускаемых напряжений в основном металле в зоне сварных соединений γ.

Как известно из гл. X, коэффициент может быть принят равным для крановых конструкций

$$\gamma = \frac{1}{0{,}6K_э \pm 0{,}2 - (0{,}6\,K_э \mp 0{,}2)\,r}.$$

Он зависит от величины эффективного коэффициента концентрации напряжения $K_э$. Следует выбирать такие конструктивные формы, в которых бы коэффициент $K_э$ по возможности приближался к единице. Для подбора сечений основных элементов

Таблица 18.5

Определение ординат и площадей линий влияния стержней вертикальных ферм

Стержень	y_1	y_2	Σy	y_1'	y_2'	$\Sigma y'$	x, м	$l-x$	Ω, м	$\Omega_м'$	$\Omega_{сумм}$	$y_{l/2}$
5′6′				−3,00	−2,50	−5,50	24			— 36,0	−36,00	−3,00
0 1	+1,03	+0,94	+1,97				24		+12,36		+12,36	+0,56
5 6	+2,92	+2,50	+5,42				24		+35,04		+35,04	+2,50
2 2′ и *4 4′*				−1,00	0	−1,00	4			−2,00	−2,00	0
6 6′				−1,00	0	− 1,00	4			−2,00	−2,00	− 1,00
1′2	+1,17	+1,06	+2,23	−0,12		−0,12	21,82	2,18	+12,76	−0,13	+12,63	+0,70
2 3′	+0,23	+0,12	+0,35	−1,06	−0,94	−2,00	19,63	4,37	+0,50	−10,40	−9,90	−0,70
3′4	+0,94	+0,82	+1,76	−0,35	−0,24	−0,59	17,45	6,55	+8,20	−1,15	+7,05	+0,70
4 5′	+0,47	+0,35	+0,82	−0,82	−0,70	−1,52	15,27	8,73	+2,05	−6,26	− 4,21	−0,70
5′6	+0,70	+0,59	+1,29	−0,59	−0,47	−1,06	13,09	10,91	+4,58	−3,22	+1,36	+0,70

Примечание:

y — ординаты линии влияния; отвлеченные числа (на участках, соответствующих растяжению, принимается знак «+», а соответствующих сжатию — знак «−»;

x — длина участка линии влияния;

Ω — площадь, ограниченная линией влияния на участке одного знака, м;

$\Omega_{сумм}$ — площадь, ограниченная линией влияния на всей длине фермы, м.

Таблица 18.6

Определение допускаемых напряжений в стержнях главных ферм

Стержень	$q\Omega$, T	$P\Sigma y'$, T	$P\Sigma y'$, T	$P_б \cdot y_{l/2}$, T	N_{max}, T	N_{min}, T	r	γ	$\gamma \cdot [\sigma]_р$, $кГ/мм^2$
5'6'	—10,80		—44,0	—1,20	—56,00	—12,00	+0,22	1,00	21
0 1	+3,71	+15,76	—	+0,22	+19,69	+3,93	+0,20	1,00	21
5 6	+10,51	+43,36	—	+1,00	+54,87	+11,51	+0,21	1,00	21
2 2'									
4 4'	—0,6	—	—8,00	0	—8,60	+0,6	+0,07	1,00	21
6 6'	—0,6		—8,00	—0,4	—9,00	—1,0	+0,11	1,00	21
1 1'	—	—	—	—	—6,95	—1,39	+0,2	1,00	21
0 1'	—	—	—	—	—19,69	+3,93	+0,20	1,00	21
1'2	+3,79	+17,84	—0,96	+0,28	+21,91	+3,11	+0,14	1,00	21
2 3'	—2,97	+2,80	—16,00	—0,28	—19,25	—0,45	—0,02	0,97	20,3
3'4	+2,11	+1,41	—4,72	+0,28	+16,47	—2,33	—0,14	0,89	18,7
4 5'	—1,26	+6,56	—12,16	—0,28	—13,70	+5,02	—0,37	0,78	16,4
5'6	—0,41	+10,32	—8,48	+0,28	+11,01	—7,79	—0,70	0,68	14,3

Примечание.

γ — коэффициент понижения допускаемых напряжений при переменных нагрузках;
усилие $1'1 = 0{,}1 \sin\alpha = 0{,}1 \cdot 0{,}353$; $q = 0{,}3$ $T/м$; $P = 8{,}0$ T; $P_б = 0{,}4$ T.

кранового моста предварительно примем $K_э = 1{,}4$. Такие значения для $K_э$ следует принимать для конструкций из низколегированных сталей при соединениях встык с обработкой швов. В процессе разработки конструкции прочность в отдельных узлах будет проверяться не только при указанном, но и при других значениях $K_э$.

В сжатых стержнях поясов фермы

$$N_{max} = q\Omega + \Sigma P y' + P_6 y_{l/2};\ N_{min} = q\Omega + P_6 y_{l/2}.$$

В растянутых стержнях поясов фермы

$$N_{max} = q\Omega + \Sigma P y + P_6 y_{l/2};\ N_{min} = q\Omega + P_6 y_{l/2}.$$

В раскосах с наибольшим усилием сжатия

$$N_{max} = q\Omega + \Sigma P y' + P_6 y_{l/2};$$
$$N_{min} = q\Omega + \Sigma P y + P_6 y_{l/2}.$$

В раскосах с наибольшим усилием растяжения

$$N_{max} = q\Omega + \Sigma P y + P_6 y_{l/2};$$
$$N_{min} = q\Omega + \Sigma P y' + P_6 y_{l/2}.$$

Таблица 18.7

Определение усилий в стержнях ферм жесткости

Стержень	$q'\Omega$, T	$P_6 y_{l/2}$, T	N, T
5′6′	−7,92	−1,20	−9,12
0 1	+2,67	+0,22	+2,89
5 6	+7,70	+1,00	+8,70
2 2′ и *4 4′*	−0,44	0	−0,44
6 6′	−0,44	−0,4	−0,84
1′2	+2,78	+0,28	+3,06
2 3′	+2,18	−0,28	−2,46
3′4	−1,55	+0,28	+1,83
4 5′	−0,93	−0,28	−1,21
5′6	+0,44	+0,28	+0,72

$q' = 0{,}22\ T/м$; $P_6 = 0{,}4\ T$; $N = q'\Omega + y_{l/2} P_6$ (площади $\Omega_{сумм}$ взяты из табл. 18.5, произведения $y_{l/2} P_6$ — из табл. 18.6).

Например, в раскосе *1'2*

$$N_{max} = 3{,}79 + 17{,}84 + 0{,}28 = 21{,}91 \ T;$$

$$N_{min} = 3{,}79 - 0{,}96 + 0{,}28 = 3{,}11 \ T.$$

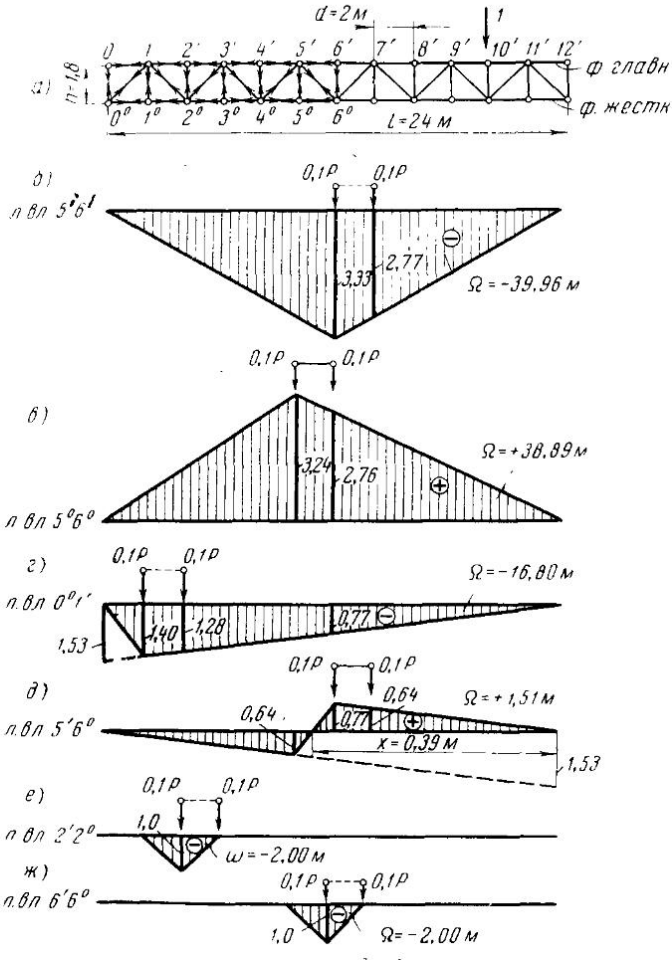


Рис. 18-27. К определению усилий методом линий влияния в стержнях горизонтальной фермы связи. Сплошными линиями показаны положения тележки над положительными ординатами, пунктирными — над отрицательными

Определение усилий в стержнях фермы жесткости. Схема фермы жесткости такая же, как и главной фермы. Поэтому линии влияния усилий в стержнях фермы жест-

кости оказываются такими же, как и для главной фермы. Для определения усилий в стержнях фермы жесткости надлежит использовать данные табл. 18.5.

Величины усилий в стержнях ферм жесткости приведены в табл. 18.7.

Определение усилий в стержнях фермы связей. Схема фермы связей представлена на рис. 18-27, *а*. На рис. 18-27, *б—ж* построены линии влияния для средних панелей поясов, а также некоторых раскосов и стоек.

Линии влияния усилий для горизонтальной фермы связей строят от единичной силы, направленной горизонтально, приложенной к узлам главной фермы. Величины усилий в стержнях ферм связи даны в табл. 18.8.

Каждая из двух верхних горизонтальных ферм связей кранового моста при торможении воспринимает усилия от веса его половины, равного вертикальным нагрузкам, передаваемым главной ферме и фермы жесткости. Этот вес составляет $7{,}2+5{,}2=12{,}4$ *Т*.

На 1 *м* длины $q_0 = \frac{12{,}4}{24} = 0{,}52$ *Т м*.

Усилия N_0 в стержнях фермы связей, приведенные в табл. 18.8, могут изменять свой знак на обратный, так как нагрузки при торможении и трогании с места направлены в противоположные стороны.

Как видно из рис. 18-26, *а* и 18-27, *а*, пояса фермы связей совмещены с поясами главной фермы и фермы жесткости. Это приводит к тому, что полные усилия в совмещенных поясах алгебраически складываются из усилий вертикальной и горизонтальной ферм. Поэтому полное усилие в верхнем поясе главной фермы составляет

$$5'6' = -56{,}0 - 6{,}48 = -62{,}48 \ T.$$

Полное усилие в верхнем поясе ферм жесткости равно

$$5'6' = -9{,}12 - 6{,}48 = -15{,}60 \ T.$$

Определение усилий в поясах главной фермы от изгиба. При расположении нагруженной тележки на панели верхнего пояса главной фермы последняя испытывает изгибающий момент (рис. 18-28). Элемент пояса при этом может приближенно рассматриваться как двухопорная балка, опертая по концам на прилегающие узлы фермы. Учитывая неразрезанность пояса, можно принять изгибающий момент от сосредоточенного груза (давления колеса при динамическом коэффициенте 1,2), находящегося на середине панели длиной $d=2$ *м*, равным

$$M = \frac{Pd}{6} = \frac{8{,}0 \cdot 2{,}0}{6} = 2{,}66 \ T \cdot м.$$

Таблица 18.8

Усилия в стержнях ферм связей

Стержень	y_1	y_2	Σy	$0{,}1\,P'\Sigma y$	x	$l-x$	$+\Omega$, м	$-\Omega'$, м	$\Omega_{\text{сумм}}$	$0{,}1\,q_0\times\Omega_{\text{сумм}}$, T	$y_{l/2}$	$0{,}1\,P_б\times y_{l/2}$, T	N_0, T
5′6′	−3,33	−2,77	−6,70	−4,27	24	—	—	−39,96	−39,96	−2,08	−3,33	−0,13	−6,48
5⁰6⁰	+3,24	+2,76	+6,00	+4,20	24	—	+38,89	—	−38,89	+2,02	+2,76	+0,11	+6,33
0⁰1′	−1,40	−1,28	−2,68	−1,87	24	—	—	−16,80	−16,80	−0,87	−0,77	−0,03	−2,77
5′6⁰	+0,77	+0,64	+1,41	+0,98	13,09	10,91	+5,00	−3,49	+1,51	+0,08	+0,77	+0,03	+1,09
2′2⁰	−1,00	0	−1,00	−0,7	4	—	—	−2,00	−2,00	−0,1	0	0	−0,8
6′6⁰	−1,00	0	−1,00	−0,7	4	—	—	−2,00	−2,00	−0,1	−1,00	−0,04	−0,84

Примечания:

1. $P' = 7{,}0\ m$; $q_0 = 0{,}52\ m/м$; $\Omega = \dfrac{y_{\max}\, x}{2}$; $P_б = 0{,}4\ m$; $N_0 = 0{,}1\,P'\Sigma y + 0{,}1\,q_0\Omega_{\text{сумм}} + 0{,}1\,P_б y_{l/2}$;
2. Знак полученных усилий соответствует знаку нагружения, показанному на рис. 18.27; усилия могут менять знак на обратный при изменении направления приложенной нагрузки;
3. y — отвлеченные числа.

Если при этом кран подвергается торможению или троганию с места, то одновременно с моментом M, действующим в вертикальной плоскости, образуется момент $M_г$ в горизонтальной плоскости от P' (без учета динамического коэффициента)

$$M_г = \frac{0{,}1\,P'd}{6} = \frac{0{,}1 \cdot 7{,}0 \cdot 2}{6} = 0{,}233\ \ T \cdot м.$$

В панели пояса образуются также поперечные усилия в вертикальной и горизонтальной плоскостях

$$Q = P,$$

$$Q_{гор} = 0{,}1P.$$

Подбор сечений элементов главных ферм. Сечение верхнего пояса принимаем из двух швеллеров № 22. Площадь сечения двух швеллеров (с зазором 5 *мм*)

$$F = 26{,}7 \cdot 2 = 53{,}4\ \ см^2.$$

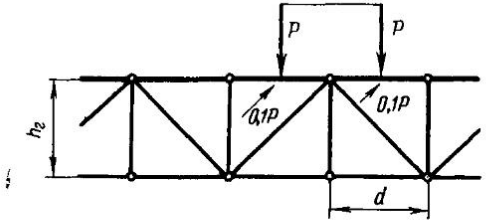


Рис. 18-28. К определению изгибающего момента при расположении сосредоточенной силы P на панели верхнего пояса главной фермы

Момент сопротивления относительно оси x

$$W_x = 193 \cdot 2 = 386\ \ см^3.$$

Наименьший момент инерции и момент сопротивления относительно оси y:

$$J_y = 2 \cdot 26{,}7\,(2{,}24 + 0{,}25)^2 + 151 \cdot 2 = 633\ \ см^4;$$

$$W_y = \frac{633}{8{,}2 + 0{,}25} = 74{,}9\ \ см^3.$$

Определяем напряжение в поясе от продольной силы и двух моментов в крайнем волокне сечения

$$\sigma = -\frac{62\,480}{53{,}4} - \frac{266\,000}{386} - \frac{23\,300}{74{,}9} = -1170 - 689 - 311 =$$

$$= -2170\ \ кГ/см^2.$$

Превышение напряжения относительно допускаемого составляет

$$\frac{2170-2100}{2170} \cdot 100\% = 3{,}3\%, \text{ что разрешается.}$$

Проверяем устойчивость пояса относительно его вертикальной оси.

Относительный эксцентриситет (см. гл. XV) равен

$$m = \frac{266000 \cdot 53{,}4}{386 \cdot 62\,480} = 0{,}59.$$

Наименьший радиус инерции

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{633}{53{,}4}} = 3{,}44 \text{ } см.$$

Гибкость равна

$$\lambda = \frac{200}{3{,}44} = 58.$$

При $\lambda=58$ коэффициент $\varphi=0{,}79$ (см. табл. 15.1). По формуле

$$c = \frac{1}{1+\alpha m} = 0{,}74.$$

В данном случае $\alpha=0{,}6$. Напряжение равно

$$\sigma = \frac{N}{F\varphi c} = -\frac{62480}{53{,}4 \cdot 0{,}79 \cdot 0{,}74} = -2001 \text{ } кГ/см^2,$$

что не превышает допускаемого напряжения, равного 2100 $кГ/см^2$.

Сечение нижнего пояса принимаем из двух швеллеров № 12. Площадь сечения одного швеллера $F_{шв}=13{,}7$ $см^2$.

Напряжения растяжения в нижнем поясе равны

$$\sigma = \frac{54870}{2 \cdot 13{,}7} = 2003 \text{ } кГ/см^2.$$

Поперечные сечения верхнего и нижнего поясов сохраняются постоянными по длине. В панелях, ближайших к опорам, напряжения ниже допускаемых.

Сечения всех стоек фермы состоят из двух гнутых уголков $65\times65\times4$ *мм*.

Площадь поперечного сечения двух уголков $F=2\cdot5{,}04=10{,}08$ $см^2$.

Положение центра тяжести относительно крайнего волокна $y=1{,}8$ *см*.

Момент инерции двух уголков относительно оси x, проходящей через центр тяжести, равен $J_x = 41{,}76\ см^4$.

Наименьший радиус инерции $r = \sqrt{\frac{41{,}76}{10{,}08}} = 2{,}03\ см$.

Гибкость $\lambda = \frac{l}{r} = \frac{200}{2{,}03} = 98{,}5$.

Коэффициент $\varphi = 0{,}47$ находят по табл. 15.1.

Напряжение в наиболее нагруженной стойке *6'6*

$$\sigma = \frac{-9000}{2 \cdot 5{,}04 \cdot 0{,}47} = -1898\ кГ/см^2.$$

В стойках *1'1*, *2'2* и *4'4* расчетные напряжения несколько меньше.

Стойки прикрепляются к поясам в узлах угловыми швами без обработки. Коэффициент понижения допускаемых напряжений γ в основном металле в зоне этих швов определяется при эффективном коэффициенте концентрации $K_э = 3{,}3$ (см. табл. 10.12).

Для сжатой стойки *6'6* при $r = +0{,}11$ (табл. 18.6).

$$\gamma = \frac{1}{0{,}6 \cdot 3{,}3 - 0{,}2 - (0{,}6 \cdot 3{,}3 + 0{,}2)\ 0{,}11} = 0{,}65.$$

Допускаемое напряжение в металле стойки равно

$$[\sigma]_p \gamma = 21{,}00 \cdot 0{,}65 = 1365\ кГ/см^2.$$

Расчетные напряжения стойки в зоне узла находят без учета устойчивости (коэффициента φ). Поэтому

$$\sigma = \frac{-9000}{2 \cdot 5{,}04} = -893\ кГ/см^2, \text{ что меньше } 1365\ кГ/см^2.$$

Поперечные сечения всех раскосов выбираем крестообразного вида. Предусматриваем приварки в узлах широкого листа раскоса к вертикальной косынке поясов стыковыми швами.

Растянутые раскосы проектируют составленными из полосы 100×5 *мм* и двух ребер, приваренных к ней, размером 60×5 *мм*.

Площадь сечения раскоса

$$F = 10 \cdot 0{,}5 + 2 \cdot 6 \cdot 0{,}5 = 11{,}0\ см^2.$$

Растягивающее напряжение в наиболее нагруженном растянутом раскосе *1'2* равно

$$\sigma = \frac{21\,910}{11{,}0} = 1992\ кГ/см^2, \text{ что} < [\sigma]_p = 2100\ кГ/см^2.$$

Напряжение в раскосе *5'6*

$$\sigma = \frac{11\,010}{11{,}0} = 1001 \ кГ/см^2, \text{ что} < [\sigma]_р = 1430 \ кГ/см^2.$$

Для сжатых раскосов принимаем поперечные сечения, состоящие из полосы 160×5 *мм* и двух ребер 80×5 *мм*.

Площадь сечения их составляет

$$F = 16 \cdot 0{,}5 + 2 \cdot 8 \cdot 0{,}5 = 16{,}0 \ см^2.$$

Наименьший момент инерции сечения относительно оси x равен

$$J_x = \frac{16^3 \cdot 0{,}5}{12} + \frac{2 \cdot 0{,}5^3 \cdot 8}{12} = 170{,}9 \ см^4.$$

Наименьший радиус инерции

$$r_x = \sqrt{\frac{170{,}9}{16}} = 3{,}27 \ см.$$

Гибкость —

$$\lambda = \frac{283}{3{,}27} = 86; \quad \varphi = 0{,}58 \text{ (см. табл. 15.1)}.$$

Расчетное напряжение в наиболее нагруженном сжатом раскосе составляет

$$\sigma = -\frac{19550}{16{,}0 \cdot 0{,}58} = -2075 \ кГ/см^2, \text{ что} > [\sigma]_р = 2030 \ кГ/см^2 \text{ на } 2\%.$$

Таким образом, в главных фермах нами приняты пять различных видов сечений: для верхнего и нижнего поясов, сжатых и растянутых раскосов, для стоек. Геометрические характеристики подобных сечений элементов главной фермы и расчетные напряжения приведены в табл. 18.9.

Подбор сечений элементов фермы жесткости. Все элементы фермы жесткости сконструированы однотипными из одного гнутого уголка. Для верхнего сжатого пояса принимаем уголок 100×100×9; площадь его сечения $F = 17{,}2 \ см^2$.

Вычисляем по правилам статики ординату центра тяжести $y = 2{,}8 \ см$; момент инерции относительно горизонтальной оси $J_x = 165{,}2 \ см^4$; минимальный момент инерции $J_{min} = 67{,}6 \ см^4$.

Наименьший радиус инерции равен $r_{min} = 2{,}0 \ см$.

Гибкость

$$\lambda = \frac{200}{2{,}00} = 100; \quad \varphi = 0{,}46 \text{ (по табл. 15.1)}.$$

Таблица 18.9

Расчетные напряжения в стержнях главных ферм

Стержень	N, T	Состав сечения	F, $см^2$	l, $см$	J, $см^4$	Радиус инерции r, $см$	l/r	φ	σ, $кГ/см^2$
5'6'	—62,48	2 швеллера № 22	53,4	200	662	3,5	57	0,80	—1976
0 1	+19,69	2 швеллера № 12	27,4	—	—	—	—	—	+715
5 6	+54,87	2 швеллера № 12	27,4	—	—	—	—	—	+2003
6 6'	—9,00	2 (65×65×4)	10,08	200	41,76	2,03	98	0,48	—1840
1 1'	—6,95	2 (65×65×4)	10,08	200	41,76	2,03	98	0,48	—1437
0 1'	—19,69	160×5+2(80×5)	16,0	224	170,8	3,27	69	0,72	—1710
1'2	+21,91	100×5+2(60×5)	11,0	—	—	—	—	—	+1992
2 3'	—19,25	160×5+2(80×5)	16,0	283	170,8	3,27	86	0,58	—2075
3'4	+16,47	100×5+2(60×5)	11,0	—	—	—	—	—	+1497
4 5'	—13,70	160×5+2(80×5)	16,0	283	170,8	3,27	86	0,58	—1476
5'6	+11,13	100×5+2(60×5)	11,0	—	—	—	—	—	+1012

Напряжение сжатия в панели *5′6′*

$$\sigma = \frac{-15600}{17{,}2 \cdot 0{,}46} = -1970 \ кГ/см^2, \text{ что} < [\sigma]_р = 2100 \ кГ/см^2.$$

Для сжатых раскосов принимаем сечение в виде гнутого уголка 80×80×4.

Вычисляем площадь сечения $F=6{,}24$ *см*²; ординату центра тяжести $y=2{,}2$ *см*; момент инерции $J_x=40{,}04$ *см*⁴; наименьший момент инерции $J_{min}=16{,}36$ *см*⁴.

Наименьший радиус инерции равен

$$r_{min} = \sqrt{\frac{16{,}36}{6{,}24}} = 1{,}62 \ см.$$

Гибкость —

$$\lambda = \frac{283}{1{,}62} = 175.$$

Гибкость несколько велика, но может быть допущена для элемента фермы жесткости, при этом $\varphi=0{,}18$ (по табл. 15.1).

Напряжение сжатия в раскосе *23′*

$$\sigma = -\frac{2460}{6{,}24 \cdot 0{,}18} = -2199 \ кГ/см^2.$$

Расчетное напряжение превышает допускаемое на $\frac{2199-2100}{2100} \times 100\% = 4{,}7\%$, что $< 5\%$.

Все остальные стержни (растянутые раскосы и сжатые стойки) ферм жесткости конструируют из одного гнутого уголка 65×65×4 *мм*. Его площадь сечения $F=5{,}04$ *см*²; $y=1{,}8$ *см*; $J_x=20{,}89$ *см*⁴; $J_{min}=8{,}03$ *см*⁴.

Наименьший радиус инерции равен

$$r_{min} = \sqrt{\frac{8{,}03}{5{,}04}} = 1{,}26 \ см.$$

Гибкость —

$$\lambda = \frac{200}{1{,}26} = 159; \quad \varphi = 0{,}21 \text{ (по табл. 15.1).}$$

Напряжение сжатия в стойках равно

$$\sigma = \frac{-840}{5{,}4 \cdot 0{,}21} = -794 \ кГ/см^2.$$

Геометрические характеристики подобранных сечений элементов фермы жесткости и расчетные напряжения могут быть сведены в таблицу, аналогичную табл. 18.9. Так как в ферме

жесткости по принятой схеме расчета элементы не испытывают переменных усилий ($\gamma=1$), то прикрепления в узлах могут быть выполнены с применением швов любых типов без понижения допускаемых напряжений в основном металле стержней.

Подбор сечений элементов в фермах связей. Раскосы в фермах связи проектируют из одного уголка 80×80×4 *мм*, стойки — из уголка 65×65×4. Геометрические характеристики подобранных элементов связи и расчетных напряжений в них сводятся в таблицу, аналогичную табл. 18.9.

Произведем проверку прочности основных элементов прикреплений узлов. Элементы работают при знакопеременных усилиях с характеристикой цикла $\frac{N_{min}}{N_{max}} = -1$.

Прикрепление в узлах предусматривается соединениями внахлестку, с обваривании по контуру; эффективный коэффициент концентрации $K_э=3{,}3$. Определение γ для соединений в узлах ферм с учетом их работы при растяжении

$$\gamma = \frac{1}{0{,}6 \cdot 3{,}3 + 0{,}2 - (0{,}6 \cdot 3{,}3 - 0{,}2)(-1)} = 0{,}253.$$

В наиболее нагруженном раскосе фермы связей напряжение в зоне прикрепления

$$\sigma = \pm \frac{2770}{6{,}24} = \pm 444 \ кГ/см^2.$$

Так как допускаемое напряжение $[\sigma]_р = 21 \cdot 0{,}253 = 531 \ кГ/см^2$, то прочность элемента обеспечена.

Расчет прочности сварных соединений в главной ферме. В главной ферме расчету прочности подлежат стыки поясов, прикрепления раскосов и стоек к косынкам узла и прикрепления косынок к поясам ферм.

Пояса сваривают швом встык с двусторонним проваром и последующей механической обработкой. Эти соединения являются особо ответственными в конструкции. Коэффициент концентрации напряжений в растянутом стыковом шве $K_э=1{,}4$.

При $\frac{N_{min}}{N_{max}} = r = 0{,}2$, коэффициент

$$\gamma = \frac{1}{0{,}6 \cdot 1{,}4 - 0{,}2 - (0{,}6 \cdot 1{,}4 - 0{,}2)\ 0{,}2} > 1.$$

Принимаем $\gamma=1$. Таким образом, стыки поясов равнопрочны основному элементу.

В узлах с косынками (рис. 18-29, *б*) стойки приваривают фланговыми швами с $к=4$ *мм*, имеющими технологическое значение для закрытия зазора между уголками и косынкой.

Раскосы приваривают в узлах к косынкам широкой полосой встык, узкие ребра — продольными угловыми швами. Примем для этих продольных швов, так же как и для лобовых, $K_э = 2{,}5$.

Определим коэффициент γ для швов, прикрепляющих встык растянутые раскосы *1'2* ($r = +0{,}14$) и *5'6* ($r = -0{,}68$). Узел *5'* аналогичен *1'* (рис. 18-29).

При $r = +0{,}14$

$$\gamma = \frac{1}{0{,}6 \cdot 2{,}5 + 0{,}2 - (0{,}6 \cdot 2{,}5 - 0{,}2)\, 0{,}14} = 0{,}66;$$

$$[\tau']\gamma = 0{,}65\,[\sigma]_р\gamma = 0{,}65 \cdot 21 \cdot 0{,}66 = 9{,}00\ кГ/мм^2.$$

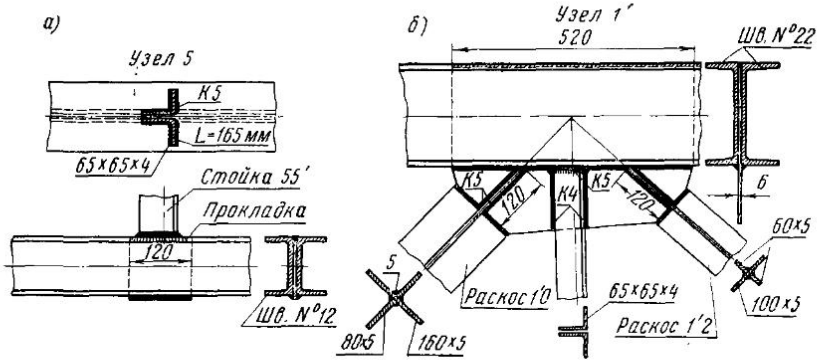


Рис. 18-29. К расчету сварных соединений в узлах главной фермы

При $r = -0{,}68$

$$\gamma = \frac{1}{0{,}6 \cdot 2{,}5 + 0{,}2 \quad (0{,}6 \cdot 2{,}5 - 0{,}2)\,(-0{,}68)} = 0{,}39;$$

$$[\tau']\gamma = 0{,}65 \cdot 21 \cdot 0{,}39 = 5{,}32\ кГ/мм^2.$$

Усилия между полосами раскосов распределяются пропорционально площадям, входящим в состав сечения.

Усилия в узком ребре раскоса *1'2*

$$N_р = N \cdot \frac{F_р}{F} = 21910 \quad \frac{3}{11} = 5970\ кГ.$$

Площадь сечения ребра $F_р = 6 \cdot 0{,}5 = 3\ см^2$.

Площадь сечения раскоса $F = 11\ см^2$.

Ребро приваривается к косынке двумя швами длиной $L = 12\ см$ каждый.

Напряжение в шве с $к=5$ *мм* равно

$$\tau = \frac{N_р}{2 \cdot 0{,}7\, кL} = \frac{5970}{2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 12} = 714 \ кГ/см^2,$$

что < 900 *кГ/см*^{2}.

Усилие в узком ребре раскоса *5′6* равно

$$N_р = 11\,300 \cdot 3/11 = 3080 \ кГ.$$

Швы имеют длину $L=12$ *см* каждый. Напряжение в швах равно

$$\tau = \frac{3080}{2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 12} = 367 \ кГ/см^2, \text{ что} < 532 \ кГ/см^2.$$

Аналогичным образом проверяется прочность прикреплений остальных узлов главных ферм.

Определим напряжение в швах, приваривающих косынку (прокладку к поясам).

В узле *1′* усилия в раскосе *1′2* составляют $+21\,910$ *кГ*, а в раскосе *1′О* — $(-19\,690$ *кГ*).

Определим сумму проекций усилий на горизонтальную ось, сдвигающих прокладку относительно пояса (в действительности максимальные усилия в стержнях *1′2* и *23′* имеют место при не вполне одинаковом положении нагрузки). Таким образом, усилие T является несколько завышенным):

$$T = (21910 + 19690) \cos 45^\circ = 29400 \ кГ.$$

Усилие воспринимается четырьмя продольными швами. В узле *1′* принимаем $[\tau']\gamma = 9{,}00$ *кГ/мм*$^2 = 900$ *кГ/см*^{2}.

При $к=5$ *мм* требуемая длина швов, прикрепляющих косынку к поясу, равна

$$L = \frac{N}{4 \cdot 0{,}7к[\tau']} = \frac{29400}{4 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 9{,}00} = 23{,}3 \ см.$$

Из конструктивных соображений принимаем $L=520$ *мм*.

Расчет прочности сварных соединений ферм жесткости. Как было указано выше, все сварные соединения ферм жесткости рассчитывают при $\gamma=1$ и допускаемых напряжениях

$$[\tau'] = 0{,}65\,[\sigma]_р = 0{,}65 \cdot 21 = 13{,}65 \ кГ/мм^2.$$

Пояса сваривают встык швом, равнопрочным основному элементу.

Раскосы и стойки прикрепляют к надставкам, привариваемым к вертикальной полке уголков пояса (рис. 18-30, *а*). Длину швов назначают с учетом технологических и конструктивных особен-

ностей. Длина флангового шва, приваривающего раскос со стороны обушка уголка, принимается равной 90 *мм*, с противоположной стороны — 40 *мм*; длина лобового шва соответствует ширине полки уголка; катет шва $\kappa = 4$ *мм*.

В прикреплении раскоса $1'2^0$ (рис. 18-30, *а*) полная расчетная длина швов равна

$$L = 6{,}5 + 9 + 9 \cdot 3/7 = 19{,}3 \text{ см}.$$

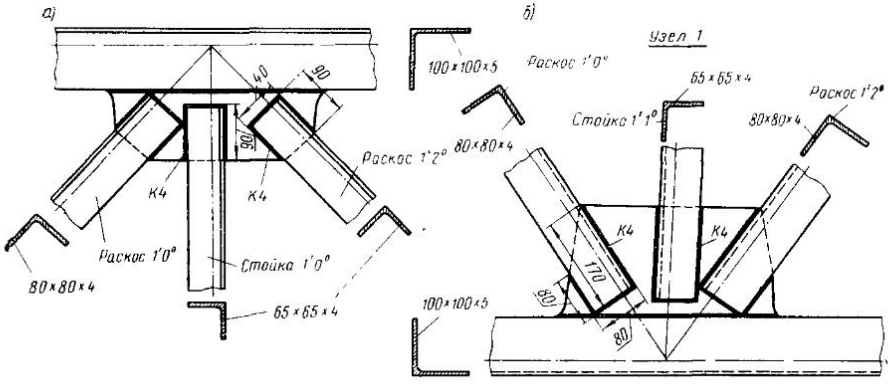


Рис. 18-30. К расчету сварных соединений в узле $1'$ фермы жесткости (*а*) и связей (*б*)

Напряжение в швах равно

$$\tau = \frac{N}{0{,}7 \cdot \kappa L} = \frac{3060}{0{,}7 \cdot 0{,}4 \cdot 19{,}3} = 567 \text{ кГ/см}^2.$$

В других прикреплениях раскосов и стоек фермы жесткости величины напряжений в швах имеют еще меньшее значение.

Расчет прочности сварных соединений ферм связей. Соединения элементов ферм связей имеют коэффициенты концентрации в лобовых швах $K_э = 2{,}5$ и $K_э = 4{,}5$ — во фланговых (см. табл. 10.12).

При $r = -1$ коэффициент $\gamma_л = 0{,}333$; $\gamma_{фл} = 0{,}185$.

Допускаемое напряжение в лобовых швах

$$[\tau']\gamma_л = 0{,}65 \cdot 21 \cdot 0{,}333 = 4{,}55 \text{ кГ/мм}^2,$$

во фланговых —

$$[\tau']\gamma_{фл} = 0{,}65 \cdot 21 \cdot 0{,}185 = 2{,}52 \text{ кГ/мм}^2.$$

Длину лобового шва, прикрепляющего раскос $1'O°$, примем 80 *мм* (рис. 18-30, *б*).

Усилие на лобовой шов с $к=4$ *мм* равно

$$N_л = 455 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}4 \cdot 8 = 1019 \ кГ;$$

усилие на фланговые швы

$$N_{фл} = 2770 - 1019 = 1751 \ кГ.$$

Требуемая длина фланговых швов при $к=4$ *мм* равна

$$L_{фл} = \frac{1751}{0{,}7 \cdot 0{,}4 \cdot 252} = 24{,}8 \ см.$$

Определяем длину шва со стороны обушка

$L_1 = 0{,}7 \cdot 24{,}8 = 17{,}3$ *см*; принимаем $L_1 = 17$ *см*.

Требуемая длина шва с другой стороны

$L_2 = 0{,}3 \cdot 24{,}8 = 7{,}4$ *см*; принимаем $L_2 = 8$ *см*.

Расчет опорных балок моста. Опорные балки кранового моста должны обладать достаточной жесткостью как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Опорные балки воспринимают нагрузки от главных ферм со связями, вес тележки с грузом при ее нахождении над балкой. Кроме того, на опорные балки действует горизонтальная сила, направленная вдоль моста при торможении или при пуске в ход крановой тележки.

Схема загружения крановой балки показана на рис. 18-31, *а*; сила R_0 соответствует половине веса фермы жесткости

$$\frac{P'_q}{2} = \frac{5{,}4}{2} = 2{,}7 \ T;$$

сила R состоит из половины веса главной фермы $\frac{7{,}2}{2} = 3{,}6 \ T$, половины веса моторного узла $\frac{0{,}4}{2} = 0{,}2 \ T$ и части веса тележки с грузами при загружении линий влияния опорной реакции A фермы моста (рис. 18-31, *б*)

$$\Sigma Py = 8{,}0 \ (1 + 0{,}83) = 14{,}64 \ T.$$

Таким образом,

$$R = 3{,}6 + 0{,}2 + 14{,}64 = 18{,}44.$$

Горизонтальная сила T при торможении тележки составляет 0,1 от веса тележки с грузом

$$T = 2P_г = 2 \cdot 0{,}7 = 1{,}4 \ T \ \text{(стр. 479)}.$$

Реакции на опорах балки $A = B = 18{,}44 + 2{,}7 = 21{,}14 \ T$.

Эпюры поперечных сил построены на рис. 18-31, *в*, эпюры моментов от вертикальных сил — на рис. 18-31, *г*, а от горизонтальных — на рис. 18-31, *д*.

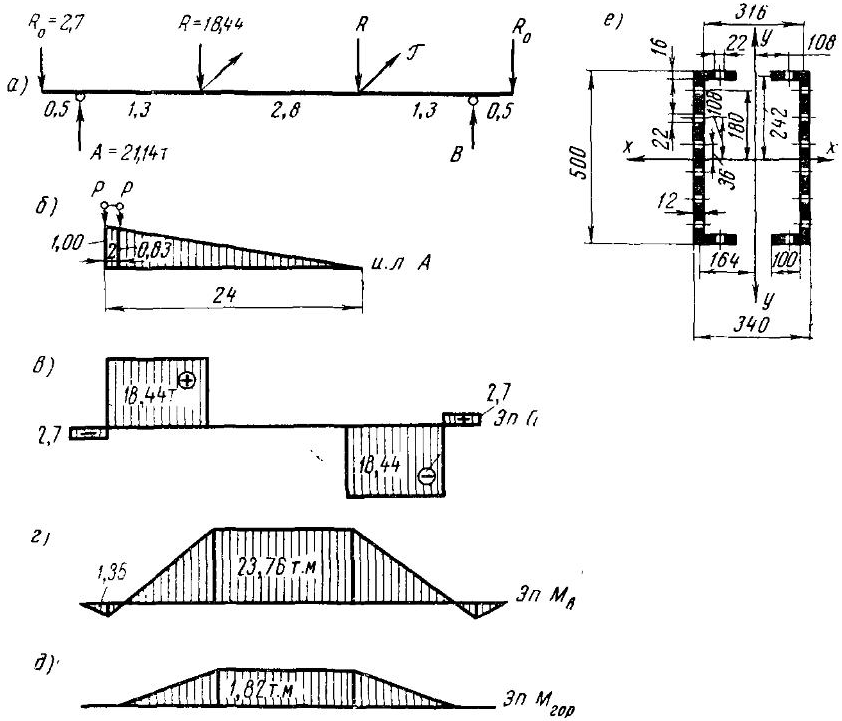


Рис. 18-31. К расчету сварных опорных балок крапового моста

Наибольшие моменты равны:

$$M_x = -2{,}7 \cdot 1{,}8 + 21{,}14 \cdot 1{,}3 = 23{,}76 \ T \cdot м;$$

$$M_y = A_{гор} \cdot 1{,}3 = 1{,}4 \cdot 1{,}3 = 1{,}82 \ T \cdot м.$$

За сечение опорной балки принимаем профиль из двух швеллеров, расставленных на расстоянии 340 *мм* друг от друга

и соединенных между собой связями. Каждая ветвь швеллера состоит из вертикального листа 500×12 *мм* и двух горизонтальных 100×16 *мм*.

Площадь поперечного сечения двух сварных швеллеров

$$F = 2\ (50 \cdot 1{,}2 + 2 \cdot 10 \cdot 1{,}6) = 184\ см^2.$$

Момент инерции относительно оси x

$$J_x = 2\left(\frac{50^3 \cdot 1{,}2}{12} + 2 \cdot 10 \cdot 1{,}6 \cdot 24{,}2^2\right) = 62\,480\ см^4.$$

Для удобства транспортирования опорные балки делают составными по длине. Обе половины соединяют накладками и болтами. В месте соединения опорные балки ослаблены отверстиями для болтов $d=22$ *мм*.

Учтем величину уменьшения момента инерции сечения вследствие его ослабления (рис. 18-31, *е*).

$$J_{осл} = 4 \cdot 2{,}2 \cdot 1{,}2\ (3{,}6^2 + 10{,}8^2 + 18{,}0^2) + 4 \cdot 2{,}2 \cdot 1{,}6 \cdot 24{,}2^2 = \\ = 13\,036\ см^4.$$

Момент инерции нетто ослабленного сечения швеллеров равен

$$J_{нетто} = 62\,480 - 13\,036 = 49\,444\ см^4.$$

Ослабление сечения отверстиями для болтов составляет, таким образом,

$$\frac{62\,480 - 49\,444}{62\,480} \cdot 100\% = 20\%.$$

Момент сопротивления двух швеллеров равен

$$W_x = \frac{J_{нетто}}{y_{max}} = \frac{49\,444}{25} = 1978\ см^3.$$

Нагрузка неравномерно распределяется между ветвями сечения балки. Примем, что внутренний швеллер воспринимает 2/3 от полного момента. Таким образом,

$$M_{шв} = \frac{2}{3} \cdot 23{,}76 = 15{,}84\ Т \cdot м = 1\,584\,000\ кГ \cdot см.$$

Напряжение от вертикального изгиба в более нагруженном швеллере

$$\sigma = \frac{1\,584\,000}{1/2 \cdot 1978} = 1602\ кГ/см^2.$$

Момент инерции сечения балки относительно вертикальной оси составляет

$$J_y = 2\left(\frac{50 \cdot 1{,}2^3}{12} + 50 \cdot 1{,}2 \cdot 16{,}4^2\right) + 4\left(\frac{10^3 \cdot 1{,}6}{12} + \right.$$

$$\left. + 10 \cdot 1{,}6 \cdot 10{,}8^2\right) = 40\,290 \ см^4.$$

Примем приближенно

$$J_{\text{нетто}} = 0{,}8\, J_y = 0{,}8 \cdot 40\,290 = 32\,230 \ см^4.$$

Момент сопротивления сечения равен

$$W_y = \frac{32\,230}{17} = 1896 \ см^4.$$

Напряжение от горизонтального изгиба балки равно

$$\sigma = \frac{182\,000}{1896} = 96 \ кГ/см^2.$$

Расчетное напряжение от изгибов в вертикальной и горизонтальной плоскостях

$$\sigma = 1602 + 96 = 1698 \ кГ/см^2, \text{ что} < [\sigma]_p = 2100 \ кГ/см^2.$$

Определим требуемое количество болтов в стыке опорной балки.

Допускаемые напряжения в болте на срез принимаем $[\tau] = 10{,}5 \ кГ/мм^2$.

При внешнем диаметре болта $d = 22 \ мм$ площадь среза составляет

$$F = \frac{\pi \cdot 22^2}{4} = 3{,}8 \ см^2.$$

Допустимое усилие на болт по его сопротивлению срезу равно

$$T = 1050 \cdot 3{,}8 = 4000 \ кГ.$$

Определим момент, воспринимаемый всеми болтами, находящимися в одном поперечном сечении балки (в одном ряду), полагая, что усилия в крайних болтах достигают величины $T = 4000 \ кГ$, а усилия в остальных изменяются по линейному закону, в зависимости от расстояния до центральной оси швеллера.

Таким образом,

$$M = T_1 y_1 + T_2 y_2 + \ldots;$$

$$T_1 = T\frac{y_1}{y};\ T_2 = T\ \frac{y_2}{y}; \ldots,$$

где T_1 — усилия в болтах на расстоянии y_1 от центра тяжести;
T_2 — усилия на расстоянии y_2 от центра тяжести и т. д.;
$y_1 = 3{,}6$ *см*: $y_2 = 10{,}8$ *см*; $y_3 = 18{,}0$ *см*; $y_4 = 24{,}2$ *см*.

Подставляя числовые значения, находим момент, воспринимаемый одним рядом болтов:

$$M_1 = 4000\left(\frac{3{,}6^2 + 10{,}8^2 + 18{,}0^2 + 24{,}2^2}{24{,}2}\right) \cdot 4 =$$

$$= 606\,000\ кГ \cdot см = 6{,}06\,T \cdot м.$$

Требуемое число рядов болтов

$$n = \frac{M}{M_1} = \frac{23{,}76}{6{,}06} = 3{,}9.$$

Принимаем по 4 ряда с каждой стороны стыка.

Расстояние между болтами — $3d$. Расстояние от центра болта до края накладки — $2d$.

Полная длина накладки (при $d = 22$ *мм*)

$$L = (2d + 3 \cdot 3d + 2d)\ 2 = 26 \cdot 22 = 572\ мм.$$

Принимаем $L = 580$ *мм*.

Толщину горизонтальных накладок принимаем 18 *мм*, на вертикальных листах — 12 *мм*. Сечение накладок в стыке несколько превышает размеры основного сечения балки, что обеспечивает их прочность.

Определение прогиба кранового моста. Определим величину прогиба главных ферм от полезной нагрузки в узле нижнего пояса. Этой величиной оценивают жесткость моста. Для определения наибольшего прогиба поместим крановую тележку с грузом на середину фермы.

Не будет существенной погрешности в том, если при вычислении прогиба фермы заменить два груза P тележки с базой d одним сосредоточенным грузом $2P$, но расчет значительно облегчится (рис. 18-32).

Прогиб фермы равен

$$f = \Sigma\ \frac{NN_1 l_i}{EF_i},$$

где N — усилие в стержнях фермы от силы $2P$, приложенной в середине пролета (в узле $6'$ фермы, рис. 18-32, *а*);

N_1 — усилие в стержнях от силы, равной 1 и приложенной в узле *б* (рис. 18-32, *б*);

l_i — длины стержней;

F_i — площади их поперечных сечений.

Реакция от нагрузки $A = B = P$.

Реакция от единичной силы $A_1 = B_1 = 1/2$.

Расчетные данные по определению прогиба фермы включены в табл. 18.10. Прогиб равен

$$f = \frac{\Sigma N N_i l_i}{EF} = \frac{276\,Pd}{EF} = \frac{276 \cdot 8000 \cdot 200}{2\,100\,000 \cdot 53{,}4} = 4{,}0 \text{ см}.$$

Таким образом, $f/l = \frac{1}{600}$.

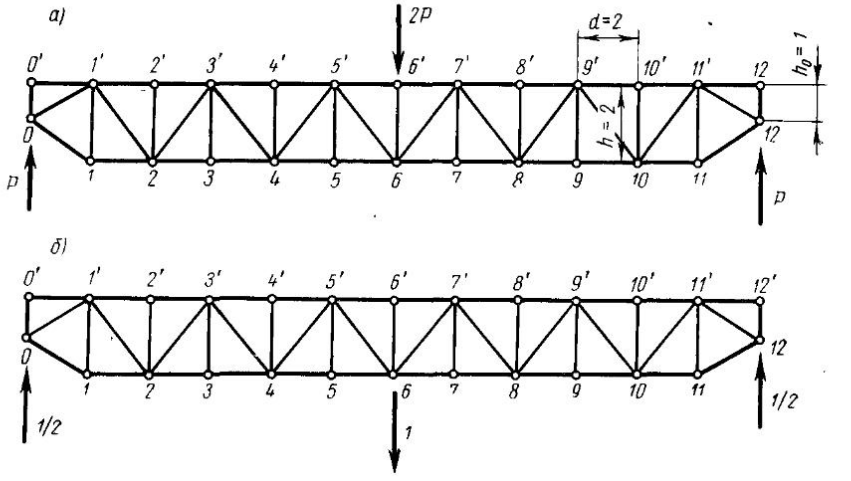


Рис. 18-32. К определению прогиба главной фермы кранового моста

§ 15. ИЗГОТОВЛЕНИЕ РЕШЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Решетчатые конструкции — фермы, мачты, башни и др.— изготавливают преимущественно из прокатных элементов; гнутые профили используют пока еще мало.

При сборке ферм особое внимание уделяется правильному центрированию стержней в узлах, предотвращающему появление изгибающих моментов, неучтенных расчетом.

Разнообразие типов и размеров стропильных ферм часто не позволяет использовать преимущества сборки ферм в инвентарных кондукторах. Поэтому весьма распространенным методом сборки ферм и других решетчатых конструкций является *метод*

Таблица 18.10

Определение вертикального перемещения среднего узла фермы

Стержень	N	N_1	l_i, см	F_i, см²	$\frac{NN_1}{F_i}$	$\frac{NN_1l_i}{EF_i}$
$O'1'$	0	0	d	F	0	0
$1'3'$	$-2P$	-1	$2d$	F	$\frac{2P}{F}$	$\frac{4Pd}{F}$
$3'5'$	$-4P$	-2	$2d$	F	$\frac{8P}{F}$	$\frac{16Pd}{F}$
$5'6'$	$-6P$	-3	d	F	$\frac{18P}{F}$	$\frac{18Pd}{F}$
$O1'$	$+1{,}12P$	$+0{,}56$	$1{,}12d$	$0{,}52F$	$\frac{1{,}2P}{F}$	$\frac{1{,}35Pd}{F}$
12	$+P$	$+0{,}5$	d	$0{,}52F$	$\frac{0{,}96P}{F}$	$\frac{0{,}96Pd}{F}$
24	$+3P$	$+1{,}5$	$2d$	$0{,}52F$	$\frac{8{,}65P}{F}$	$\frac{17{,}3Pd}{F}$
46	$+5P$	$+2{,}5$	$2d$	$0{,}52F$	$\frac{24{,}04P}{F}$	$\frac{48{,}1Pd}{F}$
$O1'$	$-1{,}12P$	$-0{,}56$	$1{,}12d$	$0{,}30F$	$\frac{2{,}1P}{F}$	$\frac{2{,}4Pd}{F}$
$1'2$	$+1{,}41P$	$+0{,}705$	$1{,}41d$	$0{,}20F$	$\frac{5P}{F}$	$\frac{7Pd}{F}$
$2\,3'$	$-1{,}41P$	$-0{,}705$	$1{,}41d$	$0{,}30F$	$\frac{3{,}3P}{F}$	$\frac{4{,}6\,Pd}{F}$
$3'4$	$+1{,}41P$	$+0{,}705$	$1{,}41d$	$0{,}20F$	$\frac{5P}{F}$	$\frac{7Pd}{F}$
$4\,5'$	$-1{,}41P$	$-0{,}705$	$1{,}41d$	$0{,}30F$	$\frac{3{,}33P}{F}$	$\frac{4{,}6\,Pd}{F}$
$5'6$	$+1{,}41P$	$+0{,}705$	$1{,}41d$	$0{,}20F$	$\frac{5P}{F}$	$\frac{7Pd}{F}$

Для обеих половин фермы $\sum \frac{NN_1l_i}{EF_i} = \frac{276Pd}{F}$.

Примечания:

1) за единицу площади F принята площадь сечения верхнего пояса. Все остальные площади выражены в частях F;

2) от единичной силы усилия во всех стойках равны 0;

3) длины всех элементов выражены в частях длины панели пояса d.

копирования. Этот метод заключается в следующем. Первая собранная по разметке ферма, сечение которой составляют одиночные уголки (рис. 18-33, *а*), закрепляется на стеллаже и служит копиром. При сборке детали каждой очередной фермы *2* раскладываются и совмещаются с деталями *1* фермы копирной (рис. 18-33, *б*). После скрепления деталей *2* прихватками собранную ферму (пока с односторонними уголками) снимают с копира, укладывают на стеллаже отдельно и ставят на нее недостающие парные уголки *3* (рис. 18-33, *в*). Когда сборка требуемого количества ферм закончена, копирная ферма также дособирается и отправляется на сварку.

Такой способ прост и эффективен, однако не может обеспечить точных размеров ферм и правильного расположения мон-

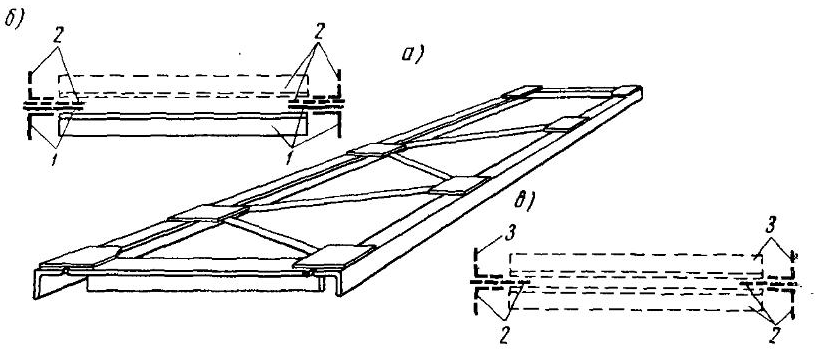


Рис. 18-33. Схема сборки фермы по копиру:

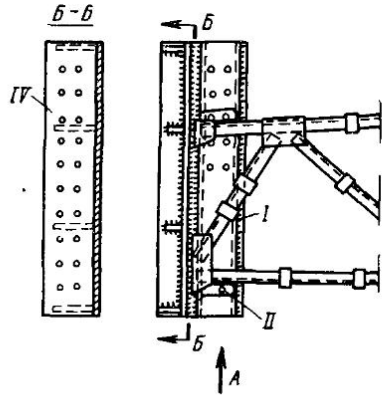
а) копир; *б)* сборка; *в)* установка парных уголков на ферме вне копира; *1* — детали копира; *2* — детали фермы; *3* — парные уголки фермы

тажных отверстий (например, для крепления ферм к колоннам). Для увеличения точности сборки на концах копира укрепляют специальные съемные фиксаторы (рис. 18-34), которые определяют положение деталей с монтажными отверстиями и ограничивают геометрические размеры конструкции в пределах заданных допусков.

Сборка ферм по копиру с фиксаторами производится в следующем порядке. Сначала устанавливаются концевые планки *2*, предварительно сваренные с фасонками *1*. Их правильное положение обеспечивается совмещением монтажных отверстий концевых планок с отверстиями в стойке фиксатора *IV*. Затем на копире раскладываются все остальные элементы, производится прихватка, ферма снимается с копира, кантуется и дособирается, как описано выше.

При достаточно большом количестве выпускаемых ферм одного типоразмера становится экономически целесообразным

использование более сложной и производительной оснастки. Так, например, для сборки и сварки боковых ферм полувагонов на Уралвагонзаводе в течение ряда лет эффективно использовались специальные приспособления (рис. 18-35) с двумя стендами *1* и *3* и кантующей рамкой *2*. Сборка выполнялась на стенде *1*, снабженном пневмоприжимами. Элементы фермы раскладывались по упорам и фиксаторам, одновременно зажимались пневмоцилиндрами и жестко соединились швами, оказавшимися в нижнем



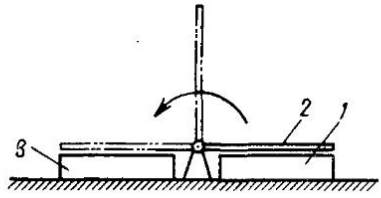


Рис. 18-35. Схема приспособления для сборки и сварки ферм

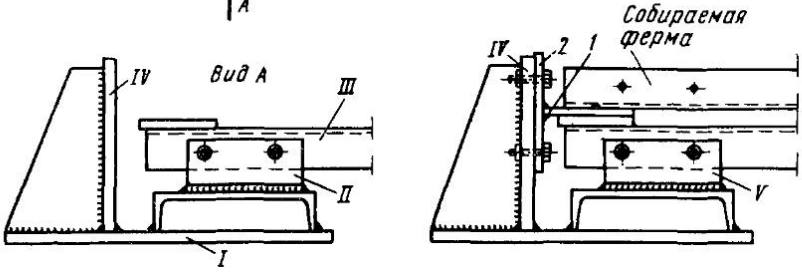


Рис. 18-34. Копир с фиксатором для сборки стропильных ферм:
I — основание фиксатора; *II* — крепление фиксатора к копиру; *III* — копир; *IV* — стойка фиксатора; *V* — крепление копирной фермы

положении. С помощью рамки *2* собранная ферма сначала ставилась в вертикальное положение, а затем передавалась на стенд *3*, причем в каждом из этих положений выполнялись соответствующие швы. На стенде *1* одновременно со сваркой на позициях *2* и *3* производилась сборка следующей фермы.

Решетчатые конструкции, как правило, имеют короткие швы, различным образом ориентированные в пространстве. Поэтому сварка таких конструкций обычно выполняется вручную либо полуавтоматом.

С фасонками стержни из проката наиболее часто соединяются внахлестку. Для предотвращения подреза скошенной кромки фасонки целесообразно предусмотреть небольшое притупление ее края, либо начинать шов, отступя на 10—15 *мм* (рис. 18-36, *а, б*). Сварку следует вести в направлении к концу привариваемого элемента, как показано стрелками на рис. 18-36, *в*. При значительных размерах решетчатой конструкции ее изготавливают на заводе по частям и отправляют на место монтажа отдельными секциями. Размеры секций выбирают в зависимости от способа транспортировки; при перевозке по железной дороге исходят из габарита подвижного состава

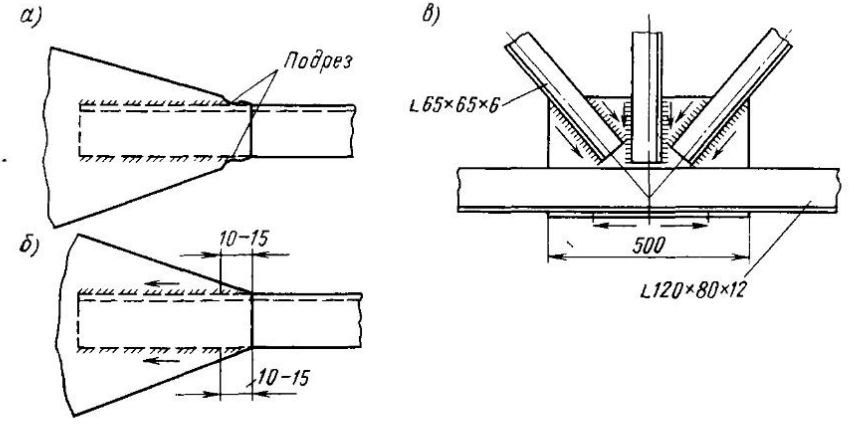


Рис. 18-36. Приварка стержней к фасонке

(рис. 18-37). На рис. 18-38 показано расчленение опоры линии электропередачи. Нижняя часть опоры собирается из четырех секций *1*, каждая из секций состоит из двух плоских треугольных ферм, соединенных в пространственную конструкцию. Средняя секция *2* также пространственная, имеет четыре грани. Общей сборке такой секции предшествует изготовление двух плоских ферм, объединяемых в пространственную конструкцию, например, с помощью вращающегося кондуктора, показанного на рис. 18-39. В подшипниках *2* стоек *1* поворачивается рама, состоящая из двух копирных ферм *3*, соединенных распорками *4*. В поясных уголках копирных ферм предусмотрены отверстия, соответствующие монтажным отверстиям в элементах секции. Пару собранных плоских ферм заводят в кондуктор и укладывают одну внизу, а другую — вверху, закрепляя болтами с помощью монтажных отверстий в поясных уголках. Кондуктор поворачивают на 90° и, используя копирную ферму, раскладывают и прихватывают детали третьей плоскости, а после

поворота на 180° — четвертой плоскости. Затем кондуктор поворачивается в исходное положение, собранная секция освобождается от закреплений и извлекается из кондуктора.

При сооружении радиомачт, радиобашен, буровых вышек и ряда других конструкций широко используют трубчатые элементы. Так, например, стандартная радиомачта представляет собой решетчатую конструкцию, удерживаемую в вертикальном положении расчалками. Ствол ее состоит из отдельных взаимозаменяемых секций длиной по 7,5 *м* (рис. 18-40). При монтаже башни секции соединяют на болтах с помощью фланцев, приваренных к торцам поясных труб каждой секции. Изготовляют секции на заводе в кондукторах, что обеспечивает точность сборки и совпадение отверстий на монтаже.

Использование труб во многих случаях позволяет снизить вес конструкции на 25—50%, однако их соединение в узле как непосредственное (рис. 18-41), так и с помощью фасонки, оказывается весьма трудоемким. Попытки заменить профильный прокат открытыми гнутыми профилями пока не дали заметных результатов. Достигаемое упрощение конструкции получалось несущественным, а трудоемкость изготовления не снижалась вовсе. Поэтому большой интерес представляет использование в решетчатых конструкциях закрытых гнутых профилей из листовой стали. Подобно трубам, такие

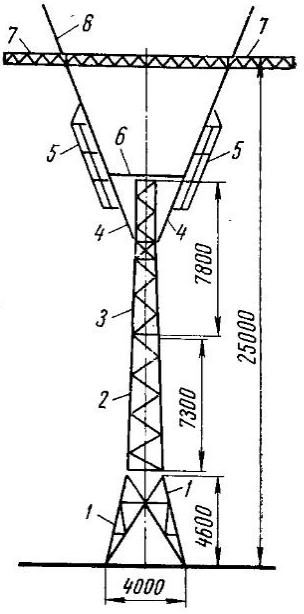


Рис. 18-38. Схема конструкции опоры линии электропередачи:

1 — нижние элементы опоры; *2* — средняя секция; *3* — верхняя секция; *4* — наклонные стойки; *5* — лестницы; *6* — распорка; *7* — траверсы; *8* — тросостойка

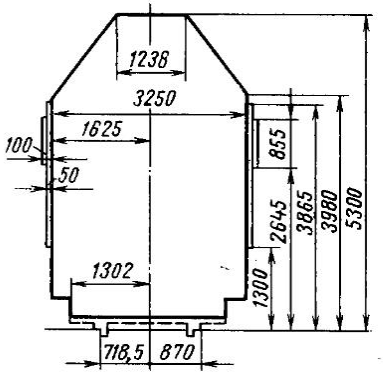


Рис. 18-37. Габарит подвижного состава № 1-В

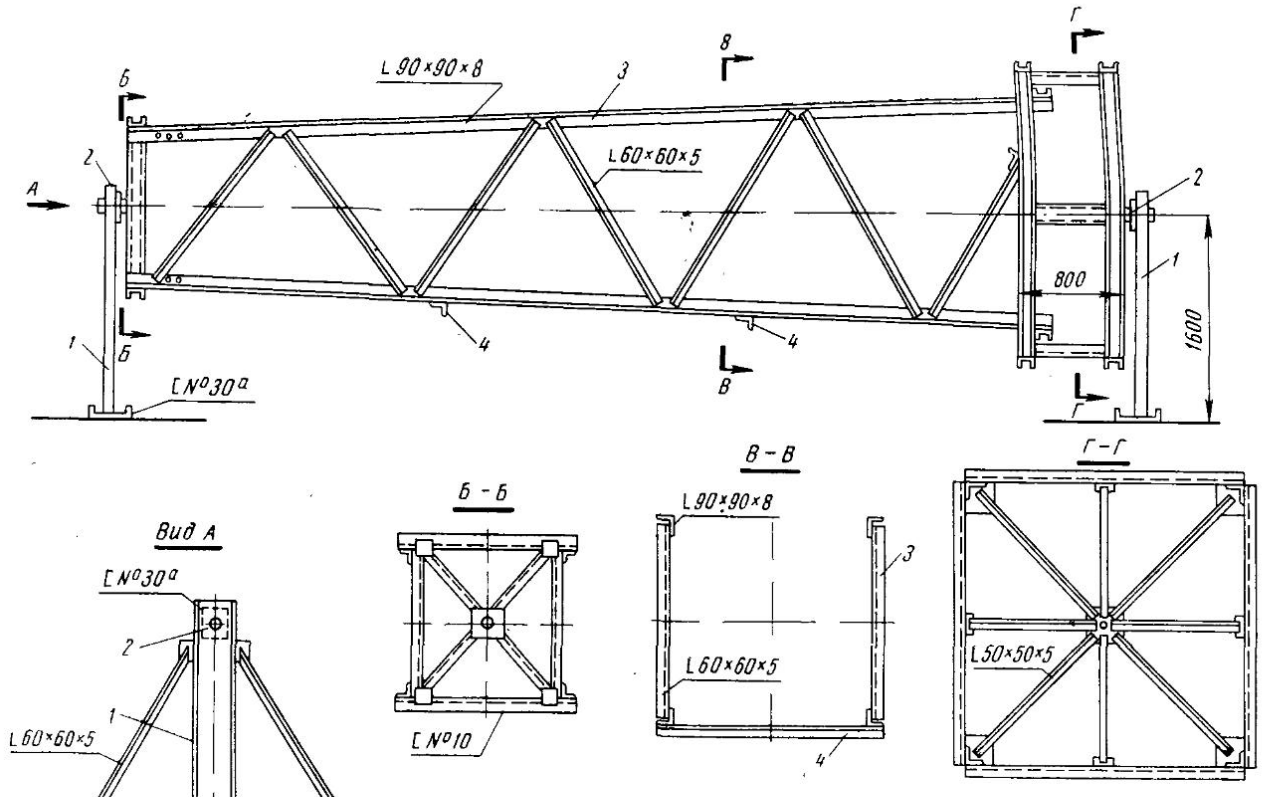


Рис. 18-39. Вращающийся кондуктор для сборки пространственных решетчатых элементов

элементы хорошо работают на сжатие и кручение и в то же время при наличии плоских граней их соединение в узлах осуществляется значительно проще.

Примером такого решения является стропильная ферма пролетом 30 *м*, выполненная из сварных профилей коробчатого сечения (см. рис. 18-16). Можно видеть, что количество стержней фермы минимально, размеры панелей велики, а число типоразмеров сечений ограничено тремя. Из условия транспортировки по железной дороге на заводе раздельно собирают и сваривают две половинки и затяжку. Замкнутые профили выполняют из одного или из двух холодногнутых листовых элементов с помощью автоматической сварки. Местная жесткость тонких стенок обеспечена путем создания гофр и отгиба кромок при гибке. По сравнению с типовой фермой из горячекатаных уголков, такое конструктивно-технологическое решение позволяет уменьшить вес на 15—25% и снизить трудоемкость изготовления в 2 раза. Для дальнейшего снижения трудоемкости изготовления ферм с применением замкнутых гнутых профилей необходимо обеспечить высокопроизводительную сварку продольных швов гнутых элементов и механизировать обрезку их концов.

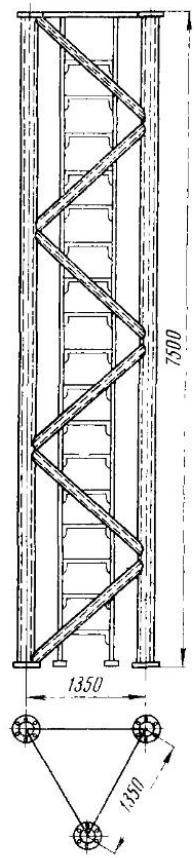


Рис. 18-40. Секция мачты из труб

При создании легких и экономичных ре-

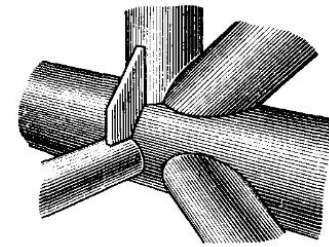


Рис. 18-41. Соединение труб, подготовленное к сварке

шетчатых конструкций может оказаться эффективным использование заготовок плоскосворачиваемых труб. Такие свернутые в рулоны заготовки изготовляют из двух стальных лент, свариваемых роликовой сваркой по кромкам. Они имеют длину до 350 *м* и могут служить полуфабрикатом для элементов фермы. После резки на части требуемой длины и заварки поперечного

герметизирующего внутреннюю полость шва элемент можно раздуть сжатым воздухом или водой через предварительно просверленное отверстие. Конец надутого элемента остается плоским и его присоединение к узловой фасонке дуговой или контактной сваркой затруднений не вызывает (рис. 18-42, *а, б*).

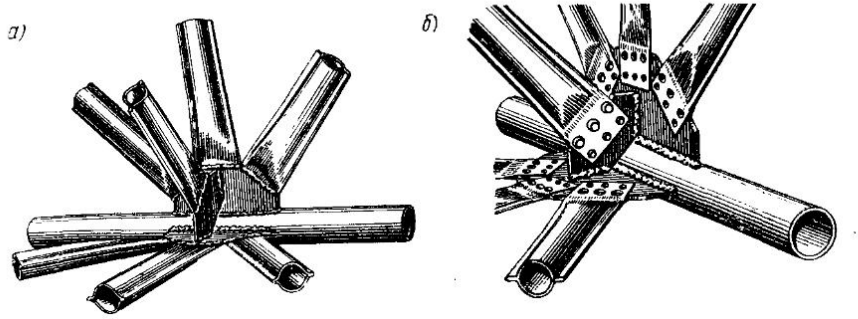


Рис. 18-42. Присоединение плосконадувных элементов к трубчатому поясу:
а) дуговой сваркой; *б)* точечной сваркой

ГЛАВА XIX

ЛИСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ (РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ)

Листовые конструкции очень часто применяют в технике (резервуары, цистерны, баки, котлы, сосуды, химическая аппаратура, конструкции металлургического оборудования и т. п.). Они требуют прочных и плотных швов.

Листовые конструкции разделяют на две основные группы.

К первой группе относятся резервуары и другие изделия, предназначенные для хранения жидкостей и газов, не взрывоопасных и не ядовитых при давлении $p \leqslant 0{,}5$ *кГ/см*^{2} и $T \leqslant 100°$ С. Эти конструкции изготовляют согласно общим правилам проектирования и требованиям эксплуатации промышленных сооружений.

Ко второй группе относят котлы и сосуды, работающие под высоким давлением. Эксплуатация их находится под особым наблюдением инспекции Котлонадзора. Эти конструкции проектируют и изготовляют согласно специальным техническим условиям.

Листовые конструкции в значительном количестве изготовляют индустриальным методом на заводах и собирают крупными блоками при монтаже. Этот метод непрерывно развивается, охватывая все более широкие области техники и оказывая значительное влияние на методы конструирования этих изделий.

§ 1. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ

Цилиндрические конструкции (резервуары) применяют для хранения нефти, бензина и различных масел. Емкость конструкций такого типа достигает в отдельных случаях десятков тысяч кубических метров. Основными элементами резервуара являются: цилиндрическая часть, покрытие и днище (рис. 19-1). Днище этих конструкций в большинстве случаев плоское, корпус круглый, цилиндрический. Такая форма конструкций наиболее рациональна с точки зрения прочности и возможности

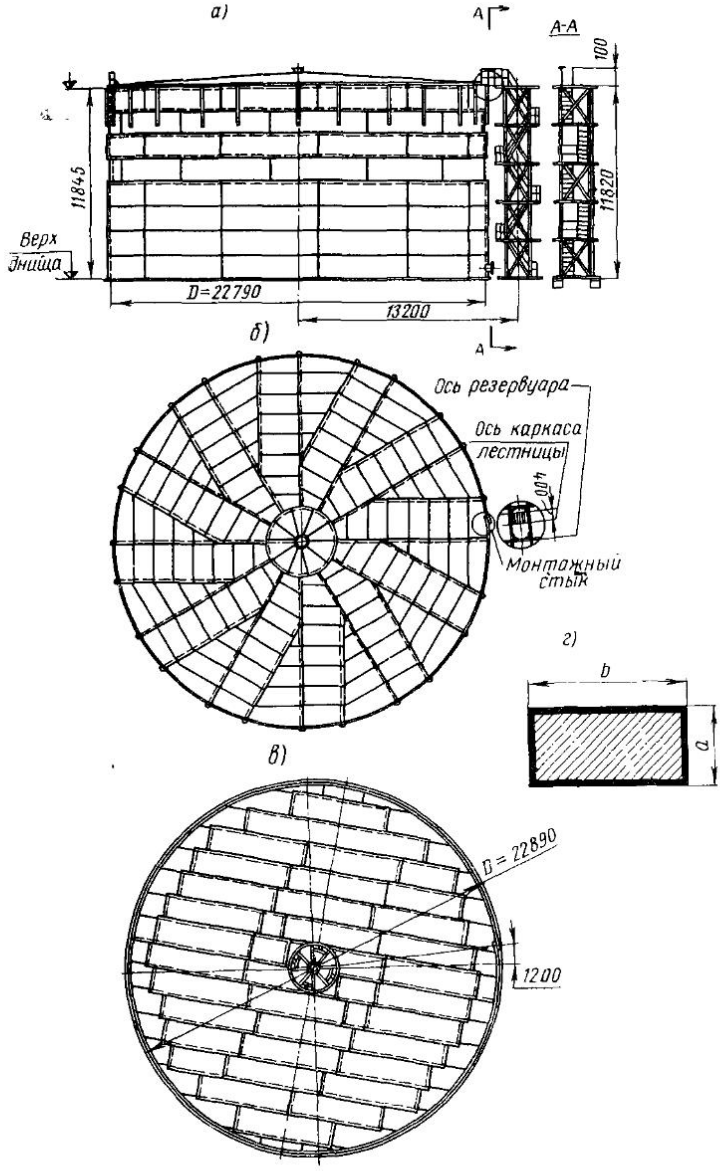


Рис. 19-1. Общий вид резервуара емкостью $V=5000$ $м^3$:

а) фасад; *б)* план крыши; *в)* план днища; *г)* схема элемента кровли

изготовления ее при наименьшем расходе металла. Наиболее рационально изготовлять резервуары из мартеновских сталей марок Ст. 2 и Ст. 3, а также из низколегированных сталей.

Цилиндрическую часть резервуара составляют по высоте из нескольких обечаек — поясов (рис. 19-2, *а*). Ширина обечайки зависит от ширины листов. В большинстве случаев она равна 1400÷1600 *мм*. Обечайки резервуара сваривают встык из нескольких листов. Эти стыковые соединения располагаются параллельно оси цилиндра и образуют продольные швы резервуа-

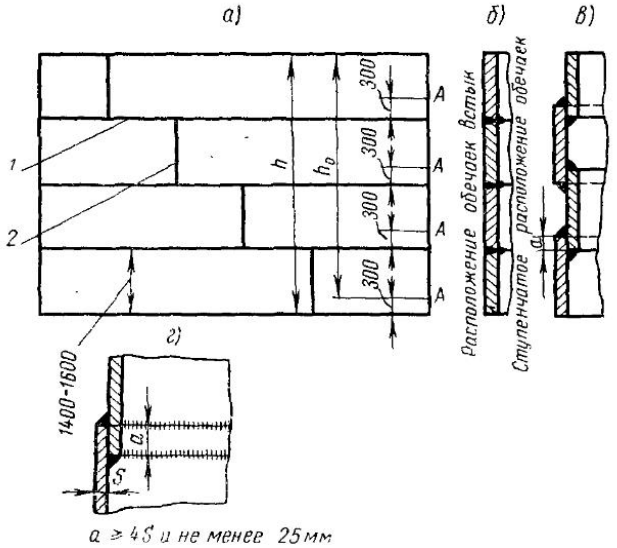


Рис. 19-2. Сварные соединения обечаек:

а, б) расположение обечаек при сварке в стык; *в)* ступенчатое расположение обечаек; *г)* соединение внахлестку; *1* — поперечный шов; *2* — продольный шов

ра. Обечайки соединяют между собой поперечными (кольцевыми) швами. Верхние обечайки сваривают внахлестку.

С начала 50-х годов в СССР цилиндрические части резервуара проектируют с учетом изготовления их методом рулонирования. Для этого на заводе из отдельных листов сваривают карты, которые сворачивают в рулон и транспортируют на монтажную площадку, где устанавливают и разворачивают их. В СССР этот способ полностью вытеснил малопроизводительный процесс «полистовой» сборки резервуаров, который применялся ранее.

Для удобства изготовления цилиндрических частей резервуара предусматривают следующее. Нижние обечайки, имеющие относительно большую толщину стенок, сваривают между собой

встык, продольные соединения этих обечаек также имеют стыковые швы. Верхние обечайки, имеющие меньшие толщины, сваривают внахлестку.

В настоящее время при рулонировании допускается возникновение пластических деформаций, вызывающих в металле остаточные напряжения, которые, как показали результаты исследований Института электросварки им. Е. О. Патона, не представляют опасности для прочности конструкций. Использование низколегированных сталей расширяет перспективы применения методов рулонирования листов.

Для резервуаров весьма больших размеров рулонирование толстых листов может оказаться затруднительным вследствие раскрытия вертикальных стыков и образования трещин. В этом случае могут быть применены двойные оболочки, каждая из которых рулонируется независимо от другой. Оболочки могут иметь одинаковые или разные толщины листов.

Схематическое расположение швов на цилиндрической части резервуара показано на рис. 19-2, *а*. Продольные стыковые швы в нижней части оболочки располагают или в одну нитку или вразбежку (рис. 19-1, *а* сверху). На рис. 19-2, *б* показан поперечный разрез нижней части оболочки. В верхней части листы соединяют внахлестку, как показано на рис. 19-2, *в, г*. Внешние швы внахлестку накладываются непрерывными, внутренние — прерывистыми. Последнее делается для улучшения условий контроля соединений на плотность. В местах пересечений горизонтальных и вертикальных швов производят подбивку листов, обеспечивающую плотность соединений. Все соединения цилиндрической части оболочек сваривают на заводах автоматами под слоем флюса. Последний замыкающий шов на монтаже выполняют вручную на вертикальной плоскости.

Толщину обечаек проектируют переменной и назначают согласно расчету на прочность. Основными рабочими соединениями являются продольные швы обечаек. Их прочностью определяется толщина стенок резервуара.

Допустим, что давление в резервуаре на глубине y (рис. 19-3, *а*)

$$p = \gamma y, \tag{19.1}$$

где γ — вес единицы объема жидкости;

y — глубина рассматриваемого слоя относительно свободной поверхности.

Определим напряжения в кольце, вырезанном из обечайки, шириной, равной единице.

Рассечем кольцо плоскостью и приложим в месте разреза силы

$$N = \sigma s \cdot 1, \tag{19.2}$$

где σ — напряжение в кольце;

s — толщина кольца.

Условие статического равновесия элемента ds равно

$$-2N + 2\int_0^{\pi/2} pRd\alpha\cos\alpha = 0,$$

откуда

$$N = pR\int_0^{\pi/2}\cos\alpha d\alpha = pR|\sin\alpha\Big|_0^{\pi/2} = pR. \qquad (19.3)$$

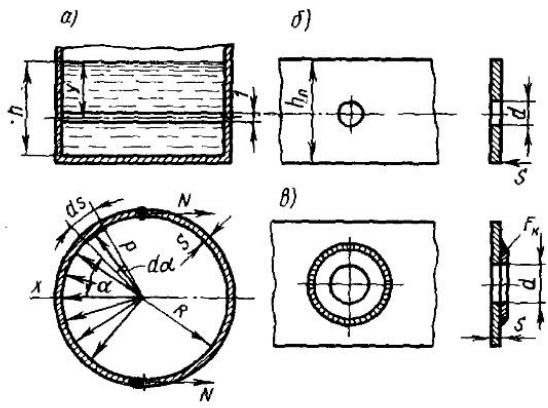


Рис. 19-3. К расчету цилиндрической части резервуара:

а) определение напряжений цилиндрической части;
б) цилиндрическая часть ослаблена отверстиями;
в) цилиндрическая часть в месте отверстия усилена кольцом

Напряжения в кольце равны

$$\sigma = \frac{pR}{s}. \qquad (19.4)$$

Напряжения σ действуют параллельно касательной к цилиндрической поверхности. Они возникают также и в продольном шве обечайки. Поэтому из условий прочности напряжение должно быть

$$\sigma \leqslant [\sigma']_p,$$

где $[\sigma']_p$ — допускаемое напряжение при растяжении в сварном шве.

Требуемую толщину $s_{тр}$ листа обечайки определяют по формуле

$$s_{тр} = \frac{pR}{[\sigma']_p}, \qquad (19.5)$$

где R — радиус цилиндра;

p — давление, которое определяется по формуле (19.1), согласно техническим условиям в сечениях на расстоянии 300 *мм* от нижней кромки пояса рассчитываемой обечайки (см. рис. 19-2, *а*).

Чем меньше давление p, тем соответственно тоньше листы обечайки. По соображениям рационального конструирования наименьшую толщину обечайки в резервуарах принимают рав-

ной 4 *мм*. Поперечные швы в резервуарах напряжены значительно меньше.

При проектировании резервуаров в настоящее время применяют метод расчета прочности по предельному состоянию. При этом допускаемое напряжение определяется по формуле

$$[\sigma]_р = R_р \frac{m}{n}, \qquad (19.6)$$

где $R_р$ — расчетное сопротивление. В резервуарах из стали марок Ст. 3, сваренных электродами Э42 при использовании физических методов контроля швов, расчетное сопротивление равно $R_р = 21$ *кГ/мм*^{2}, а при визуальном методе контроля и применении тех же электродов $R_р = 18$ *кГ/мм*^{2};

m — коэффициент условий работы, равный обычно 0,8;

n — коэффициент перегрузки, равный: 1,1 — для гидростатического давления жидкости; 1,2 — для избыточного давления газов и вакуума; 1,4 — для снеговой нагрузки.

Числовое значение $[\sigma]_р$

$$[\sigma]_р = \frac{21 \cdot 0{,}8}{1{,}1} = 15{,}3 \text{ кГ/мм}^2.$$

Результаты определения толщины поясов резервуара емкостью $V = 5000$ *м*^{3} приведены в табл. 19.1.

Таблица 19.1

Определение толщины s поясов резервуара

№ пояса	h, *см*	h_0, *см*	$s = \frac{pR}{[\sigma']_р}$, *мм*	s, *мм*
VIII	274,0	244,0	1,6	4
VII	420,5	390,5	2,6	4
VI	1148,5	1118,5	7,5	8
I	1292,0	1262,0	8,5	9

Примечание. h — расстояние от расчетного уровня залива жидкости до нижней кромки пояса;
h_0 — то же, для расчетного уровня пояса принимаемого на горизонте A на 300 *мм* выше нижней его стороны (см. рис. 19-2, *а*);
R — радиус цилиндра, равный 1144 *см*;
p — давление, равное 0,001 h. *кГ/см*^{2}.

В соединениях внахлестку распределение напряжений неравномерно. В горизонтальных швах внахлестку на участках двой-

ной толщины растягивающие напряжения, направленные по касательной к окружности, уменьшаются, по сравнению с растягивающими напряжениями на участках вне нахлестки. Соответственно сокращаются величины кольцевых деформаций. Корпус в этих зонах имеет меньший диаметр, нежели между нахлестками, поэтому элементы, направленные по образующей, испытывают изгиб.

Если в поясе предусмотрено отверстие для крепления труб, то обечайка в зоне отверстия ослабляется и в этом случае возможны два варианта расчета.

1. Допустим, что напряжение в сечении, ослабленном отверстием (рис. 19-3, *б*), равно

$$\sigma = \frac{pR}{s}\left(\frac{h_п}{h_п - d}\right) \leqslant [\sigma]_р, \qquad (19.7)$$

где $h_п$ — высота пояса;

d — диаметр отверстия.

В этом случае отверстие не является опасным, так как запас прочности в целом сечении настолько велик, что даже в месте выреза расчетное напряжение σ оказывается меньше допускаемого.

2. Предположим, что напряжение в сечении, ослабленном отверстием, больше допускаемого $[\sigma]_р$. В этом случае обечайку в зоне выреза обычно усиливают (рис. 19-3, *в*), например кольцом. Условно считают, что кольцо возмещает площадь металла, вырезанного из стенки.

Плоское днище резервуара, установленное на песчаное или бетонное основание, не несет рабочих усилий. Днище изготовляют из листов толщиной $4 \div 8$ *мм* в зависимости от диаметра резервуара. Нередко по периферии днища под вертикальными стенками укладывают более толстые листы, нежели в средней части. Например, если в средней части $s = 6$ *мм*, то на периферии $s = 8$ *мм*; если в средней части $s = 4$ *мм*, то на периферии $s = 6$ *мм*.

Проектирование днищ производят с учетом их изготовления на заводе, рулонирования и транспортировки на место установки. Если резервуар имеет значительные размеры, то рулонируют днище частями и на месте установки их сваривают монтажным швом; при малых диаметрах рулонируют все днище. На заводе днище сваривают из листов внахлестку, как показано на рис. 19-1, *в*; в местах пересечений швов производят подбивку. Днища сваривают на автоматах: один из швов нахлестки делают непрерывным, другой — прерывистым для облегчения операции контроля герметичности соединений. Прежде в СССР и за рубежом в конструкциях применялись сегментные кольца, куда вваривались средние части днищ. В настоящее время от этих конструкций отказались.

Соединение цилиндрической части с днищем является ответственным элементом конструкции (рис. 19-4, *а*). В месте соединения возникает изгибающий момент M. Величина момента зависит от толщины вертикальной стенки и днища, коэффициента жесткости основания и от длины участка листа днища (консоли), выступающего за стенку.

Напряжение направлено параллельно образующей. Эпюра распределения напряжений от момента по высоте стенки резервуара показана на рис. 19-4, *б*. Установлено, что соединение цилиндрической части с днищем двумя непрерывными швами обеспечивает прочность, поэтому обычно специального расчета на прочность для этого соединения не производят.

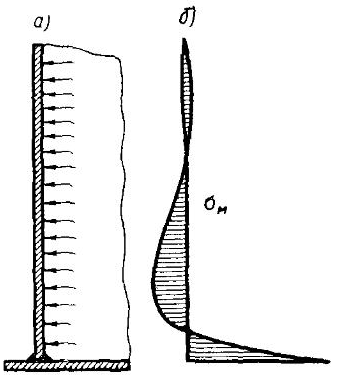


Рис. 19-4. Соединение цилиндра с днищем: а) вид соединения; б) эпюра напряжения от изгиба

§ 2. ПОКРЫТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

Крыши резервуаров проектируют с учетом выполнения основного объема заготовительных и сварочных работ на заводе. Рационально предусмотреть среднюю стойку. При этих условиях покрытие расчленяют на отдельные щиты, имеющие в одних случаях треугольное очертание, в других — трапецеидальное. Щит состоит из двух элементов, направленных радиально, нескольких поперечин и кровельной стали, привариваемой к ним. Радиальные и поперечные элементы образуют каркас щита. Их конструируют из профильных прокатных, гнутых или штампованных заготовок. Щит с одной стороны приваривают к оболочке, с другой — опирают на центральную стойку (см. рис. 19-1).

Листовая сталь кровли имеет толщину листа $s = \div 2—3$ *мм*. Элементы каркаса воспринимают вертикальную нагрузку от собственного веса, веса снега, учитываемого в зависимости от района, угла наклона кровли и веса людей, которые могут находиться на кровле. Листовое покрытие кровли рассматривается при расчете прочности как пластина, опертая по контуру. Приближенно пластина при расчете может приниматься прямоугольной (см. рис. 19-1, *г*). Обозначим через a меньшую сторону прямоугольника, b — большую. Напряжения в пластине от нагрузок q, равномерно распределенных по ее плоскости, равны

$$\sigma = \alpha \frac{6qa^2}{s^2}, \qquad (19.8)$$

где q — нагрузка от веса снега и собственного веса кровли, $кГ/см^2$;

$\alpha = 0{,}192$ при $a = b$;

$\alpha = 0{,}407$ при $a = 0{,}5b$;

s — толщина кровли, *см*.

Вес человека P может рассматриваться в качестве эквивалентной распределенной нагрузки

$$q_0 = \frac{2P}{ab}. \qquad (19.9)$$

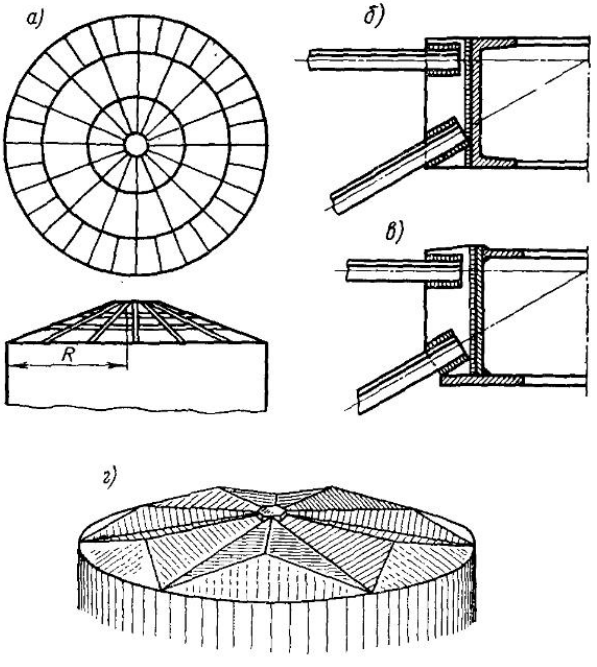


Рис. 19-5. Схема сборки крыши резервуара:

а) схема перекрытия; *б), в)* примеры прикреплений фермы к центральному кольцу; *г)* пример складчато-конического покрытия

Каркас расчленяют на отдельные стержни, которые рассматривают при расчете на прочность как свободно опертые балки, работающие на поперечный изгиб под действием вертикальных сил.

Средняя стойка воспринимает около 33% всей вертикальной нагрузки на крышу. Она нагружена центрально при условии симметричного загружения снегом всей крыши, но может быть также нагружена эксцентрично. Стойку рассматривают как элемент, шарнирно закрепленный по концам, и проектируют согласно принципам расчета, изложенным в гл. XV. Она может иметь решетчатую форму и форму трубы, которую потом заполняют песком. Иногда ее используют в качестве барабана для навивки рулонированной поверхности днища. В некоторых конструкциях резервуаров средняя стойка отсутствует.

Конструкции резервуаров при щитовых кровлях без средних стоек менее удобны, нежели со стойками. Они имели раньше широкое распространение, в особенности в резервуарах небольших и средних емкостей.

Покрытия резервуаров могут выполняться складчато-коническими (рис. 19-5, *г*), что обеспечивает значительную жесткость как местную у отдельных элементов, так и общую у всего покрытия.

Вид крыши с фермами показан на рис. 19-5, *а*. Стропила поддерживаются кольцом, сконструированным в форме загнутого по кольцу прокатного (рис. 19-5, *б*) или сварного (рис. 19-5, *в*) элемента. Стропила проектируют из прокатных двутавров, швеллеров и т. п. или из сквозных элементов. Их соединяют с цилиндрической частью с помощью вертикальных косынок. Цилиндрическая часть опоясывается сверху уголком небольшого калибра в зависимости от диаметра резервуара.

Примеры проектов резервуаров, разработанных ЦНИИ «Проектстальконструкция», схематически изображены на рис. 19-6. Резервуар на рис. 19-6, *а* имеет емкость 5000 $м^3$, а на рис. 19-6, *б* — 700 $м^3$. Вес снеговой нагрузки принят 100 $кГ/м^2$. Вес горючего — 800 $кг/м^3$. Они не имеют средних стоек, кровли в середине поддерживаются кольцом, к которому прикрепляются швеллеры. Последние соединены между собой поперечными элементами и диагональными связями из уголков. Цилиндрическая часть сварена из листов продольными и кольцевыми швами внахлестку. Стенки резервуаров укреплены кольцевыми горизонтальными ребрами жесткости. Расположение поясов ступенчатое. Днища состоят из листов, сваренных внахлестку. В резервуаре малого диаметра расположение листов в днище радиальное, в большом они сварены в форме карт.

Непрерывно ведутся работы по увеличению кубатуры цилиндрических резервуаров. В настоящее время проектируют резервуары емкостью до 60 000 $м^3$ с широким использованием автоматических методов сварки и индустриального изготовления.

Проектируют резервуары больших диаметров с составными стенками цилиндрической части, соединенными из двух и более

тонких листов. С целью повысить жесткость тонкостенных поясов в верхней малонагруженной части резервуаров предусматривают «зиги», направленные по кольцу и позволяющие использовать листы толщиной 3 *мм*.

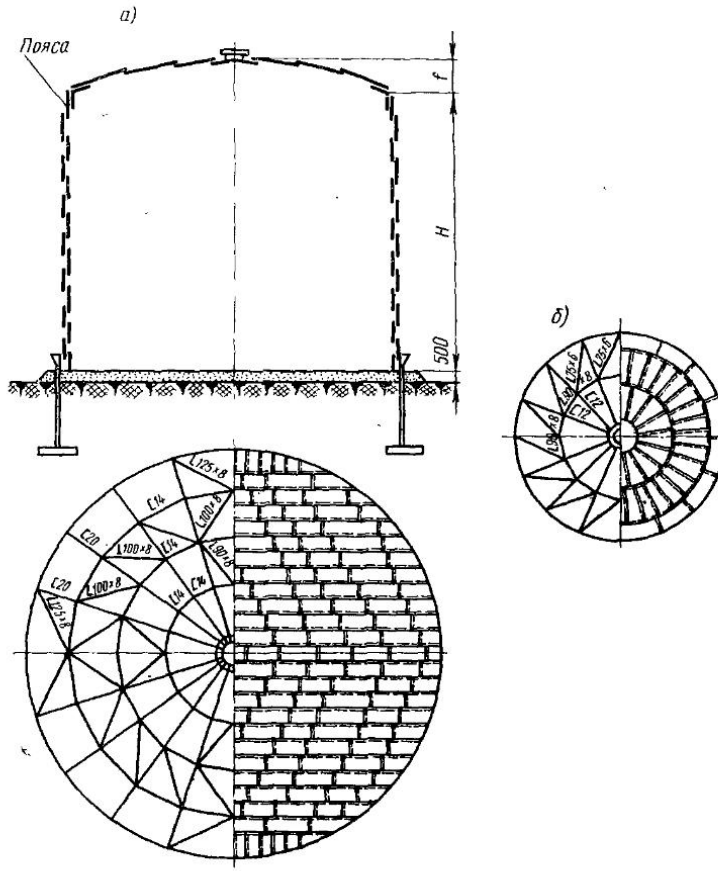


Рис. 19-6. Примеры типовых резервуаров:
а) емкостью 5000 *м*³; *б)* емкостью 700 *м*³

§ 3. РЕЗЕРВУАРЫ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ДНИЩАМИ

В некоторых конструкциях резервуаров, например в баках, устанавливаемых на водонапорных башнях, плоские днища оказываются нецелесообразными. Их заменяют сферическими днищами, как правило, выпуклыми (рис. 19-7, *а, б*). Расчет прочности и конструирование цилиндрической части и днища таких

баков производят теми же методами, что и расчет прочности и конструирование сосудов для хранения нефтепродуктов. В продольных швах баков с выпуклыми днищами, опертыми по контуру, образуются напряжения, равные

$$\sigma = \frac{pR}{s}, \tag{19.10}$$

где p — давление жидкости на днище.

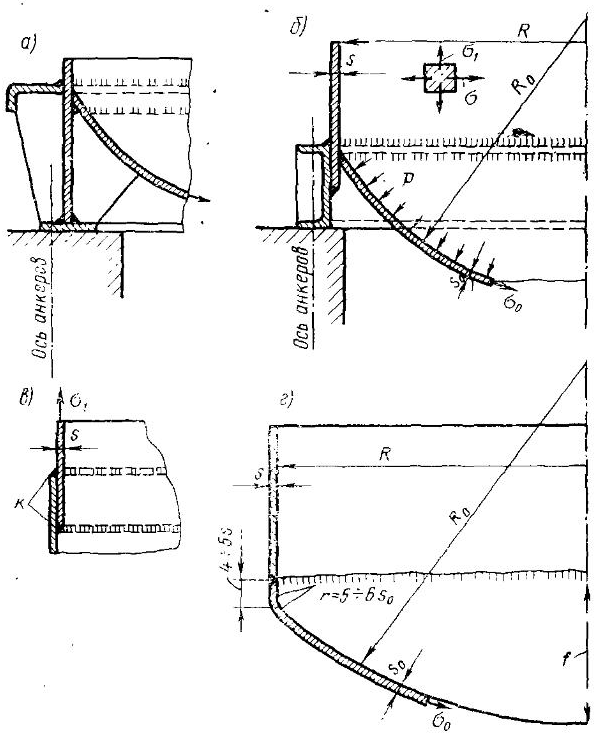


Рис. 19-7. Резервуары со сферическими днищами:

а) усиление соединения цилиндра с днищем уголком; *б)* то же, швеллером; *в)* схема работы поперечного шва; *г)* схема плавного соединения цилиндра и днища

В кольцевых соединениях, сваренных при двойных швах внахлестку (рис. 19-7, *в*), окружные напряжения незначительны.

Ввиду относительно небольших размеров h и R баков этого типа толщину стенок s цилиндрической части назначают из соображений рационального конструирования.

Напряжение в сферическом днище (рис. 19-7, *а, б*) определяется по формуле

$$\sigma_0 = \frac{pR_0}{2s_0}. \qquad (19.11)$$

где p — давление в рассматриваемой точке днища;
s_0 — толщина днища;
R_0 — радиус сферической поверхности днища.

С увеличением радиуса R_0, т. е. с приближением сферической поверхности к плоскости, напряжение в днище при заданном давлении p возрастает и легко достигает предела текучести обычно при

$$R_0 > 2R.$$

Чтобы устранить значительной величины сжатие и напряжения изгиба в месте соединения цилиндра с днищем, применяют плавное сопряжение в форме переходных кривых, как показано на рис. 19-7, *г* $a = 4s_0$. Применяя эллиптические днища при некоторых формах очертаний, можно избежать напряжений сжатия в зоне сопряжения цилиндра с днищем или довести их до незначительной величины. В нижней точке эллиптического днища при стреле прогиба $f = R/2$ напряжение равно

$$\sigma = \frac{pR}{2s_0}. \qquad (19.12)$$

где p — давление в нижней точке днища;
s_0 — толщина листов днища.

Напряжения в месте сопряжения эллиптического днища с корпусом по направлению касательной определяют по формуле

$$\sigma = \frac{pR}{s_0}\left(1 - \frac{2V}{\pi R^2 h}\right), \qquad (19.13)$$

а по меридиональному направлению — по формуле

$$\sigma_1 = \frac{Vp}{2\pi R s_0 h}, \qquad (19.14)$$

где h — высота столба жидкости;
V — объем жидкости в резервуаре;
R — радиус цилиндрической части.

Пример расчета. Разработать конструкцию бака (рис. 19-8) из стали марки Ст. 2; $[\sigma]_р = 1400$ *кГ/см*^{2}; $[\sigma']_р = [\sigma]_р$. Высота бака $h = 6{,}0$ *м*; диаметр $D = 4{,}0$ *м*; стрела прогиба днища $f = 0{,}5$ *м*. Ширину листов принимаем равной 1500 *мм*. Толщину нижнего пояса определяем по величине давления на уровне

300 *мм* выше нижней его кромки. Для пояса *I* (считая снизу) на глубине $h_0=5700$ *мм* $p=0{,}57$ *кГ/см*^{2}, поэтому

$$s_{тр}=\frac{pR}{[\sigma']_р}=\frac{0{,}57\cdot 200}{1400}=0{,}08\ см.$$

Конструкция бака с такой толщиной стенок обладает недостаточной жесткостью, поэтому принимаем $s=3$ *мм*. При этом $\sigma=380$ *кГ/см*^{2}.

Определяем радиус днища R_0 по соотношению

$$R_0=\frac{R^2+f^2}{2f}=\frac{\sqrt{200^2+50^2}}{2\cdot 50}=425\ см.$$

Толщину днища принимаем $s_0=5$ *мм*. Напряжение в нижней точке днища на глубине 6,5 *м* при давлении $p=0{,}65$ *кГ/см*^{2}

$$\sigma=\frac{pR_0}{2s_0}=\frac{0{,}65\cdot 425}{2\cdot 0{,}5}=276\ кГ/см^2.$$

Место соединения цилиндрической части с днищем для обеспечения его устойчивости укрепляем уголком 80×80×6 *мм*.

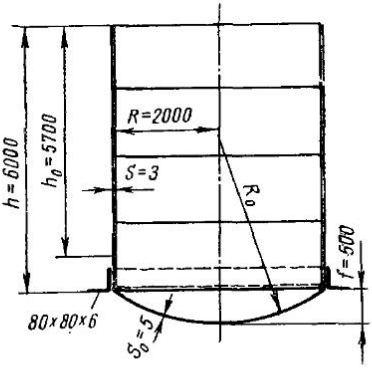


Рис. 19-8. К примеру расчета резервуара

Пример крупногабаритного резервуара со сферическим днищем приведен на рис. 19-9. Его емкость — 2000 *м*^{3}, диаметр $D_{вн}=15{,}8$ *м*. Днище и кровля сферической формы обеспечили достаточную прочность при $s=4$ *мм* без поддерживающих устройств. Для устранения концентрации напряжений сопряжения цилиндрической части резервуара со сферой сконструированы с помощью переходных кривых. Такой тип резервуара рационален в случае возможного повышения внутреннего давления.

§ 4. СФЕРИЧЕСКИЕ И КАПЛЕВИДНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ

В целях экономного использования металла в различных отраслях химической промышленности строят резервуары в виде сфер различных диаметров. Сферические резервуары применяют для хранения сжиженных газов или газов под давлением 2—6 *атм* (рис 19-10, *а*). У нас часто применяются сферические резервуары объемом 600 и 2000 *м*^{3}, однако экономически целесообразнее использовать более крупные. За рубежом такие конструкции достигают 30 000 *м*^{3} и более. В сферических резервуа-

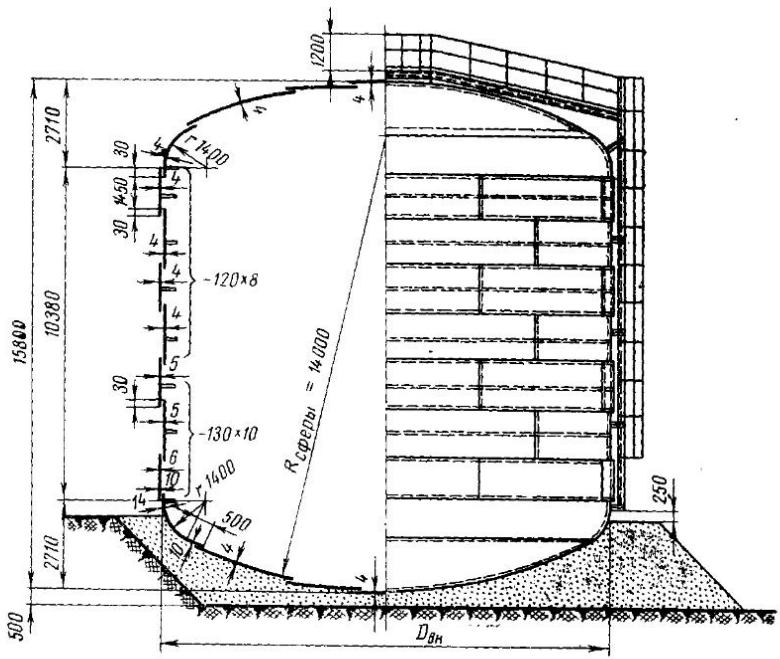


Рис. 19-9. Резервуар с выпуклым днищем

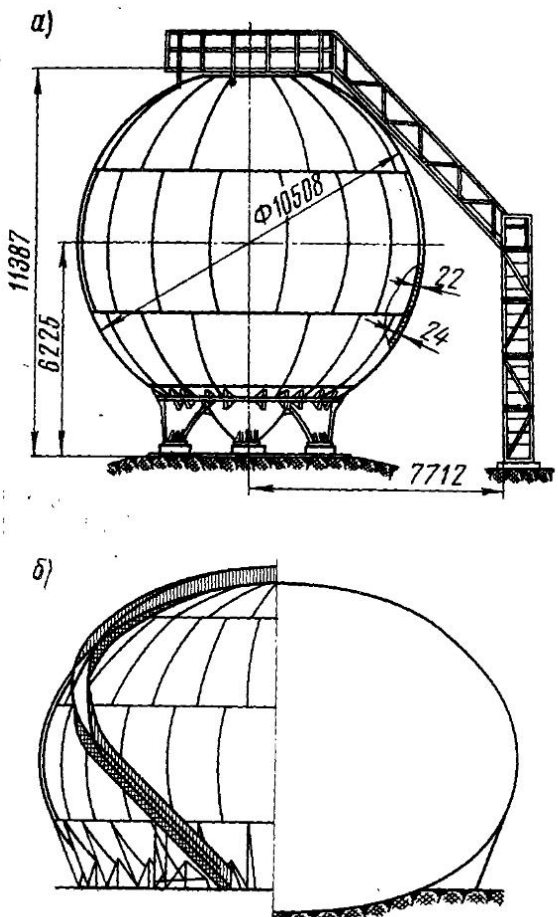


Рис. 19-10. Конструкции сферического (*а*) и каплевидного (*б*) резервуаров →

рах лепестки соединяются встык, их толщина обычно составляет 10—30 *мм* и, как правило, не превышает 40 *мм*. Это ограничение толщины диктуется отсутствием термообработки конструкции после сварки.

Напряжения в стенке сферического резервуара определяют по формуле

$$\sigma = \frac{pR_0}{2s_0}, \qquad (19.15)$$

где R_0 — радиус сферы;

s_0 — толщина стенок.

Напряжение в сферическом резервуаре в 2 раза меньше, нежели в цилиндрическом, при одинаковых радиусах и толщинах стенок. Поэтому вес сферических резервуаров меньше цилиндрических, но изготовление сложнее. За рубежом сферическими выполняют конструкции атомных реакторов.

Для устранения потерь продуктов создаются резервуары каплевидной формы емкостью до нескольких десятков тысяч кубометров, способные выдерживать избыточное давление газов, вызванное повышением температуры T. Пример конструкции каплевидного резервуара приведен на рис. 19-10, *б*. Вследствие некоторой сложности изготовления эти конструкции широкого распространения в строительстве не получили.

§ 5. ЦИСТЕРНЫ

Листовые конструкции цистерн применяют в железнодорожном и автомобильном транспорте, для стационарных установок при хранении воды и других жидкостей и т. п. Расчет на прочность цистерн производят аналогично резервуарам; при этом определяют напряжения, действующие по касательной к окружности.

Так как давление p от веса жидкости, как правило, очень мало, то определение толщины стенок на основании формулы (19.5) приводит к очень малой величине толщины s. Такие цистерны не обладают достаточной жесткостью. Поэтому расчетные давления определяют согласно специальным техническим указаниям.

Помимо напряжений, действующих по касательной к окружности (в продольных сечениях) и определяемых формулой

$$\sigma = \frac{pR}{s},$$

в цистернах под давлением p образуются напряжения, направленные параллельно образующим (в кольцевых швах). Эти напряжения равны

$$\sigma_1 = \frac{pR}{2s}.$$

Напряжение σ_1 в 2 раза меньше, чем σ.

На рис. 19-11 приведен пример горизонтальной стационарной цистерны из стали марки МСт. 3 емкостью 75 $м^3$, диаметром 3,242 *м*, длиной 9,838 *м*. Цилиндрическая часть имеет продольные швы, расположенные вразбежку, и кольцевые, сваренные внахлестку. Толщина стенок цилиндрической части и днищ $s=4$ *мм*. Днища сварены из нескольких листов встык и имеют форму сфер с $R_0=3{,}242$ *м*. Сопряжения цилиндра с днищем плавные (для устранения изгиба).

В некоторых случаях днищам цистерн придают другие формы, например с радиусом, равным радиусу цилиндра. Днища делают иногда коническими и даже плоскими. Последняя форма

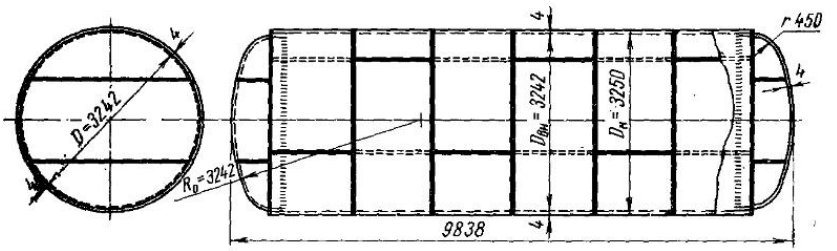


Рис. 19-11. Сварная горизонтальная цистерна

проста в технологическом отношении, но при этом в ней образуются значительные напряжения от изгиба и, как правило, пластические деформации.

§ 6. МЕСТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

В листовых конструкциях возле отверстий для приварки различного рода труб, патрубков, штуцеров образуются местные напряжения со значительной концентрацией. Для ослабления эффекта выреза прибегают к местным усилениям стенки, например приваривают кольца, как это указано на рис. 19-12, *а*. Такое усиление применяют наиболее часто в резервуарах. Если диаметр патрубка невелик, применение усиливающего кольца становится необязательным (рис. 19-12, *б*). Для повышения прочности соединения производят глубокий провар шва (рис. 19-12, *в*). Устранение концентрации напряжений достигается применением соединений, изображенных на рис. 19-12, *г*. Их применяют, несмотря на то, что они наиболее трудны при изготовлении.

Приварка патрубков оказывает значительное влияние на прочность резервуаров при работе под переменными нагрузками.

Несущая способность листовых конструкций и условия их разрушений в значительной степени зависят от энергоемкости, т. е. запаса энергии среды жидкости или газа, наполняющей резервуар. При наличии газообразной фазы в сосудах общий запас энергии значительно повышается, по сравнению с наличием

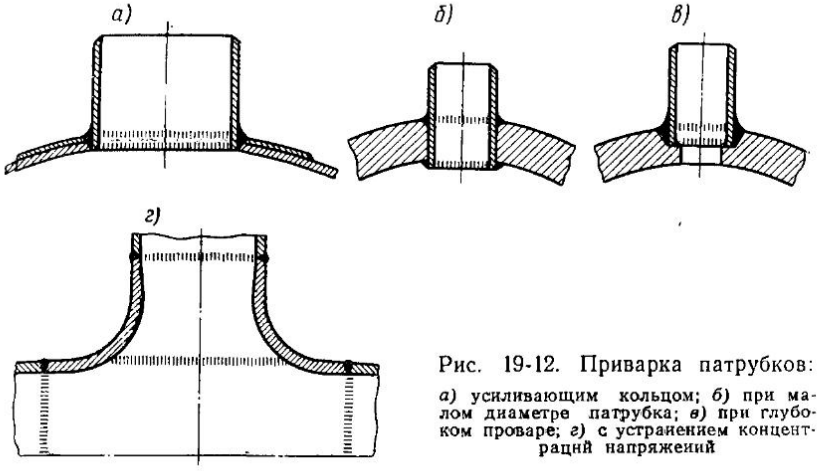


Рис. 19-12. Приварка патрубков:
а) усиливающим кольцом; *б)* при малом диаметре патрубка; *в)* при глубоком проваре; *г)* с устранением концентрацнй напряжений

только жидкости. Чем выше энергия среды, тем более бурно происходит разрушение изделия при испытании, возрастает скорость разлетания осколков. Экспериментально показано, что с увеличением энергоемкости изменяется сопротивляемость хрупким разрушениям. Несколько понижается несущая способность, резко падают пластические свойства. При действии переменных

Таблица 19.2

Пределы выносливости соединеиий труб

Деталь испытуемая	σ_{-1}, кГ/мм²
Целый металл	17,0
Целый металл с отверстнем	13,0
Пластина со штуцером, вваренным односторонним швом	9,0
То же, двусторонним швом	9,2
То же, двусторонним швом с последующим отпуском при 620° С	13,7
То же, с последующим отпуском при 620° С и проковкой пневматическим молотком	15,2

нагрузок прочность листовых конструкций значительно снижается. Снижение прочности имеет место в еще большей степени при усталостных нагружениях. Разрушения при усталостных нагружениях образуются в зонах концентрации напряжений: в местах приварки фланцев, труб, патрубков, штуцеров и т. д. В табл. 19.2 приводятся некоторые характеристики усталостной прочности соединений труб с трубными досками при знакопеременных нагружениях.

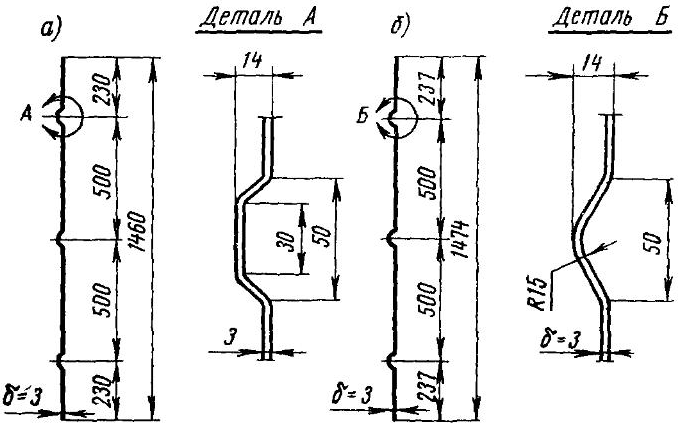


Рис. 19-13. Гофры на вертикальных стенках резервуаров:
а) трапецеидальные; *б)* закруглённые

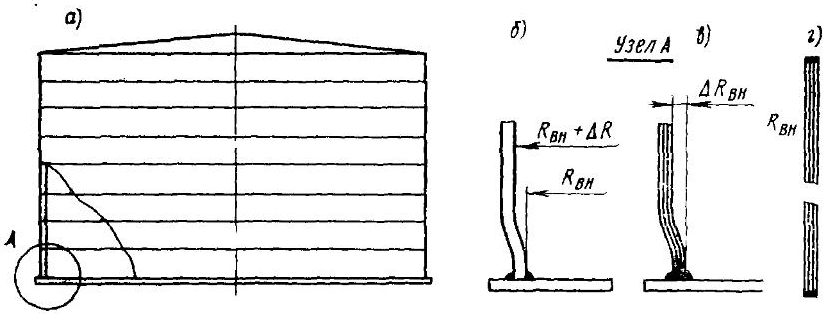


Рис. 19-14. Резервуар с многослойными вставками для борьбы с возникновением и распространением хрупких трещин

В отдельных случаях в резервуарах образуются хрупкие разрушения — трещины. Они возникают преимущественно при наличии дефектов, в конструктивных концентраторах напряжений, при низкой температуре.

Для устранения образования трещин необходимо правильно выбирать металл, технологический процесс. В частности, для повышения податливости прибегают к устройству гофров вдоль шва в вертикальной стенке (рис. 19-13) и к применению в узлах многослойных вставок (рис. 19-14, *а—г*), способствующих устранению возникновения и развития трещин.

§ 7. ГАЗГОЛЬДЕРЫ

Газгольдеры предназначены для хранения газов. Их конструируют в форме сосудов постоянного давления или постоянного объема. Последние более просты в изготовлении и позволяют хранить газ под высоким давлением.

Газгольдеры постоянного объема в большинстве своем имеют цилиндрическую форму диаметром несколько метров, с выпук-

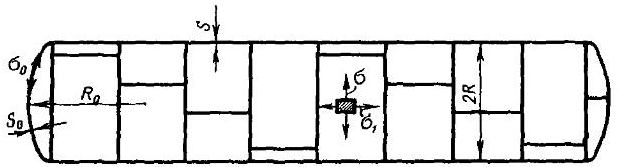


Рис. 19-15. Конструкция газгольдера постоянного объема

лыми, а нередко полусферическими днищами. Продольные и кольцевые швы их целесообразнее сваривать автоматами под флюсом встык.

Давление в газгольдере везде одинаково. Все швы (продольные, поперечные, в цилиндрической части, а также в сферах) являются рабочими.

Напряжения в продольном шве цилиндрической части радиуса R с толщиной стенки s равны

$$\sigma = \frac{pR}{s},$$

а в поперечном шве —

$$\sigma_1 = \frac{pR}{2s}.$$

Напряжения в сферической части радиусом R_0 и толщиной s_0 составляет

$$\sigma_0 = \frac{pR_0}{2s_0}.$$

Подбор толщины стенок производят обычно по допускаемым напряжениям, определяемым условием предельного состояния,

с учетом в первую очередь прочности продольного шва. Пример конструкции газгольдера постоянного объема приведен на рис. 19-15.

§ 8. ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ И ЦИСТЕРН

Алюминиевые сплавы применяют для листовых конструкций в химическом машиностроении. Такие конструкции обладают

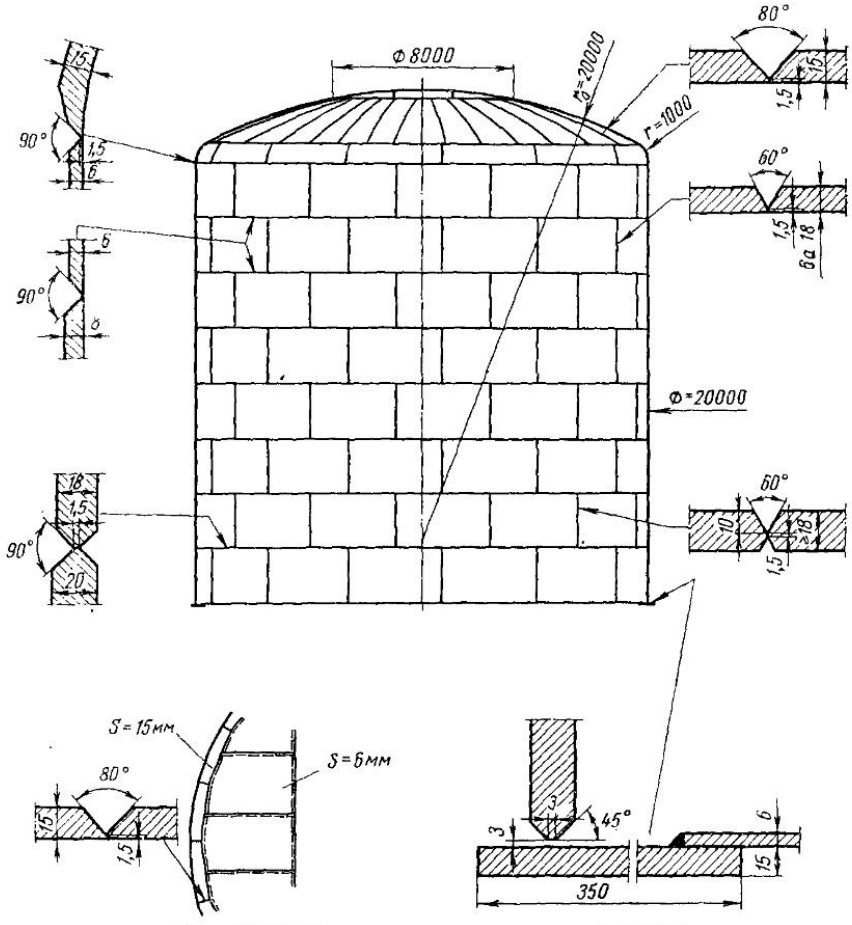


Рис. 19-16. Резервуар из алюминиевого сплава

повышенной антикоррозионностью, легким весом и сохраняют пластические и вязкие свойства при работе в условиях низких температур. Из листовых элементов изготавливают различные

резервуары хранилищ, стационарные и транспортные цистерны, вакуумные аппараты, специальные трубопроводы, теплообменники и т. п. На рис. 19-16 приведен пример резервуара из алюминиевого сплава, сваренного аргонодуговой сваркой. Диаметр резервуара — 20 *м*, высота — также 20 *м*. Все швы сварены встык; толщины стенок цилиндрической части $s=6 \div 20$ *мм*, сферического перекрытия — 15 *мм*, днища в сегментном кольце — 15 *мм* и в средней части — 6 *мм*.

Значительное количество цистерн и резервуаров, выполненных в СССР, сварено автоматами по флюсу. Хорошо свариваются этим способом конструкции из сплава АМг-6 и др.

Соединения конструкций из алюминиевого сплава иногда обладают недостаточной сопротивляемостью образованию кристаллизационных трещин при сварке. Поэтому при проектировании следует учитывать это обстоятельство и принимать меры, чтобы не допустить соединений очень высокой жесткости, при сварке которых образование трещин наиболее вероятно.

§ 9. КОНСТРУКЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО И ДРУГИХ КОМПЛЕКСОВ

На рис. 19-17 показана конструкция кожуха домны из стали марки 14Г2. Ее внутренний диаметр — 13,2 *м*, высота — 41,0 *м*. Горизонтальные швы имеют К-образную подготовку кромок. Зазор между листами равен 2 *мм* для швов, выполняемых в заводских условиях, или 4 *мм* для монтажных.

Вертикальные швы соединяемых листов не имеют разделок, зазоры между кромками составляют $18 \div 40$ *мм* в зависимости от толщины листов.

Кожух домны сваривают из обечаек кольцевыми швами. Каждая обечайка состоит из листов, соединенных между собой вертикальными меридиональными швами. Соединения кожуха сваривают встык электродуговой или электрошлаковой сваркой. Толщины листов варьируют в пределах от 15 до 40 *мм*. Кожухи домен в основном изготавливают из стали Ст. 3, но для уменьшения веса обечаек применяют низколегированную сталь марок 15ХСНД, 10Г2С1 (МК) и др. Весьма существенным является применение сталей, обладающих хорошей пластичностью.

На рис. 19-18 показан воздухоподогреватель из стали марки 14Г2, изготовленный методом рулонирования. Его диаметр — 9 *м*, высота — 42,6 *м*. Пояса сваривают на заводе-изготовителе из относительно узких листов, расположенных своей длиной, равной 6 *м*, по образующей цилиндра, что облегчает применение метода рулонирования.

Толщина стенок поясов воздухоподогревателя — 10 *мм*, за исключением нижнего, имеющего толщину 16 *мм*. Кромки

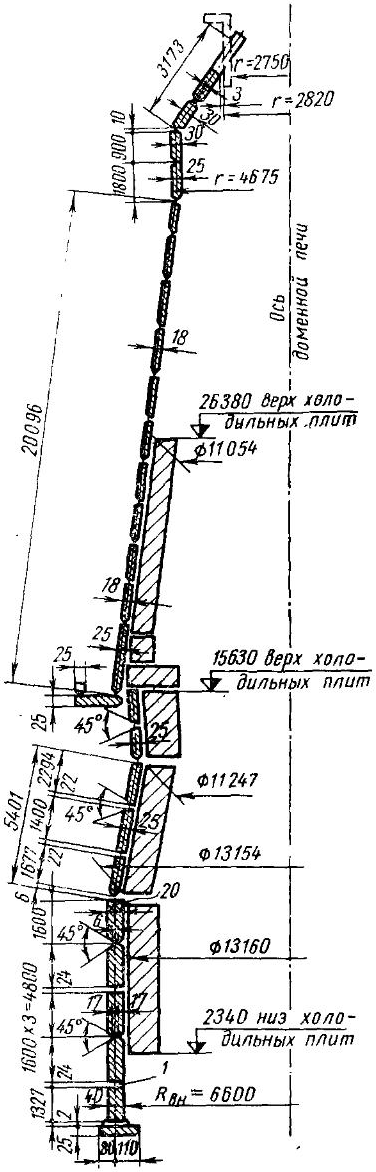


Рис. 19-17. Сварная домна

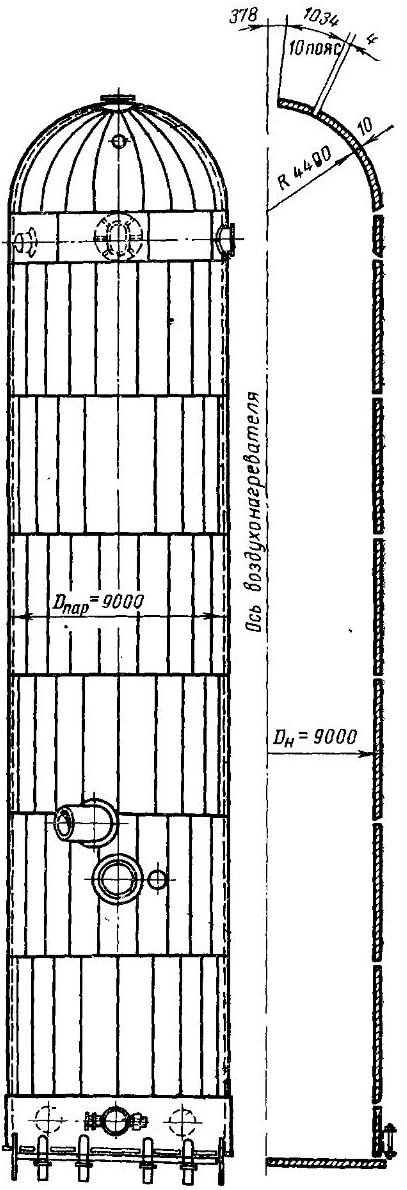


Рис. 19-18. Сварной воздухоподогреватель

стыкуемых листов поясов имеют односторонний скос. Сварка на заводе выполнена на автоматах под слоем флюса на монтажной площадке — электродами высокого качества. Стенки воздухоподогревателя в зоне лазов усилены кольцами из полосовой стали.

Кожух домны рассчитывается на прочность с учетом следующих видов нагрузок: давления газа, усилий, вызванных распором шихты, усилий от температурного распора, давления от жидкого чугуна (рис. 19-19).

Расчет домны делается в двух предположениях. В более трудных условиях протекает работа кожуха в случае частичного прогорания футеровки. Обозначим это состояние № 1. В более легких условиях работает кожух при отсутствии прогорания футеровки. Обозначим это состояние № 2. Наибольшие напряжения имеют место в продольных сечениях кожуха — в продольных швах.

Определим величины напряжений при состоянии № 1.

Напряжения, вызванные давлением газов, в продольных швах

$$\sigma_г = \frac{pr}{s},$$

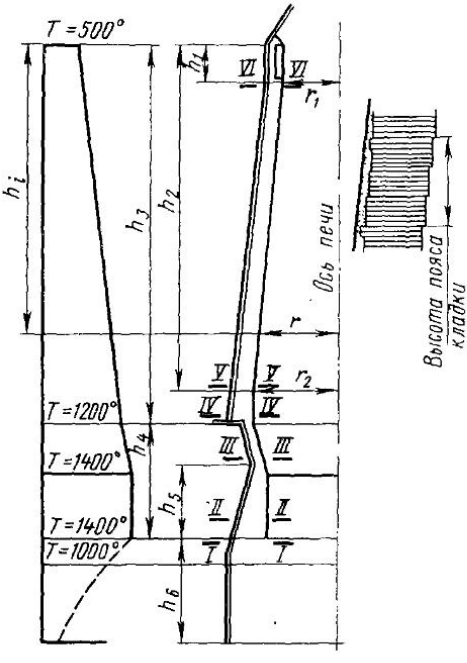


Рис. 19-19. К расчету кожуха домны

где p — нормативное давление газов; оно принимается: на колошнике 1,8 — 2,5 $кГ/см^2$, у фурм — 2,5 — 4 $кГ/см^2$;

r — радиус кожуха на соответствующем горизонте;

s — толщина стенки кожуха.

Напряжения в продольном сечении, вызванные распором шихты,

$$\sigma_ш = \frac{p' r_1}{s}, \qquad (19.16)$$

где p' — давление в горне, принимаемое равным около $0{,}70r_1$, $кГ/см^2$;

r_1 — радиус горна по внутренней грани кладки, $м$;

в сечении III—III

$$\sigma_{ш} = \frac{0{,}70\, r_1 r}{s} \ кГ/см^2. \qquad (19.17)$$

В сечениях кожуха *IV—IV* и *V—V*

$$\sigma_{ш} = \frac{0{,}20 r_2 r}{s} \ кГ/см^2, \qquad (19.18)$$

где давление в распаре принимается равным $0{,}20r_2$, $кГ/см^2$;

r_2 — радиус распара по внутренней грани кладки, *м*.

Напряжения в продольных швах от жидкого чугуна

$$\sigma_{ч} = \frac{0{,}75\, h_2 r}{s} \ кГ/см^2, \qquad (19.19)$$

где h_2 — расстояние от чугунной летки (прямоугольное отверстие) до оси фурм, *м*;

r и s — радиус и толщина стенки кожуха, *см*.

Около сечения *I—I* выше лещади (массива, верхом которого является под печи)

$$\sigma_{ч} = \frac{0{,}75\,(h_1 + h_2)\, r}{s}, \qquad (19.20)$$

где h_1 — расстояние от чугунной летки до низа лещади.

Напряжения в продольных швах кожуха от действия температуры при расширении кладки в домнах объемом 1300—2000 $м^3$ определяются в зависимости от отношения $\Sigma\delta$ к $2\pi r$ (где $\Sigma\delta$ — сумма вертикальных зазоров между холодильниками), значения которого приводятся ниже:

$\Sigma\delta/2\pi r$, %	σ_t, $кГ/см^2$
0,1	1200—1700
1	400—550
2	175—300
5	20—50

Указанные соотношения даны в приближенной форме для печей, у которых холодильники расположены ниже мораторного кольца. Как видно, температурные напряжения σ_t при зазорах значительной величины невелики.

Расчетные суммарные напряжения составляют

$$\sigma_{прод} = 1{,}15\sigma_г + 1{,}2\sigma_ш + 1{,}1\sigma_ч + \sigma_t \leqslant [\sigma']_р. \qquad (19.21)$$

Числовые коэффициенты означают коэффициенты перегрузки; σ_t может быть принято равным 300 $кг/см^2$.

Помимо напряжений в продольных швах, в кожухах образуются напряжения в кольцевых швах, вследствие замкнутого характера оболочек и в результате скольжения кладки по набойке кожуха.

Напряжения в кольцевых швах (поперечные) определяются по формуле

$$\sigma_{поп} = \sigma'_2 + k_{тр}\,\frac{1{,}15\sigma_г + 1{,}2\sigma_ш + 1{,}1\sigma_ч + \sigma_t}{r}\,\frac{h_i}{2}, \qquad (19.22)$$

где σ'_2 — расчетное напряжение от нормативного давления p газа, равное $pr/2s$;

h_i — расстояние от верха домны до рассматриваемого кольцевого шва (см. рис. 19-19);

$\sigma_г$, $\sigma_ш$, $\sigma_ч$, σ_t — находятся по ранее приведенным формулам;

$k_{тр}$ — коэффициент трения, равный 0,5—0,3.

Определив $\sigma_{прод}$ и $\sigma_{поп}$, находят эквивалентные напряжения

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\sigma^2_{прод} + \sigma^2_{поп} - \sigma_{прод}\,\sigma_{поп}} \leqslant [\sigma']_р. \qquad (19.23)$$

При состоянии № 2 следует определить напряжения, вызванные давлением газа и распором шихты:

$$\sigma_г = \frac{0{,}5\,pr}{s}, \qquad (19.24)$$

$$\sigma_ш = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}20\,r_2 r}{s} \text{ (сеч. } IV \text{ и } V). \qquad (19.25)$$

Остальные напряжения ($\sigma_ч$ и σ_t) находятся по формулам, приведенным выше.

§ 10. КОТЛЫ И СОСУДЫ, РАБОТАЮЩИЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

КОТЛЫ

В котельные агрегаты, работающие под давлением, входят барабан, экономайзеры, пароперегреватели и камеры.

Барабаны котлов высокой производительности имеют диаметры 1600—1800 *мм*, толщина их стенок достигает 100 *мм*, длина бывает различной. Барабан состоит из отдельных обечаек; днища барабанов, как правило, штампованные. Все соединения барабанов выполняются электрошлаковой и дуговой сваркой.

На рис. 19-20 изображен барабан котла ТП-80. Его длина — 16,2 *м*, толщина стенок — 89 *мм*. Все соединения сварены встык, продольные швы — вразбежку.

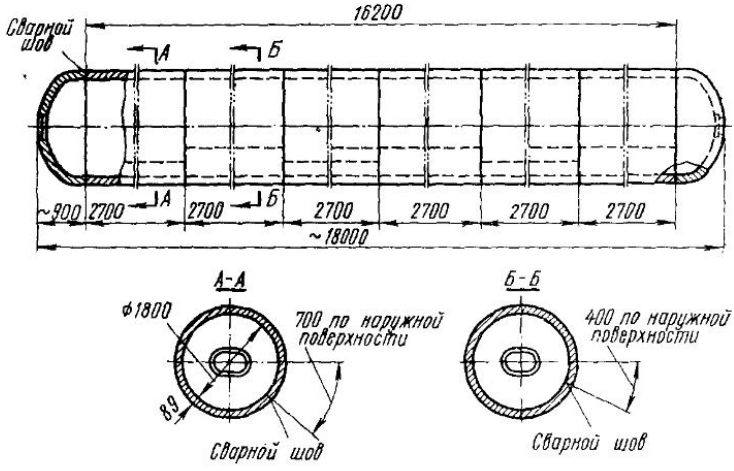


Рис. 19-20. Общий вид сварного барабана котла ТП-80

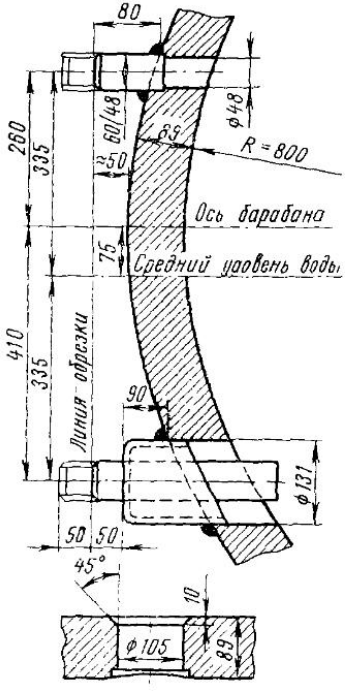


Рис. 19-21. Сварные узлы барабана котла ТП-42: приварка штуцеров

На рис. 19-21 изображены некоторые типичные узлы барабана котла ТП-42 с большим количеством штуцеров. Они изготовляются из отрезков труб и обвариваются по контурам.

При температуре стенок котла $T \leqslant 450°$ С применяют трубы из углеродистых сталей, при $T > 450°$ С целесообразнее применять трубы из низколегированной стали.

При давлении в барабане $p < 60$ *кГ/см*^{2} применяют стали марок 15К, 20К, а при $p > 60$ *кГ/см*^{2} — сталь марки 22К. Ниже приведены некоторые рекомендации по выбору сталей в зависимости от эксплуатационных условий. Материалы, применяемые для изготовления элементов котлов, пароперегревателей, экономайзеров, приведены в табл. 19.3.

Таблица 19.3

Рекомендуемые стали

Марка стали	ГОСТ	Предельная температура стенки $T°$, С	Предельное давление среды, $кГ/см^2$	Примечание
Ст. 2КП	1380—60			
Ст. 3КП	гр. А, Б	150	6	Для необогреваемых элементов
Ст. 2СП				
ВСт. 3СП	То же	200	8	—
15К	5520—62	450	не ограничено	—
20К	То же	То же	То же	—
22К	»	»	»	—
09Г2С	5520—62	450	не ограничено	—
15ХМ	4543—61	550	не ограничено	—
Х18Н10Т	5632—61	565	не ограничено	—

Допускаемое напряжение в конструкциях котлов, испытывающих внутреннее давление, определяют по следующей формуле:

$$[\sigma]_р = [\sigma]_{ро}\,\eta \;\; кГ/см^2, \qquad (19.26)$$

где $[\sigma]_{ро}$ — номинальное допускаемое напряжение для сталей.

Значения коэффициента η снижения допускаемых напряжений в зависимости от формы конструкций приведены в табл. 19.4, а номинальных допускаемых напряжений $[\sigma]_{ро}$ — в табл. 19.5.

Для промежуточных значений температуры допускаемые напряжения следует определять с учетом линейной интерполяции между ближайшими значениями.

Толщины стенок элементов котла определяются по следующим формулам:

цилиндрической части барабана

$$s_{тр} = \frac{p d_{вн}}{200\varphi\,[\sigma]_р - p} + \Delta s \;[мм], \qquad (19.27)$$

Таблица 19.

Значение коэффициента η

Виды элементов и особенности работы	η
Барабаны	1,0
Камеры не обогреваемые (прямоугольные)	1,0
То же, обогреваемые	0,9
Круглые днища и заглушки:	
рис. 19-24, *а*	0,85
рис. 19-24, *б*	0,75
Глухие днища	0,75÷1,05

Таблица 19.5

Значения $[\sigma]_{po}$ для различных сталей, *кГ/мм²*

Расчетная температура стенки T, °С	Марка сталей					
	Ст. 2	Ст. 3	20, 20К	22К	09Г2С	Х18Н10Т
20	13	14	14,7	17	17	14,6
250	10,9	12	13,2	15	14,5	12,5
300	9,8	10,8	11,9	14	13,4	12
340	—	—	10,9	13	12,5	11,6
380	—	—	9,7	—	11,5	11,2
420	—	—	8,6	—	—	11
460	—	—	5,6	—	—	10,6
500	—	—	3,4	—	—	10,4
550	—	—	—	—	—	10,1
600	—	—	—	—	—	7,4
650	—	—	—	—	—	4,8
700	—	—	—	—	—	3,0

стенки круглой камеры

$$s_{тр} = \frac{pd_{н}}{230\varphi[\sigma]_{р} + p} + \Delta s \ [мм], \qquad (19.28)$$

стенки трубы

$$s_{тр} = \frac{pd_{вн}}{230\,\varphi[\sigma]_{р} - p} + \Delta s \ [мм], \qquad (19.29)$$

где $d_{вн}$ — внутренний диаметр барабана и трубы;
$d_{н}$ — наружный диаметр камеры;
p — давление, $кГ/см^2$;
φ — коэффициент прочности сварного шва φ, определяемый по табл. 19.6.

В формулах (19.28) и (19.29)

$\Delta s = 1$ *мм* при $s < 20$ и $\Delta s = 0$ при $s > 20$;
$[\sigma]_{р}$ измеряется в $кГ/мм^2$.

Таблица 19.6

Коэффициенты прочности швов

Способы сварки	φ
Швы встык, сваренные любым допустимым способом с полным проваром, по мере необходимости с термической обработкой и контролем физическим методом по всей длине	1,0
Швы встык, сваренные любым допустимым способом при односторонней и двухсторонней укладке швов с надлежащим проваром . .	0,85
При прочих способах сварки . .	0,70

При наличии отверстий (рис. 19-22) коэффициент прочности в продольном направлении

$$\varphi_{прод} = \frac{t - d}{t}, \qquad (19.30)$$

где t — расстояние между центрами отверстий в продольном направлении;

d — диаметр отверстия;

в поперечном направлении

$$\varphi_{поп} = \frac{t_1 - d}{t_1}, \tag{19.31}$$

где t_1 — расстояние между центрами отверстий в поперечном направлении.

Если расстояние между опорами барабана значительно, следует проверить его прочность на изгиб

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{изг}}{W\varphi}, \tag{19.32}$$

где $M_{изг}$ — изгибающий момент, определяемый от нагрузки на барабан, как в двухопорной балке;

W — момент сопротивления кольцевого сечения барабана;

φ — коэффициент прочности (табл. 19.6).

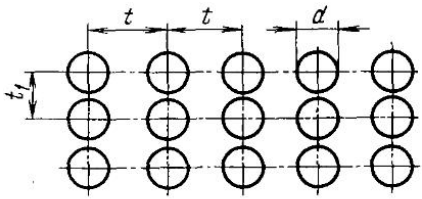


Рис. 19-22. К определению коэффициента ослабления поперечного сечения барабана

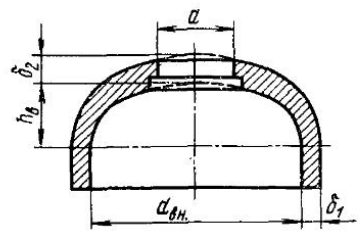


Рис. 19-23. Эллиптическое днище барабана

Толщина штампованного эллиптического днища барабана вычисляется по формуле

$$s_{тр} = \frac{p d_{вн}}{400\, z\, [\sigma]_р - p} \cdot \frac{d_{вн}}{2h_в} + \Delta s \ [мм], \tag{19.33}$$

где p — давление, $кГ/см^2$;

$d_{вн}$ — внутренний диаметр, $мм$ (рис. 19-23);

z — коэффициент;

d — диаметр лаза;

$h_в$ — высота выпуклой части днища.

Коэффициент z, учитывающий ослабление днища неукрепленным отверстием, принимается равным

$$z = 1 \text{ при } \frac{d}{\sqrt{d_{вн}(s-c)}} \leqslant 0{,}4; \tag{19.34}$$

$$z = \frac{2}{1{,}25\dfrac{d}{\sqrt{d_{вн}(s-c)}} + 1{,}5} \text{ при } 0{,}4 \leqslant \frac{d}{\sqrt{d_{вн}(s-c)}} \leqslant 2; \tag{19.35}$$

$$z = \frac{2}{\dfrac{d}{\sqrt{d_{вн}(s-c)}} + 2} \text{ при } \frac{d}{\sqrt{d_{вн}(s-c)}} \geqslant 2; \tag{19.35'}$$

c может быть принято равным 1 *мм*.

Часто днища в котлах делают сферическими. Соединение днищ с корпусом должно быть плавным (см. рис. 19-7, *г*). Радиусы переходных кривых r должны быть $\geqslant 5s$. Переходные кривые соединяются с основными кривыми, определяемыми радиусами сфер R_0. Минимальное расстояние a от кольцевого шва до начала переходной кривой зависит от толщины листов днища. При толщине s_0 отбортованного элемента до 10 *мм* $a=25$ *мм*; при $s_0=10 \div 20$ *мм* $a=40$ *мм*; при $s_0=20$ *мм* $a=50$ *мм*.

Соединения патрубков с корпусами бывают разнообразны по форме (см. рис. 19-12, *а—в*). Во время эксплуатации котла при высоких рабочих напряжениях, значительной величине отверстий для патрубков производят усиление корпуса кольцом, как показано на рис. 19-12, *а*.

Наиболее прочны соединения патрубков, изображенные на рис. 19-12, *г*. В этих соединениях отсутствуют угловые швы, поэтому концентрация напряжений в них имеет наименьшие возможные величины.

Сварка котлов со значительной толщиной стенок (свыше 60—80 *мм*) вызывает в них образование трехосных остаточных напряжений. Эксперименты, проведенные в последние годы, показали, что остаточные трехосные напряжения в котлах лишь в редких случаях могут угрожать их прочности.

Для хорошей работы конструкций большое значение имеют пластические свойства. В целях их повышения, а также улучшения структуры металла многие сварные конструкции котлов подлежат термической обработке. Для устранения остаточных напряжений достаточно термически обработать малоуглеродистую сталь при $T=600 \div 650°$ С. Особенно полезной является термическая обработка котельных конструкций из низколегированных сталей.

Котлы, пароперегреватели, экономайзеры подлежат освидетельствованию и контролю качества сварных соединений физическими методами: рентгеновскими или гамма-лучами радиоактивных элементов. Просвечивание швов часто заменяется их прозвучиванием ультразвуковыми колебаниями.

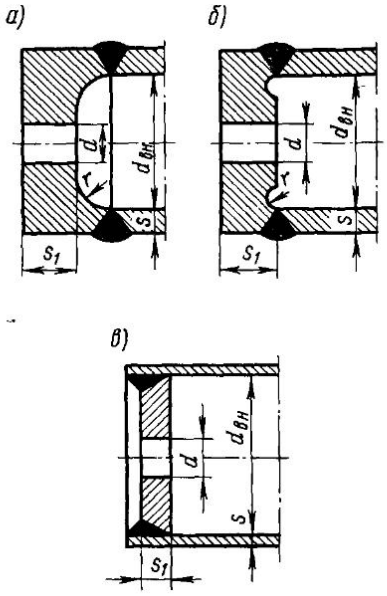


Рис. 19-24. Соединения плоских донышек в камерах

При изготовлении прямоточных котлов сваривают металлические каркасы. Трубчатые элементы котлов хорошо свариваются контактной стыковой сваркой. В заводских условиях стыки труб сваривают стационарными контактными машинами, при монтаже — переносными.

В цилиндрических камерах котлов донышки делают плоскими. Способы соединения донышек камер с цилиндрическими частями показаны на рис. 19-24, *а—в*. Для этих конструкций толщины плоских донышек определяются по формуле

$$s_1 = \frac{\kappa d_{вн}}{\kappa_0}\sqrt{\frac{p}{100\ [\sigma]_{ро}}}, \qquad (19.36)$$

где s_1 — толщина плоского днища;
$d_{вн}$ — внутренний диаметр донышка;
$[\sigma]_{ро}$ — допускаемое напряжение, *кГ/мм²*;
p — давление, *кГ/см²*;

$$\kappa = 0{,}4\left(1 - 0{,}23\frac{s}{s_1}\right) \text{ д. б.} \geqslant 0{,}31, \qquad (19.37)$$

где s — толщина стенки барабана.

Для днищ без отверстия $\kappa_0 = 1$; для днищ с отверстием

$$\kappa_0 = 1 - 0{,}43\frac{d}{d_{вн}} \text{ при } \frac{d}{d_{вн}} \leqslant 0{,}35; \qquad (19.38)$$

$$\kappa_0 = 0{,}85 \text{ при } 0{,}35 < \frac{d}{d_{вн}} \leqslant 0{,}75. \qquad (19.39)$$

Каркасы котлов большой производительности представляют собой сварные металлические конструкции, состоящие в основном из балок, поддерживающих обмуровку, площадки и колонны. Каркасы изготавливают из углеродистой стали. Для уменьшения веса применяют низколегированную сталь. Элементы, не испытывающие значительных нагрузок (обвязка, настил, площадки), изготавливают нередко из немаркированной стали.

В большинстве случаев применяют прокатные или сварные элементы двутаврового или коробчатого профиля с непрерывными поясными швами.

Расчет прочности каркаса котла производится с учетом полной нагрузки, состоящей из собственного веса каркаса, собственного веса барабана, весов поверхностей нагрева, обмуровки, обшивки, камер, трубопроводов, арматуры, гарнитуры, газо- и воздухопроводов, пылепроводов, площадок с эксплуатационным нагружением и др. При расчете каркасов котлов открытых установок учитываются также ветровые и снеговые нагрузки в зависимости от района.

Нагрузка передается непосредственно на балки, а с балок — на колонны. Расчет балок производится на изгиб.

Колонны каркаса передают на грунт большие нагрузки в несколько сот и тысяч тонн. Колонны состоят из элементов двутаврового профиля, но применяются и трубчатые конструкции. Колонны проверяют на прочность и на устойчивость. Общий вид каркаса котла приведен на рис. 19-25. Колонны опираются на специальные башмаки.

ТОНКОСТЕННЫЕ СОСУДЫ

По назначению, толщине листовых элементов, применяемым материалам и приемам сварки сосуды, работающие под давлением, весьма разнообразны. Общим для такого типа конструкций является требование обеспечить возможно более равномерное распределение напряжений. Этого достигают применением соединений встык, плавным сопряжением стыкуемых элементов и обеспечением надежного проплавления всей их толщины при условии всемерного исключения дефектов сварки.

Тонкостенные сосуды обычно являются конструктивными элементами различных транспортных установок, в том числе современных летательных аппаратов. Быстрый рост размеров ракет для космических полетов вызывает соответственное увеличение размеров емкостей. Это можно видеть на примере семейства ракет «Сатурн» с двигателями жидкого топлива (рис. 19-26).

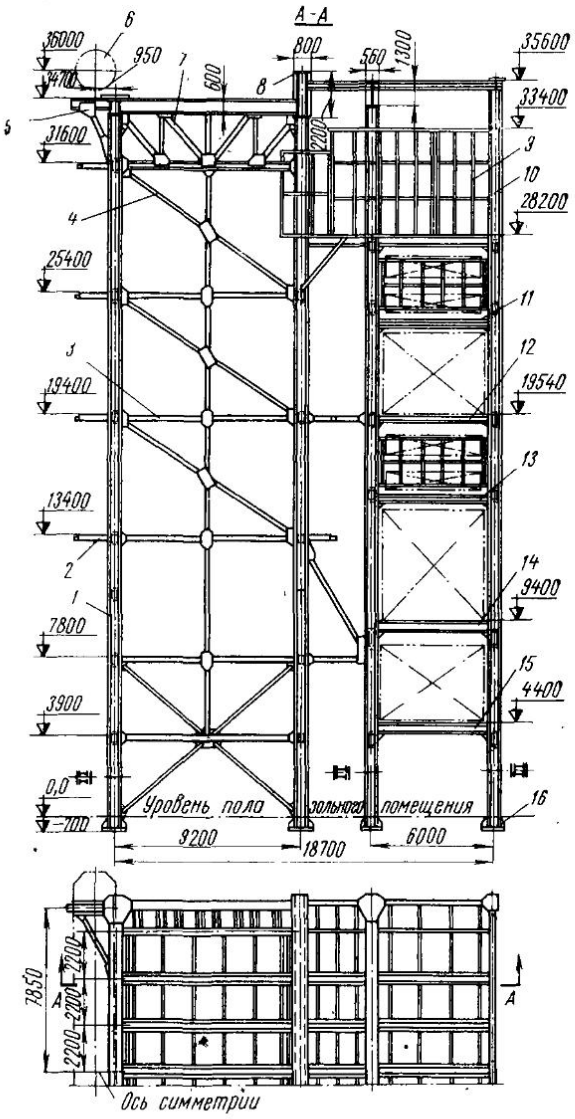


Рис. 19-25. Сварной каркас котла

Так, цилиндрические баки со сферическими днищами, входящие в состав стартовой ступени *S*—1С ракеты «Сатурн-5», имеют диаметр 10 *м*. Один из них предназначен для жидкого кислорода, другой — для керосина. При работе двигателей эти емкости испытывают внутреннее давление, так как топливо и окислитель вытесняются принудительно путем подачи в кислородный бак газообразного кислорода, а в топливный бак — гелия. Кроме того, такие емкости нередко входят в состав несущей части конструкции и во время полета могут испытывать дополнительно к внутреннему давлению также сжимающие и изгибающие нагрузки. Очевидно, что технология изготовления таких баков должна быть безупречной, так как любой дефект может привести к гибели всего космического корабля.

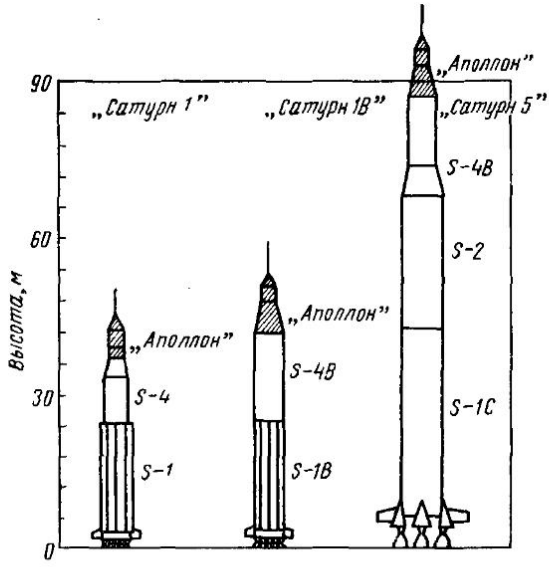


Рис. 19-26. Семейство ракет «Сатурн»

Для транспортных установок одним из основных показателей совершенства конструкции является ее минимальный вес. Поэтому при изготовлении тонкостенных сосудов широкое применение получили листовые материалы, обладающие высокой удельной прочностью,— алюминиевые и магниевые сплавы, стали высокой прочности и сплавы титана. Так, например, при изготовлении ракетных емкостей в зависимости от типа двигателей применяют либо алюминиевые сплавы, если двигатели работают на жидком топливе, либо высокопрочные стали или титановые сплавы в случае использования двигателей на твердом топливе.

Известно, что с повышением прочности металла его чувствительность к наличию концентратора, как правило, возрастает. Как было показано в главе XII, дополнительное возрастание чувствительности к концентрации напряжений может происходить из-за наличия двухосного поля напряжений, возникающего при нагружении тонкостенного сосуда внутренним давлением. В этих условиях использование высокопрочных материалов при

низком запасе прочности предъявляет к конструкции и к технологии ее изготовления особенно высокие требования, причем наибольшие трудности связаны с необходимостью широкого использования сварки.

Наличие сварных соединений вызывает, во-первых, концентрацию напряжений от дефектов формы или несовершенства выполнения сборочно-сварной операции, во-вторых, неоднородность механических свойств в зоне сварного соединения.

Концентрация напряжений, определяемая конструктивными формами сопряжений и узлов сосуда, может быть сведена к минимуму в результате умелого проектирования. Труднее предотвратить или устранить концентрацию напряжений, вызываемую технологическими дефектами и отклонениями от принятых проектом форм. Технологические дефекты могут быть как в основном металле изделия в виде царапин и других поверхностных повреждений, так и в сварных соединениях в виде отдельных несплошностей (поры, микротрещины, непровары), нарушений формирования шва и смещения кромок. В сосудах из высокопрочных материалов такого рода дефекты крайне опасны. Однако в процессе изготовления полностью исключить их появление не удается. Поэтому большое внимание приходится уделять мероприятиям по их предотвращению, обнаружению и исправлению.

Нарушения проектной формы сосуда являются результатом суммирования погрешностей заготовительных, сборочных и сварочных операций. Как показывает опыт, получение требуемой точности размеров и формы отдельных заготовок особых затруднений не вызывает. Погрешности сборки элементов под сварку также можно жестко ограничить путем использования хорошо продуманных и тщательно выполненных приспособлений. Нарушения формы, вносимые процессом сварки, являются основными. Под действием остаточных сварочных напряжений тонколистовые элементы теряют устойчивость, и деформация коробления может достигать недопустимо большой величины. Поэтому мероприятия по ограничению и исправлению сварочных деформаций обычно составляют существенную часть технологического процесса изготовления сварных тонколистовых конструкций.

Нередки случаи, когда устранение коробления производят ручной правкой ударами, которая может сопровождаться изменением механических свойств металла в отдельных зонах с резким возрастанием их чувствительности к концентрации напряжений. Опасность такой операции особенно велика, если изделие не проходит последующей термообработки. Поэтому особого внимания заслуживает метод исправления сварочных деформаций путем прокатки зоны шва роликами, позволяющий механизировать процесс и строго регламентировать его влияние на изменение механических свойств сварного соединения.

Помимо концентрации напряжений, прочность сосуда зависит от механических свойств металла в зоне сварного соединения. Чтобы предотвратить понижение конструктивной прочности, стремятся либо разгрузить зону сварного соединения, либо устранить неоднородность механических свойств, приблизив их к свойствам основного металла.

Разгрузка всего соединения может достигаться за счет конструктивного оформления изделия, например, путем увеличения толщины металла в местах сварных соединений (рис. 19-27). Такой прием при правильном его использовании может быть полезен. Широкое применение он получил при изготовлении сосудов из алюминиевых сплавов, используемых в нагартованном или термообработанном состоянии. Прочность сварного соединения становится ниже прочности основного металла, прошедшего упрочняющую операцию. Для увеличения толщины металла в зоне соединения листовые заготовки или элементы конструкции подвергают размерному химическому травлению (химическому фрезерованию), удаляя металл по всему полю листа, кроме кромки, подлежащей или подвергнутой сварке. Естественно, такой прием существенно усложняет технологию и увеличивает стоимость сосуда, но зато позволяет создавать конструкции минимального веса с надежно работающими сварными соединениями.



Рис. 19-27. Поперечное сечение сварного соединения

Приближение свойств сварных соединений к свойствам основного металла достигается выбором метода сварки и последующей обработки. Для соединения тонколистовых элементов встык используют преимущественно сварку в среде защитных газов. В зависимости от материала приемы сварки могут быть различны: в один или несколько проходов, плавящимся или неплавящимся электродом, с присадочным или без присадочного металла и т. п. Например, при сварке высокопрочных сталей целесообразно с помощью специального устройства создавать колебания электрода поперек шва. При этом достигается благоприятное изменение характера кристаллизации металла шва и уменьшение перегрева в околошовной зоне, а также улучшение формы сварного соединения с плавным переходом от основного металла к наплавленному.

Для стыковых соединений тонкого металла существенное улучшение качества может быть достигнуто при пластическом деформировании зоны шва. Наиболее просто такая операция выполняется путем прокатки шва между двумя роликами или между роликом и жесткой подкладкой. Пластические деформации при этом развиваются своеобразно: металл шва испытывает осадку по толщине и сдвигается в плоскости листа (рис. 19-28),

причем сдвиг происходит не только в шве, но и в околошовной зоне по обе стороны от шва, вызывая упрочнение всей зоны деформации.

При сварке листов, нагартованных холодной прокаткой, использование приема прокатки шва роликами позволяет приближать прочность сварного соединения к прочности основного металла, однако пластические свойства в зоне деформации снижаются. Поэтому применительно к сварным соединениям сосудов, нагруженных внутренним давлением, использование такого метода упрочнения целесообразно только при наличии высокого запаса пластических свойств и низкой чувствительности металла к концентрации напряжений. Если же после прокатки роликами сварное соединение проходит термообработку, то предшествующая деформация может способствовать общему улучшению формы, механических свойств и структуры сварного соединения. Улучшение формы соединения выражается в сглаживании неровностей поверхности шва, осадке (заглаживании) усиления и проплава, устранении депланации листов в стыковом соединении, т. е. в устранении основных концентраторов стыкового сварного соединения. Особенно целесообразна прокатка шва в случае, когда возникает необходимость снятия усиления или проплава шва. Обычно в условиях производства эту операцию выполняют с помощью наждачного круга, хотя гораздо проще ее можно осуществить прокаткой роликами.

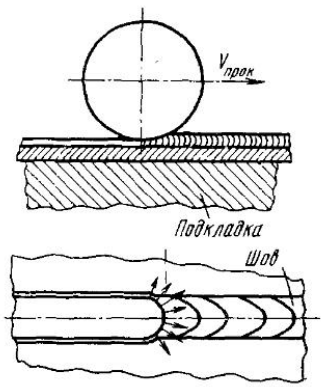


Рис. 19-28. Схема прокатки усиления шва между роликами

Применительно к сварным соединениям высокопрочных материалов недостаточная пластичность шва и околошовной зоны часто не позволяет производить прокатку непосредственно после сварки. Для устранения опасности появления трещин и уменьшения необходимого усилия на ролик используют смягчающую термообработку.

Сосуды, предназначенные для работы при очень высоком давлении, выполняют *многослойными,* так как при сплошной стенке напряжения на внутренней ее поверхности оказываются значительно большими, чем на внешней, и прочность материала стенок использовать полностью не удается. Формируя стенку из отдельных слоев, можно путем предварительного натяжения каждого слоя создать такое распределение напряжений, которое при рабочем нагружении сосуда внутренним давлением обеспе-

чит относительно равномерную работу всех слоев. За рубежом многослойные сосуды изготавливают для работы под давлением до 2000 *кГ/см*^{2} и выше.

Конструктивное оформление таких сосудов и способы создания начальных напряжений при изготовлении многослойных обечаек могут быть различными.

Так, один из способов предусматривает изготовление отдельных обечаек толщиной 6—10 *мм* с продольным швом. Обечайки последовательно вставляют одну в другую и «раздают» так, чтобы напряжение во внутренней трубе превысило предел текучести, а во внешней не превышало его. Такая раздача производится гидравлическим давлением в приспособлении, предусматривающем уплотнение торцов обечаек. Полученная многослойная обечайка подвергается дополнительному перенапряжению в этом же приспособлении.

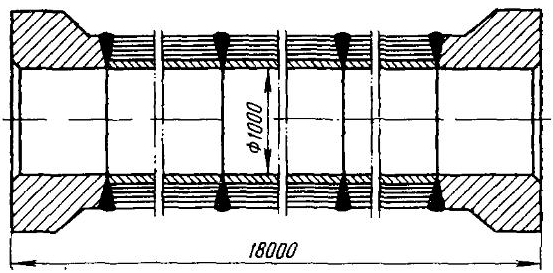


Рис. 19-29. Конструктивное оформление многослойного сосуда

При другом способе изготовления к центральной обечайке толщиной 25—30 *мм* приваривают край стальной ленты, шов зачищают и ленту с натяжением навивают на обечайку в несколько слоев. После окончания навивки свободный конец ленты приваривают к корпусу продольным швом.

Третий способ также предусматривает наличие центральной обечайки толщиной 20 *мм,* вокруг которой механическим путем обтягивают необходимое число слоев. Каждый слой представляет собой обечайку толщиной 8 *мм,* концы которой после обтяжки свариваются встык продольным швом. Для равномерного распределения напряжений от сварки стыки располагают в шахматном порядке, усиление шва предыдущего слоя зачищается заподлицо с основным металлом.

Изготовленные одним из этих трех способов многослойные обечайки сваривают между собой встык кольцевыми швами, к обоим концам цилиндрической части сосуда приваривают днища или кованые фланцы для крепления крышек (рис. 19-29).

Цилиндрическую часть многослойного сосуда можно также получить, насаживая толстостенные обечайки и концевые фланцы с натягом на общую относительно тонкостенную трубу и сваривая их между собой кольцевыми швами. Для сохранения полезных предварительных напряжений, созданных натягом или механической обтяжкой слоев и усадкой от продольных и кольцевых швов, многослойные сосуды после сварки термообработке не подвергаются.

§ 11. ТРУБЫ И ТРУБОПРОВОДЫ

По назначению трубопроводы разделяются на магистральные и местного значения, к которым относятся заводские, обслуживающие металлургический и другие комплексы, и гидротехнические конструкции, а также трубопроводы атомных и тепловых электростанций и т. п. Очень большое распространение трубопроводы имеют при транспортировании жидких топливных продуктов, а также природных газов. Кроме того, трубопроводы широко применяются в санитарно-техническом строительстве и в ряде специальных областей техники.

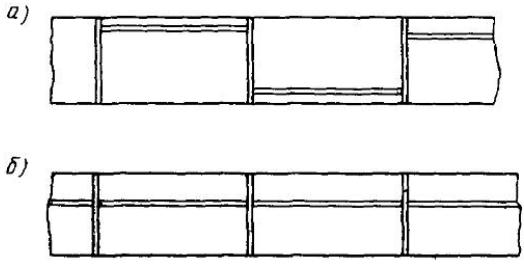


Рис. 19-30. Сварные трубопроводы:
а) продольные швы вразбежку, *б)* продольные швы в одном сечении

Несмотря на то, что по назначению трубопроводы существенно различаются между собой, их конструктивная форма нередко остается без изменений.

Трубопроводы больших диаметров, например более 1,5 *м*, как правило, имеют гладкие поверхности, иногда усиленные ребрами жесткости. Часть трубопроводов работает при низких давлениях (безнапорные), но в ряде случаев трубопроводы работают и при средних и высоких давлениях.

Трубы, составляющие трубопроводы, изготавливаются на заводах сварными. Лишь при малых диаметрах их выполняют цельнотянутыми, прокатными и т. п. В большинстве случаев продольные сварные швы труб прямолинейны, некоторые трубы сваривают спиральными швами, обладающими повышенной прочностью.

Между собой трубы сваривают поперечными кольцевыми швами. Трубы небольших диаметров сваривают из одного листа

одним продольным швом. При больших диаметрах труба составляется из двух и более листов, соединенных продольными швами. Продольные швы труб располагаются или вразбежку относительно друг друга (рис. 19-30, *а*), или в одну нитку (рис. 19-30, *б*).

Трубопроводы, работающие в условиях температур от $-40°$ С до $+350°$ С при $p \leqslant 90$ *кГ/см*^{2}, изготавливают из стали Ст. 3 спокойной и низколегированных сталей 10Г2СД, 14ХГС, 19Г (ГОСТ 5058 — 57); трубопроводы, работающие при $T = -50°$ С до $+350°$ С при p до 700 *кГ/см*^{2} — из стали 20 и 30ХМА (ГОСТ 4543 — 57); работающие при высоких T (до 400—600° С) — из молибденовых сталей, например 15ХМ и др. При наличии актив-

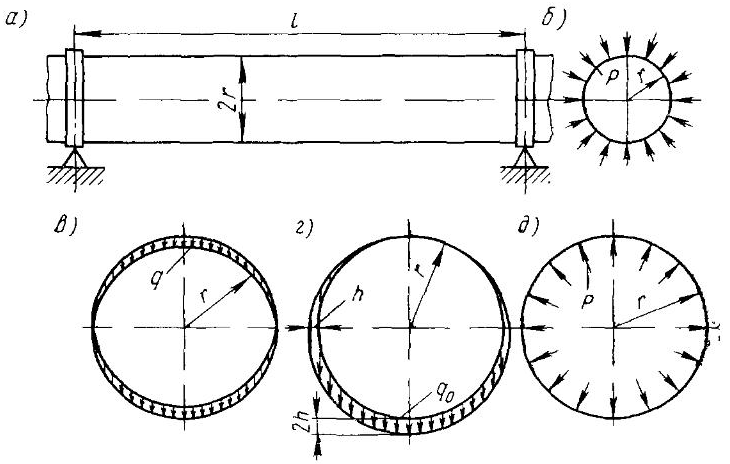


Рис. 19-31. Схема загружений трубопровода:

а) общий вид; *б*) от вакуума; *в*) от собственного веса; *г*) от обледенения, *д*) от внутреннего давления

ных сред трубы изготавливают из аустенитных нержавеющих сталей, алюминиевых, титановых и других сплавов.

Трубопроводы больших диаметров поддерживаются опорами: *анкерными*, устанавливаемыми в конечных точках и в местах изменения направления оси, *промежуточными*, непрепятствующими продольным перемещениям. Конструкции опор зависят от их диаметров. При относительно малых диаметрах $d \leqslant 0{,}6$ *м* допускается применение опор простейшего типа — *скользящих*, при средних диаметрах $d = 0{,}6 \div 1{,}5$ *м* — *седловых*, при больших $d = 1{,}5$ *м* — *катковых*, или *качающихся*.

Если трубопровод большого диаметра ($d > 1{,}5$ *м*) (рис. 19-31, *а*) выполняет функции газопровода низкого давления

металлургических предприятий, на него действуют следующие виды нагрузок: собственный вес трубопровода (рис. 19-31, *в*), обледенение (рис. 19-31, *г*), внутреннее давление газа (рис. 19-31, *д*), возможный вакуум (рис. 19-31, *б*), а также температурное воздействие, ветер и др.

Собственный вес трубопровода представляет собой равномерно распределенную нагрузку q. Приближенно трубопровод можно принять за многоопорную неразрезную балку. При этом изгибающий момент на опоре составит

$$M_q = \frac{ql^2}{8}. \tag{19.40}$$

Напряжение от момента равно

$$\sigma_q = \frac{M_q}{W}, \tag{19.41}$$

где W — момент сопротивления кольца, равный

$$\frac{\pi (r_1^4 - r_2^4)}{4r_1}, \tag{19.42}$$

где r_1 — наружный радиус кольца;

r_2 — его внутренний радиус.

Аналогично определяют усилия и напряжения при обледенении. Если принять толщину обледенения в нижней точке $2h$, а на уровне горизонтального диаметра h, то вес обледенения на единицу длины определится по приближенной формуле

$$q_0 = 7rh\gamma \ \ [T/м], \tag{19.43}$$

где γ — вес единицы объема льда, $T/м$.

Примем $h = 0{,}1$ *м*. Тогда получим

$$q_0 = 0{,}7\, r\gamma \ \ T/м; \tag{19.44}$$

момент от обледенения

$$M_{q_0} = \frac{q_0 l^2}{8};$$

напряжение от M_{q_0} будет равно

$$\sigma_{q_0} = \frac{M_{q_0}}{W}. \tag{19.45}$$

Суммарное напряжение от двух моментов

$$\sigma_{\text{сумм}} = \sigma_q + \sigma_{q_0}. \tag{19.46}$$

Если замыкание трубопровода производилось при T_1, то при понижении температуры до T_2 в нем возникнет растягивающее усилие

$$N_т = 2\pi rs\,(T_1 - T_2)\,E\alpha, \tag{19.47}$$

где α — коэффициент температурного расширения; для стали $\alpha = 0{,}12 \cdot 10^{-6}$.

Наряду с продольной силой в трубопроводе при неравномерном охлаждении возникает изгибающий момент

$$M_т = \frac{\alpha EJ\,(T_н - T_в)}{s}, \tag{19.48}$$

где $J = \frac{2\pi rs^3}{12}$;

s — толщина стенки трубы;

$T_н$ — температура наружной поверхности трубы;

$T_в$ — температура внутренней поверхности.

Усилие от внутреннего давления, встречая реакцию в зоне изменения направления трубопровода, вызывает в его поперечном сечении напряжение, равное

$$\sigma_{поп} = \frac{pr}{2s}, \tag{19.49}$$

где p — давление газа в трубопроводе.

Таким образом, полное напряжение в поперечном сечении, а также в кольцевом шве трубопровода равно

$$\sigma_{расч} = \sigma_q + \sigma_{q_0} + E\alpha\,(T_1 - T_2) + \alpha E\,(T_н - T_в)\,\frac{r}{s} + \frac{pr}{2s} \leqslant [\sigma']_р. \tag{19.50}$$

В продольном сечении трубопровода образуются напряжения, определяемые формулой

$$\sigma_{прод} = \frac{pr}{s} \leqslant [\sigma']_р. \tag{19.51}$$

В одних случаях наибольшим по величине оказывается напряжение $\sigma_{расч}$, в других — $\sigma_{прод}$.

Допускаемое напряжение в трубопроводах находится в зависимости от расчетного сопротивления R, принимаемого обычно равным $0{,}9\sigma_т$, коэффициента условия работы m и коэффициента перегрузки n; $m = 0{,}8 \div 0{,}9$, а при переходе через препятствия $m = 0{,}75$; $n = 1{,}20$ для газопроводов и $n = 1{,}15$ — для нефтепроводов. При применении точных методов определения напряжений в оболочках с учетом краевого эффекта и концентраторов напряжений коэффициент m может быть принят равным 1,0.

Если возможно образование вакуума (рис. 19-31, *б*), внешнее давление воздуха вызывает в продольных сечениях оболочки трубопровода напряжения сжатия, которые могут достигнуть критической величины и вызвать потерю устойчивости. Если принять трубопровод за длинную цилиндрическую трубу без закреплений, то критическое давление $p_{кр}$ определится по формуле

$$p_{кр} = \frac{3EJ_1}{r^3}, \qquad (19.52)$$

где J_1 — момент инерции относительно собственной оси продольного сечения стенки трубопровода на единицу его длины;

r — средний радиус оболочки.

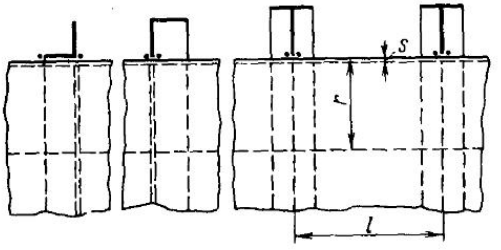


Рис. 19-32. Кольца жесткости, приваренные к трубопроводу, уголкового и таврового профилей

Для повышения устойчивости оболочки предусматривается постановка кольцевых ребер жесткости. Типы колец ребер жесткости уголкового и таврового профилей изображены на рис. 19-32.

Критическое давление $p_{кр}$ в этом случае находится из соотношения

$$p_{кр} = \frac{3EJ}{lr^3}, \qquad (19.53)$$

где l — расстояние между смежными ребрами жесткости;

J — момент инерции кольца с учетом оболочки на длине $l = 1{,}6\sqrt{rs}$.

Критическое давление, вычисленное по формулам (19.52) и (19.53), сравнивается с $m(p_{внешн} - p_{вакуума})$. В этом случае m может быть принята равной 1,7.

Чтобы уменьшить продольные усилия, возникающие в трубопроводе вследствие изменения температуры, применяют различные способы. В некоторых случаях трубопроводы укладывают на катковые опоры (рис. 19-33, *а*). В месте опирания трубопровод опоясывается ребрами — двумя кольцевыми элементами жесткости таврового профиля, приваренными к оболочке. Между собой указанные кольца соединены диафрагмами. Оболочка с кольцом жесткости опирается на каток.

Для повышения податливости в продольном направлении трубопроводы опираются на качающиеся стойки. Используются также компенсаторы. На рис. 19-33, *б* показан П-образный компенсатор, состоящий из двух кольцевых ребер жесткости и кольцевой полосы. Продольные деформации сопровождаются изгибом ребер в направлении их наименьшей жесткости. При этом продольные перемещения от температуры не вызывают реактивных сил значительной величины.

Трубопроводы, применяемые в гидротехнике под высоким давлением (напорные трубопроводы), служат для перемещения жидких сред. Они проектируются в основном согласно изложенным принципам.

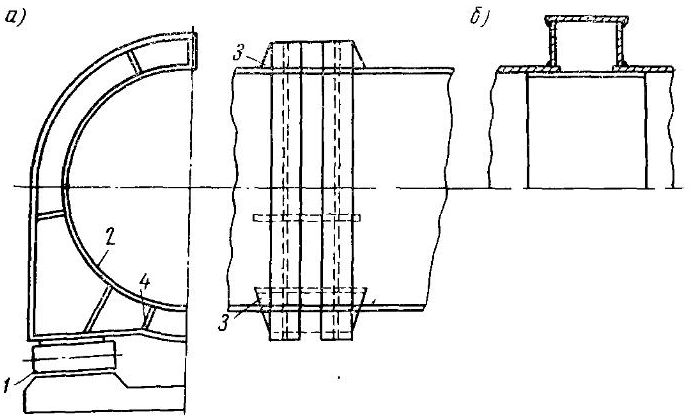


Рис. 19-33. Трубопровод, опирающийся на катковую опору:
1 — каток; *2* — стенка трубопровода; *3* — ребра жесткости; *4* — соединения встык

Для наземных напорных трубопроводов основными видами нагрузок являются: внутреннее давление жидкости, равное гидростатическому, с учетом динамического коэффициента при гидравлическом ударе; собственный вес трубопровода с водой; осевые усилия, вызванные давлением жидкости на поворотах и при изменении диаметра, и температурные воздействия.

Определение расчетных напряжений в продольном и поперечном сечениях трубопровода (продольных и кольцевых швах) производится по формулам (19.50) и (19.51).

Подземные трубопроводы, помимо внутреннего давления и температурного воздействия, испытывают нагрузку от насыпного грунта. Нагрузка на единицу длины трубопровода составляет

$$Q = 2qr, \qquad (19.54)$$

где q — нагрузка на 1 $м^2$.

Под нагрузкой Q трубопровод приобретает эллиптическое очертание (рис. 19-34). В стенке трубы под действием Q возникает изгибающий момент

$$M_Q = \frac{Qr}{8} \cos 2\theta. \qquad (19.55)$$

С другой стороны, внутреннее давление в трубе эллиптического очертания вызывает момент M_p.

Суммарный момент при $\Theta = 0$ равен

$$M = M_p + M_Q = \frac{Qr}{8}\left[1 + \frac{1}{1 + \frac{4p}{E}\left(\frac{r}{s}\right)^3}\right], \qquad (19.56)$$

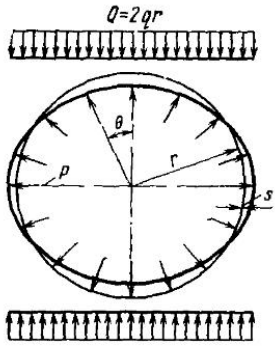


Рис. 19-34. Схема деформирования профиля трубы от веса грунта

где p — внутреннее давление в трубе.

В результате отпора грунта M уменьшает свою величину с учетом умножения на коэффициент η, равный

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\lambda V r}{E}\left(\frac{r}{s}\right)^3}, \qquad (19.57)$$

где λ — коэффициент, зависящий от направления отпора грунта (в среднем может быть принят за единицу);

$V = 0{,}2—6{,}0$ $кГ/см^3$ — коэффициент, зависящий от свойств грунта и диаметра трубы. С увеличением плотности грунта V возрастает.

Расчетный изгибающий момент $M_{изг} = \eta M$. Определив $M_{изг}$ находим напряжение в продольном шве трубы.

Указанные конструкции трубопроводов выполняются с соблюдением требований, предъявляемых к свойствам основного металла, автоматизированным процессам сварки и к контролю качества соединений.

При проектировании второстепенных трубопроводов, работающих при относительно невысоких давлениях, целесообразно применение плоско сворачиваемых труб.

Плоско сворачиваемые трубы очень экономичны по весу и обладают достаточно хорошими свойствами в эксплуатации. Их расчет прочности производится так же, как было описано выше.

Как правило, трубопроводы рассчитываются в основном на статическую нагрузку. В особых случаях учитывается пульсация среды, а также импульсный характер ветровых нагрузок.

ГЛАВА XX

ЛИСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ (ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ)

Конструкции, собираемые и свариваемые из листов, весьма разнообразны. Поэтому технологию их изготовления целесообразно рассматривать, исходя из характерных особенностей, являющихся общими для ряда конструкций. Так, для различного рода сооружений и емкостей большого размера общими являются их габариты, не позволяющие организовать изготовление целиком в условиях завода. Для сосудов, работающих под давлением, общими являются требования тщательной сборки, полного проплавления соединения и надежного контроля и т. п. В соответствии с этим технология изготовления излагается применительно к следующим группам листовых конструкций: 1) негабаритные емкости и сооружения; 2) сосуды, работающие под внутренним давлением; 3) трубы и трубопроводы; 4) корпуса транспортных конструкций.

§ 1. НЕГАБАРИТНЫЕ ЕМКОСТИ И СООРУЖЕНИЯ

Характерными представителями этих конструкций являются вертикальные цилиндрические резервуары, мокрые газгольдеры, сферические резервуары, листовые конструкции доменного комплекса, корпуса цементных печей и спиральные камеры гидротурбин. Конструктивное оформление части этих емкостей и сооружений было рассмотрено в § 1, 2, 4, 9 XIX главы и на рис. 19-1, 19-2, 19-10, *а*, 19-17, 19-18.

Мокрый газгольдер (рис. 20-1) для хранения взрывоопасных или ядовитых газов состоит из резервуара *1* и колокола *3* с телескопом *2* или без него. Перемещение колокола и телескопа происходит в направляющих *4*, по которым перекатываются ролики *5*; уплотнение в сочленениях достигается водяными затворами.

Цилиндрические резервуары имеют обычно емкость до 20 000 $м^3$, мокрые газгольдеры — до 30 000 $м^3$. За рубежом

конструкции такого типа иногда встречаются значительно бо́льших размеров.

Корпус цементной печи представляет собой цилиндрическую трубу диаметром 4,5—5 *м* и длиной 170—185 *м*. На корпус насаживаются бандажные кольца, которыми он опирается на роликовые опоры. Толщина стенок корпуса в месте расположения бандажей — 60 *мм*, между ними — 24 *мм*.

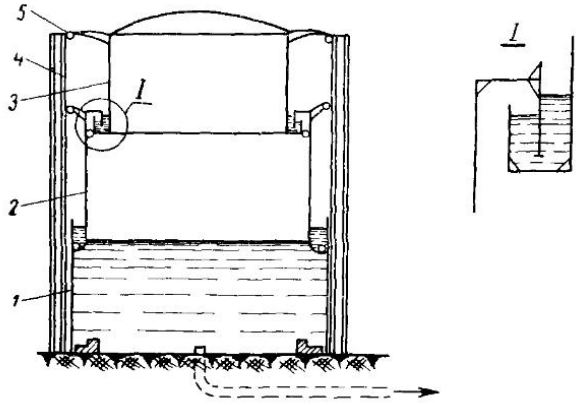


Рис. 20-1. Схема мокрого газгольдера

Размеры спиральных камер зависят от мощности гидротурбин и могут быть весьма большими. Это можно видеть на примере камеры Красноярской ГЭС, показанной на рис. 20-2.

Еще сравнительно недавно все негабаритные конструкции собирались и сваривались из отдельных листов непосредственно при монтаже. На заводе выполнялась только заготовка элементов и в некоторых случаях — их контрольная сборка. При такой организации труда выполнение нарастающего объема работ в жесткие сроки достигалось в основном увеличением численности рабочих высокой квалификации. Поэтому создание новых, более производительных методов изготовления листовых конструкций большого размера, позволяющих выполнять значительный объем сборочно-сварочных работ в условиях завода, стало насущной необходимостью.

В результате упорной работы исследовательских, производственных и монтажных организаций такие методы были созданы и получили широкое распространение. В зависимости от толщины листовых элементов и конструктивных форм изделия применяют один из следующих приемов или их совокупность.

Первый прием предусматривает расчленение всей конструкции на узлы больших размеров, изготовление этих узлов

в условиях завода, временное деформирование их для придания транспортных габаритов на время перевозки, доставку к месту монтажа, возвращение узлам требуемой формы и монтаж готовой конструкции с минимальным объемом сборочно-сварочных операций.

Второй прием также предусматривает изготовление элементов в условиях завода, но без применения временного деформирования. Поэтому раскрой этих элементов должен быть таким, чтобы, во-первых, размеры их не превышали габаритов железнодорожного подвижного состава, во-вторых, возможно больший объем работ выполнялся в условиях завода и, в-третьих, была обеспечена возможность выполнения большинства монтажных соединений с использованием механизированных методов сварки.

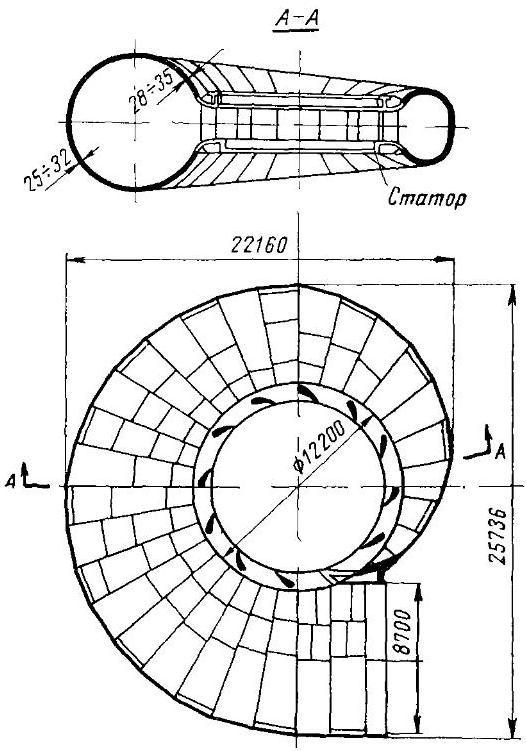


Рис. 20-2. Спиральная камера гидротурбины

К первому приему следует прежде всего отнести *метод рулонирования*, получивший широкое применение при изготовлении конструкций из листов толщиной до 16 *мм*. Укрупненные сварные заготовки узлов конструкции в виде полотнищ большого размера собираются, свариваются и сворачиваются в рулон на специальных установках. Схема такой установки показана на рис. 20-3, *а*. Необходимость сварки с двух сторон предопределяет наличие двух ярусов *1* и *2*, а также поворотного кружала *3* для передачи полотнища с одного яруса на другой с поворотом на 180°. Перемещение полотнища и его сворачивание обеспечивается рабочим кружалом *4*. На двух ярусах *1* и *2* располагаются четыре рабочих участка: сборки, сварки с одной стороны, сварки с другой стороны и контроля

и исправления дефектов. Сворачивание рулона производится ритмично после завершения работ на каждом из участков. В зависимости от расположения сборочного участка и направления сворачивания полотнища используют три схемы, показанные на рис. 20-3, *б, в, г*. Установки со сборкой листов на верхнем ярусе (рис. 20-3, *в, г*) имеют определенные преимущества. В этом случае листы на сборку удобно подавать краном и организация контроля просвечиванием на нижнем ярусе оказывается проще в смысле защиты от облучения. Кроме того, при передаче полотнища с верхнего яруса на нижний корни швов, расположенных поперек полотнища и сваренных только с одной стороны, испытывают напряжения сжатия, а не растяжения, как при передаче полотнища снизу вверх (рис. 20-3, *б*).

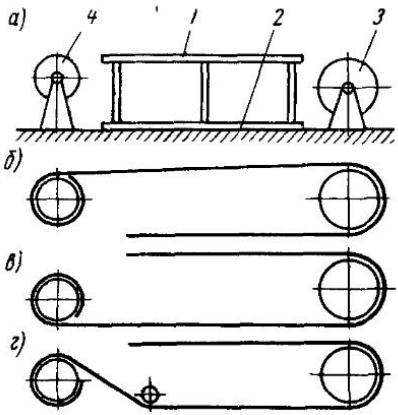


Рис. 20-3. Схемы двухъярусных стендов для изготовления полотнищ из листов и их сворачивания в рулоны

Размеры свариваемого и сворачиваемого в рулон полотнища определяются из условия рационального членения всей конструкции. Так, боковые стенки вертикальных цилиндрических резервуаров и мокрых газгольдеров могут выполняться из одного или двух и более полотнищ, в зависимости от размеров емкости, с тем, чтобы вес рулона не превышал 40 *Т*. Ширина такого полотнища соответствует высоте боковой стенки резервуара, т. е. 12 или 16 *м*. Исходя из этого размера, обычно и задают ширину двухъярусной установки для сборки, сварки и сворачивания полотнищ. Днища резервуаров и газгольдеров, диаметр которых превышает 12 *м*, приходится выполнять из нескольких полотнищ. Если вес каждого из этих полотнищ невелик, то они сворачиваются в один рулон.

Боковые стенки конструкций башенного типа, например воздухонагревателей, также выполняются из нескольких полотнищ, каждое из которых имеет длину, равную периметру боковой стенки. Ширина рулона в этом случае соответствует высоте монтажного блока и выбирается, исходя из грузоподъемности кранового оборудования на монтаже.

Расположение листов в полотнище, их толщина и типы соединений определяются как конструктивными, так и технологическими соображениями. На рис. 20-4, *а, б* показаны два варианта расположения листов в полотнище боковой стенки вертикально-

го цилиндрического резервуара объемом 5000 $м^3$. Листы нижних поясов толщиной 7 *мм* и более собираются и свариваются встык, более тонкие верхние пояса — внахлестку. Сочетание различных типов соединений определяется соображениями обеспечения рациональной технологии сборки, сварки и сворачивания полотнища. Так, соединение тонких листов сваркой под флюсом проще осуществлять внахлестку, причем сворачивание такой нахлестки затруднений не вызывает. При толщине листов 7 *мм* и более нахлестка приобретает заметную жесткость и для сворачивания неудобна. Напротив, стыковое соединение листов такой толщины

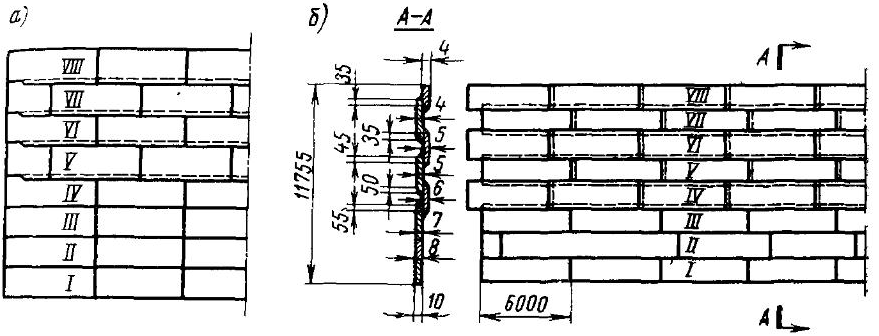


Рис 20-4. Схемы расположения листов корпуса резервуара емкостью 5000 $м^3$: *а)* с совмещенными стыками нижних поясов; *б)* с раздвинутыми стыками нижних поясов

оказывается приемлемым как с позиции сборки и сварки под флюсом, так и с позиции последующего сворачивания в рулон.

Из этих же соображений соединения листов полотнищ днища выполняются все внахлестку, а листов полотнищ конструкций башенного типа — встык.

Последовательность сборки, сварки и сворачивания полотнища рассмотрим на примере изготовления рулона боковой стенки резервуара объемом 5000 $м^3$. Подготовка листов начинается с правки на многовалковых правильных вальцах. Для сварки встык продольные кромки листов подвергаются обработке на кромкострогальном станке пакетом. Торцовые кромки как при сварке встык, так и при сварке внахлестку, обрезают на гильотинных ножницах. На сборочном участке двухъярусной установки одновременно собираются две картины (рис. 20-5). Листы раскладываются в определенной последовательности. Пояс *I* кромкой прижимается к упорным роликам стенда, *II* — вплотную к нему, затем *III*. Станочная обработка кромок листов этих поясов обеспечивает плотную сборку, закрепляемую прихватками. Листы, собираемые внахлестку, имеют риски, совмещаемые

с рисками продольных осей поясов на настиле стенда. Сборка второго и последующего полотнища производится непрерывной лентой, для чего между последней картиной предыдущего полотнища и первой картиной последующего устанавливаются соединительные планки *а* (рис. 20-5).

Сварка под флюсом осуществляется сварочными тракторами. Прием выполнения стыковых соединений листов полотнища определяется конструкцией настила первого сварочного участка двухъярусной установки. Опыт эксплуатации стендов с электромагнитным прижимом кромок показал их малую эффективность. Поэтому первый слой стыковых соединений обычно выполняют

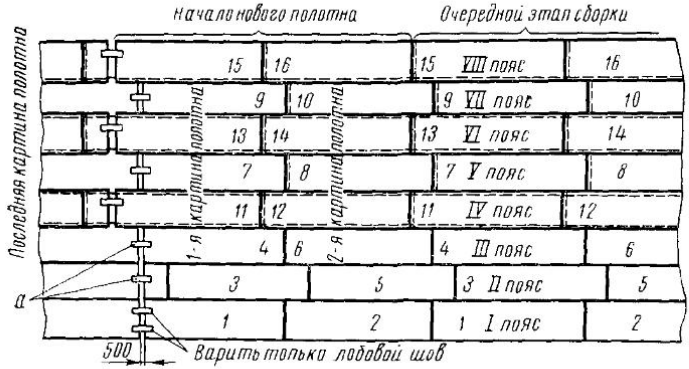


Рис. 20-5. Схема сборки первой и второй картин полотнища:
1, 2, 3... — последовательность сборки листов

либо на флюсо-медной подкладке без принудительного прижатия кромок, либо на весу. В последнем случае в местах расположения продольных и поперечных стыковых швов в настиле предусматривают желоба. Схема сварки показана на рис. 20-6. На первом сварочном участке производится сварка внутренних швов (*а* — поперечных; *б* — продольных), а на втором сварочном участке — внешних швов (*в* — поперечных, *г* — продольных). Цифры указывают последовательность сварки швов для каждого сварщика (на первом участке работают один автосварщик и один ручник, на втором участке — два автосварщика), стрелки показывают направление сварки. На первом участке поперечные и продольные стыковые швы свариваются на весу трактором № 1. Целесообразно использование расщепленного электрода, позволяющего производить сварку с местным зазором до 2—3 *мм*. Поперечные швы начинаются и заканчиваются на основном металле примыкающих листов. У крайних поясов конец этих швов выводится на выводные планки. Сварка поперечных нахлесточ-

ных швов производится трактором № 2, продольные нахлесточные прерывистые швы свариваются вручную. На втором сварочном участке наружные стыковые швы выполняются трактором № 3 и нахлесточные — трактором № 4. На последнем рабочем участке контроль качества производится внешним осмотром и испытанием на плотность вакуумаппаратом.

Сворачивание полотнища производится с помощью приводного устройства, состоящего из двух одинаковых цевочных рабочих кружал, посаженных на консольные валы. Полотнище наворачивается на кольца жесткости вспомогательного элемен-

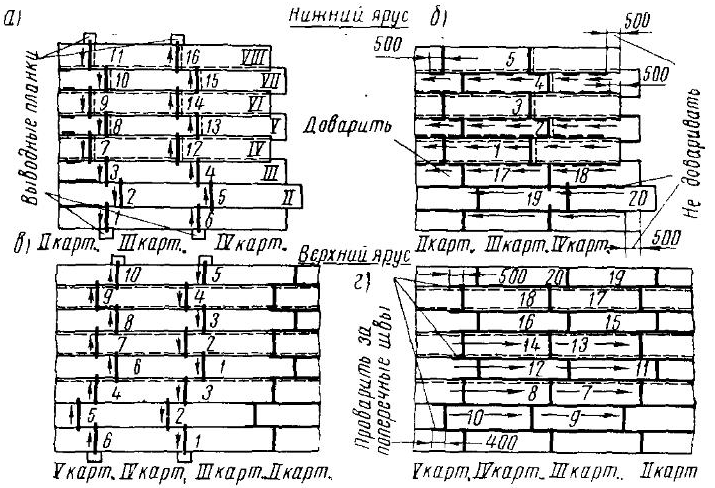


Рис. 20-6. Схемы сварки полотнища

та, закрепляемого в рабочих кружалах посредством пальцев. Освобождение от закрепления осуществляется перемещением рабочих кружал в осевом направлении на 150—200 *мм*. Наворачивание полотнища целесообразно производить на каркас, используемый в дальнейшем в качестве конструктивного элемента, например, на шахтную лестницу, опорную стойку, монтажную мачту и т. п. Изготовление специальных каркасов, не используемых при монтаже, нежелательно, так как их трудно возвращать на завод-изготовитель.

Изготовление полотнищ большого размера методом сворачивания находит все большее применение и требует совершенствования устройства двухъярусных стендов. На рис. 20-7 показана установка, предусматривающая комплексную механизацию процесса изготовления полотнищ. Самоходная тележка *2* с пневмоприсосами захватывает листы из контейнеров *1* и подает их на

место сборки *3*. Все соединения сваривают встык. Их расположение и последовательность сварки показаны на рис. 20-8. В каждом цикле свариваются поперечный (вертикаальный) и все

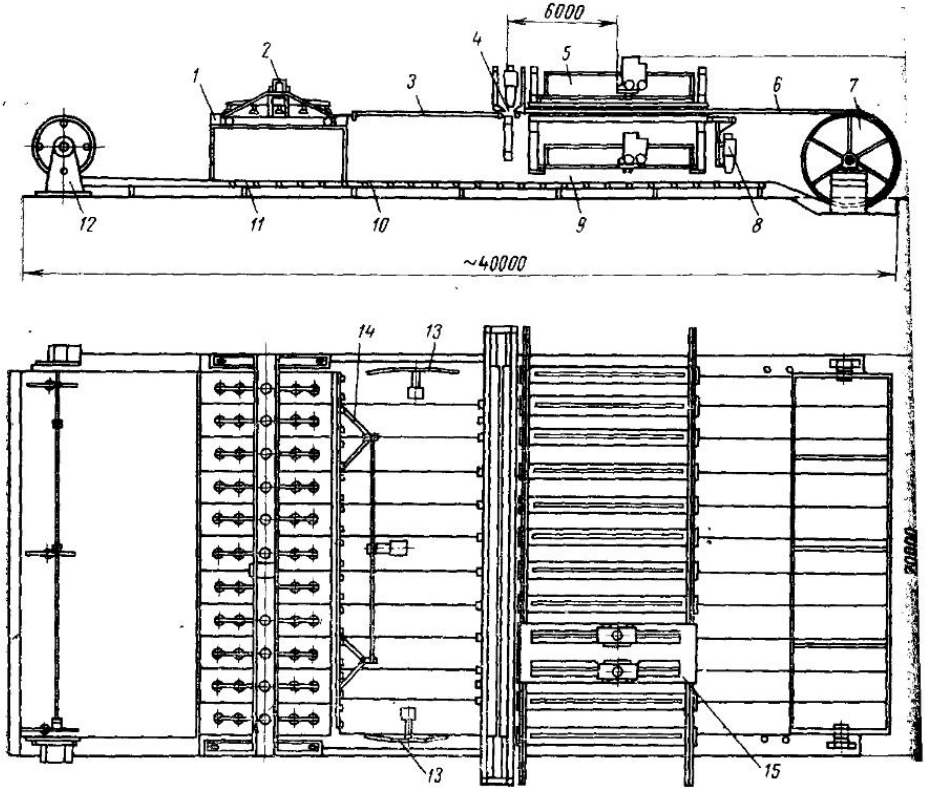


Рис. 20-7. Схема усовершенствованной установки для изготовления рулонированных конструкций:

1 — контейнер; *2* — самоходная тележка с вакуумными захватами; *3* — место сборки секций; *4* — место сварки поперечного шва; *5* — место сварки продольных швов; *6* — место осмотра швов; *7* — направляющий барабан; *8* — место сварки поперечного шва; *9* — место сварки продольных швов; *10* — место контроля и исправления швов; *11* — грунтовка полотнища; *12* — сворачивающее устройство; *13* — боковые толкатели; *14* — задний толкатель; *15* — катучая балка

продольные стыки одной секции. При этом поперечный шов закрепляет в нужном положении листы секции *III*, собранной без прихваток. Продольные стыки сваривают от середины секции *II* до середины секции *I*. Эти швы ограничивают боковые перемещения листов, а прижим кромок к балкам препятствует короблению полотнища.

Сборка листов в полотнище производится с помощью боковых *13* и заднего *14* толкателей (см. рис. 20-7). Боковые толкатели *13* сдвигают листы в поперечном направлении до совмещения кромок. Один из толкателей имеет ограниченный ход до упора, что необходимо для фиксации положения нижней кромки полотнища, второй переставляется по количеству собираемых листов, т. е. в зависимости от ширины полотнища. Чтобы избежать надвигания листов друг на друга, имеются ограничители, расположенные на балке заднего толкателя *14* для продольного движения листов и на прижимной балке поперечного стыка. При продольном движении листов подвижная балка заднего толка-

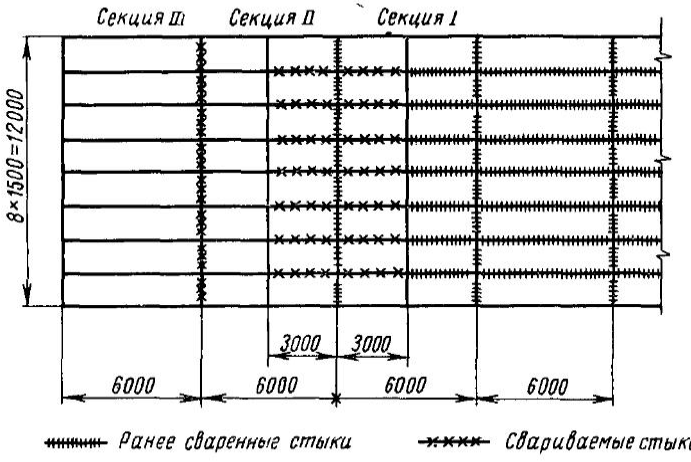


Рис. 20-8. Последовательность сварки швов

теля *14* обеспечивает перемещение секции к ранее сваренному участку полотнища и создает прямолинейность ее задней кромки. Для прижатия кромок поперечного шва к медной подкладке используются рычажные пневмоприжимы, закрепленные на двух фермах по обе стороны от места сварки *4*. На опорах они объединены в замкнутую силовую систему с фермой, поддерживающей медную подкладку снизу. Для установки всей системы этих ферм по задней кромке полотнища она имеет продольный ход 300 *мм*. Прижатие кромок продольных швов пневмоприжимами к медным подкладкам осуществляется с помощью продольных балок, объединенных на опорах в замкнутую силовую систему с помощью верхних и нижних поперечных ферм места сварки *5*. Верхние фермы, кроме того, поддерживают катучую балку *15*, по которой перемещаются две сварочные головки. Эта балка

позволяет последовательно устанавливать сварочные головки над каждой парой продольных стыков. После сварки полотнище освобождается от зажатия и с помощью сворачивающего устройства, развивающего тяговое усилие до 50 *Т*, передвигается в следующее рабочее положение. На нижнем ярусе сварка стыков с обратной стороны выполняется в той же последовательности, но без прижимных устройств.

Монтаж вертикальных цилиндрических резервуаров из рулонированных элементов выполняется следующим образом.

Рулон элементов днища укладывается на подготовленное основание резервуара и раскатывается в последовательности, определяемой расположением элементов в рулоне. Полотнища соединяются между собой внахлестку сварочным трактором под слоем флюса с одной стороны. Освобожденная от рулона центральная стойка устанавливается в центре днища. Затем у края днища на подкладной лист в вертикальное положение ставится рулон боковой стенки резервуара. Смазанная поверхность подкладного листа облегчает скольжение рулона по днищу при разворачивании, осуществляемом лебедкой или трактором с помощью троса. По мере разворота кромка рулона прижимается к упорам *4* (рис. 20-9) и прихватывается, крепление троса (детали *1, 2, 3*) переставляется. Элементы кровли также устанавливаются по мере разворота, закрепляя верхнюю кромку развернутой части боковой стенки. Последним заваривается монтажный стык боковой стенки. Так как кольцевой шов, соединяющий боковую стенку с днищем, выполняется при полностью заваренном днище, то возможно вспучивание днища вследствие потери устойчивости. При изготовлении резервуаров большой емкости (10 000 $м^3$) для предотвращения таких деформаций можно в виде рулона изготавливать только центральную часть днища, а окрайки сваривать между собой при монтаже из отдельных листов, присоединяя их к днищу на прихватках. После завершения установки, разворачивания и приварки боковой стенки к окрайкам эти прихватки удаляют, хлопуны выправляют путем сдвига листов в нахлестке, и только тогда швы между центральной частью днища и окрайками заваривают окончательно.

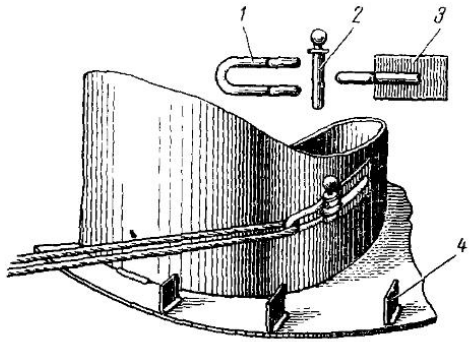


Рис. 20-9. Крепление троса на рулоне при его разворачивании

Недостатком подобного раскроя днищ является увеличение протяженности монтажных швов и увеличение числа монтажных элементов. Поэтому бо́льшее использование получил раскрой днищ, показанный на рис. 20-10, *б*, где утолщенные окрайки при-

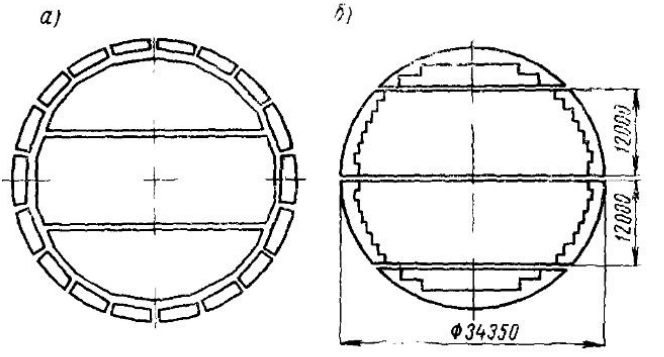


Рис. 20-10. Схема раскроя днищ резервуаров емкостью 10 000 $м^3$:

а) с отдельными сегментами; *б)* с окрайками, приваренными на заводе

вариваются на заводе при изготовлении полотнища. Кроме того, при таком раскрое монтажный стык проходит по диаметру основания и небольшая конусность днища, определяемая конусностью основания, компенсируется переменной нахлесткой.

В технологии изготовления цилиндрических резервуаров и мокрых газгольдеров много общего. Небольшое различие в монтаже заключается в том, что на смонтированное днище устанавливаются в вертикальное положение сразу все рулоны боковых стенок (корпуса резервуара, телескопа, колокола). Разворачивание рулонов может осуществляться последовательно или параллельно. При параллельной схеме монтажа рулоны разворачивают одновременно с небольшим опережением (рис. 20-11), что расширяет фронт работ.

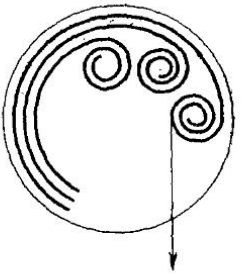


Рис. 20-11. Схема параллельного разворачивания рулонов мокрого газгольдера

Использование метода рулонирования при сооружении цилиндрических частей высоких вертикальных конструкций, например воздухонагревателей, декомпозеров, скрубберов и др., имеет особенности. Из-за наличия кольцевых стыков между монтажными блоками требования к точности изготовления рулонов

и приемам их разворачивания оказываются более высокими. Все соединения свариваются встык, отклонения размеров полотнища по ширине не должны превышать ±2 *мм* и по длине ±4 *мм*. Точность сборки листов при изготовлении рулона достигается с помощью направляющих устройств, ограничителей и контрольных рисок двухъярусного стенда. Предотвращение местных изломов при разворачивании рулонов обеспечивается применением специальной оснастки. Приемы разворачивания рулонов при монтаже листовых высотных конструкций можно подразделить на две основные категории: 1) с разворачиванием рулонной заготовки до плоского состояния и последующим ее наворачиванием на каркас проектного диаметра и 2) с разворачиванием непосредственно до проектного диаметра.

Для конструкций диаметром до 6 *м*, а также при сборке в одном месте небольшого количества цилиндрических оболочек бóльшего размера целесообразно использовать метод наворачивания. В этом случае рулон разворачивается на плоском стенде, а в качестве шáблона-кондуктора используется барабан, состоящий из двух половин, шарнирно соединенных по образующей. Диаметр барабана соответствует диаметру монтажного блока и может изменяться с помощью винтовых стяжек. Барабан устанавливается и прихватывается так, чтобы кромка полотнища расположилась посередине разъема. Наворачивание осуществляется перекатыванием барабана; кромки замыкающего стыка подтягиваются с помощью винтовых стяжек. Стык сваривают автоматом под флюсом: сначала изнутри в нижнем положении, а после поворота барабана на половину окружности — снаружи. Затем сваренную обечайку ставят в вертикальное положение и извлекают из нее барабан, предварительно уменьшив его диаметр. После досборки монтажный блок поднимается и устанавливается в проектное положение. Кольцевой шов сваривают с двух сторон: с наружной стороны обечайки обмазанными электродами вручную, а внутри обечайки — полуавтоматами в CO_2.

При наличии в конструкции внутренних жестких колец метод наворачивания оказывается особенно эффективным, так как позволяет совместить операции формообразования обечайки и ее сборку с элементами жесткости.

При изготовлении в одном месте значительного количества монтажных блоков диаметром от 6 до 11—12 *м* более целесообразно обечайку проектного размера получать непосредственно при разворачивании рулона, используя специальный стенд. При разворачивании ось рулона может быть в вертикальном или горизонтальном положении. В первом случае собранная обечайка для последующей установки в проектное положение не требует поворота, но зато во втором случае стенд для разворачивания оказывается более универсальным и позволяет получать

обечайку требуемого размера. Схема стенда для разворачивания рулона в горизонтальном положении показана на рис. 20-12. Стенд состоит из двух рам *1* с электролебедками *2* и опорными катками *8*, на которые устанавливаются четыре кольца-шаблона *7*. Эти кольца-шаблоны попарно связаны распорками *5* и составлены из трех элементов, соединяемых на болтах. После установки на катки кольца соединяют временными связями *6*, снимаемыми в процессе разворачивания рулона. Тяговый канат *4* крепится к рулону *3*, огибает его и через отводной ролик *9* натягивается лебедкой *2*. Развернутая часть рулона крепится к кольцам-шаблонам скобами на клиньях. После сварки замы-

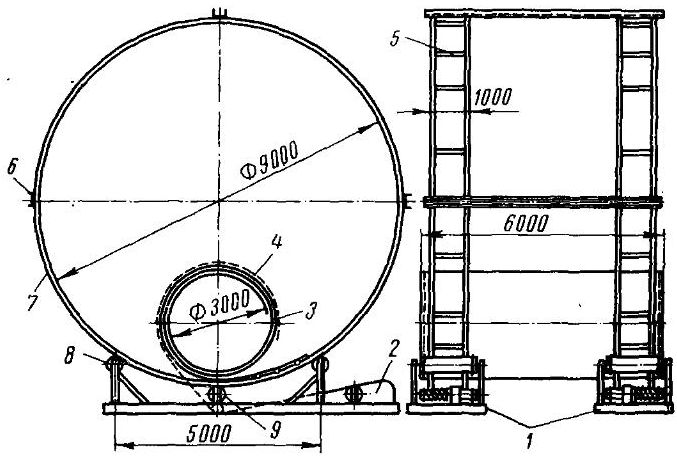


Рис. 20-12. Схема установки для разворачивания рулонов в горизонтальном положении

кающего шва монтажный блок ставят вертикально, снимают кольца-шаблоны и поднимают в проектное положение.

Так как после разворачивания рулонную заготовку извлекают из каркаса и устанавливают в проектное положение в свободном состоянии, то фиксация обеих кромок по периметру в процессе разворачивания не является обязательной. Поэтому дальнейшим развитием приемов разворачивания рулонов явился способ бескаркасного разворачивания в вертикальном положении, предусматривающий фиксацию только одной нижней кромки.

Применение методов рулонирования для конструкций из листов толщиной, превышающей 16 *мм*, связано с постепенным по мере увеличения толщины ухудшением геометрической формы конструкции и усложнением операции разворачивания.

Поэтому для изготовления негабаритных цилиндрических конструкций из листов толщиной более 16—18 *мм* вместо рулонирования используют *способ временного деформирования.* Сущность его заключается в следующем. Сваривают несколько листов, изготовляя таким образом полотнище длиной, равной развертке обечайки. Ширина полотнища ограничивается длиной валков гибочного оборудования, в котором вальцуется обечайка с незаваренным стыком по образующей. Затем за счет создания нахлестки поперечные размеры обечайки уменьшают до размера, удобного для перевозки на обычных железнодорожных платформах (рис. 20-13, *а, б*). Принципиальные схемы оснастки для временного деформирования обечаек из листов толщиной 20÷10 *мм* показаны на рис. 20-14.

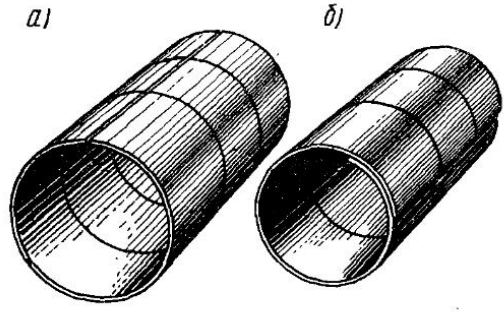


Рис. 20-13. Метод временного деформирования

При использовании способа временного деформирования особое внимание необходимо уделять предотвращению местной пластической деформации, нарушающей кривизну обечайки. Спо-

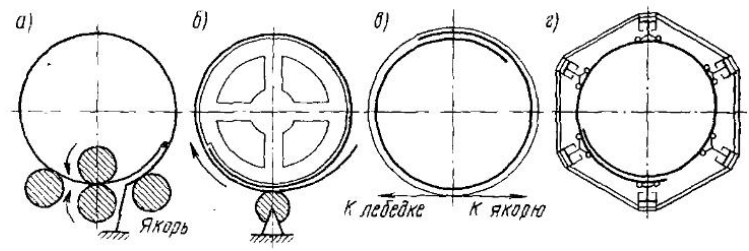


Рис. 20-14. Принципиальные схемы оснастки для выполнения временного деформирования:

а) на четырехвалковых вальцах; *б)* наворачиванием; *в)* петлей троса; *г)* домкратами на стенде

соб временного деформирования нашел практическое применение при изготовлении корпусов цементных печей диаметром 4,5—5 *м* и других конструкций подобного типа.

Рассмотрим второй прием, который предусматривает изготовление габаритных элементов в условиях завода и механизи-

рованную сварку их на монтаже. К использованию такого приема относится сооружение кровли вертикального цилиндрического резервуара.

Изготовление покрытия из листов толщиной $2 \div 3$ *мм* в виде рулона из-за трудностей монтажа оказалось неэффективным. Широкое распространение получила кровля, собираемая из отдельных поставляемых с завода щитов, размер которых определяется габаритом железнодорожного подвижного состава. На рис. 20-15 показана схема расчленения кровли резервуара объемом 2000 $м^3$ на щиты трех типов Щ-1, Щ-2 и Щ-3. Порядок сборки щитов следующий. На кондукторе вплотную к ограничителям и в притык один к другому выкладывают листы настила *2* (рис. 20-16) и соединяют их между собой электроприхватками. Поверх настила раскладывают элементы *1* каркаса щита, размещая их над стыками настила кровли. Все элементы каркаса соединяют прихватками. Настил

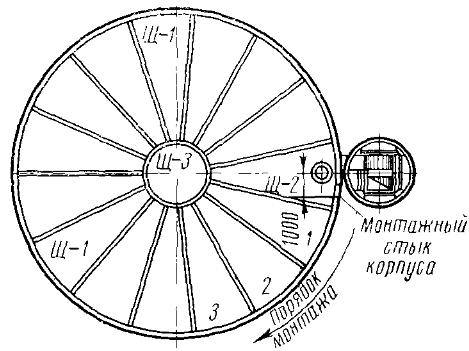


Рис. 20-15. Монтажная схема щитов кровли

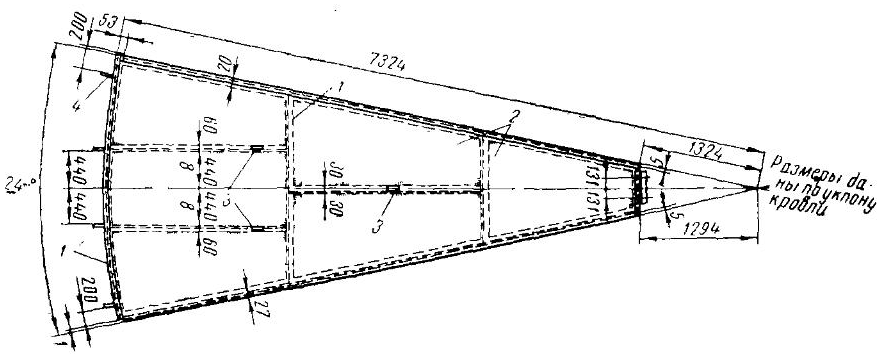


Рис. 20-16. Типовой щит кровли

кровли приваривают к каркасу прерывистыми швами, поджимая его с помощью рычажных приспособлений. Собранный щит снимают с кондуктора и переносят к месту сварки, одновременно кантуя его. Швы на настиле кровли выполняют автоматической сваркой под флюсом тракторами типа ТС-17М. Поскольку

в конструкции щитов предусмотрено размещение всех стыков листового настила над элементами каркаса, прожоги листов исключаются. Свес настила со стороны одной из радиальных балок

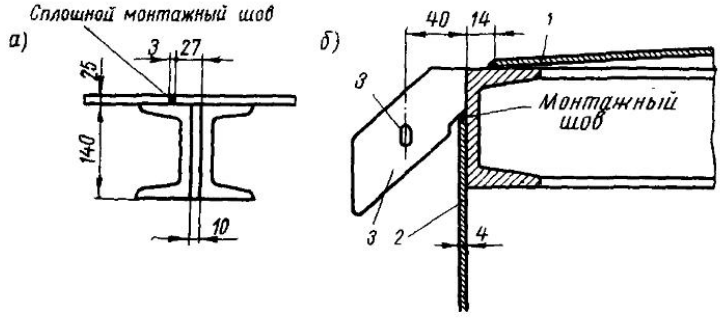


Рис. 20-17. Монтажные соединения щитов

каркаса щита облегчает сборку кровли и позволяет выполнять монтажный стык на элементе каркаса соседнего щита (рис. 20-17, *а*), как на подкладке. При установке щитов в проектное положение используют монтажные скобы *3* и улавливатели *4* (см. рис. 20-16). Щиты *1* укладываются одним концом на опорную стойку, а другим с помощью улавливателя *3* (рис. 20-17, *б*) — на боковую стенку резервуара *2* по мере разворачивания рулона без лесов и люлек (рис. 20-18). Резервуары большой емкости (10 000 $м^3$) имеют покрытия либо сферические из криволинейных щитов с опорой только на корпус, либо плоские из плоских щитов, опирающихся на корпус и несколько внутренних стоек.

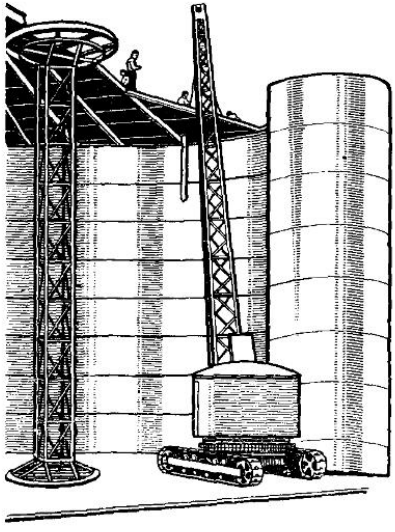


Рис. 20-18. Монтаж щитовой кровли

Рассмотренные конструкции щитовых покрытий резервуаров требуют дальнейшего усовершенствования их технологичности и уменьшения веса. Интересным представляется предложение выполнять покрытие резервуаров складчато-коническим с использованием гофрированных листов, как показано на рис. 19-5, *г*. Такое покрытие составляется из одинаковых пространственных элементов, обра-

зуемых двумя плоскими щитами и щитом, представляющим участок конической поверхности. Грани сопряжения конической и складчатой поверхностей выполняются прямолинейными. Каждый щит представляет собой тонкую гофрированную пластинку или оболочку, подкрепленную по контуру замкнутым сечением, образованным гнутым уголком из листа той же или близкой толщины. В результате гофрирования панели между ребрами становятся весьма жесткими. Это, во-первых, позволяет им воспринимать местные нагрузки, а, во-вторых, при соединении их в пространственную складчатую систему обеспечивать высокую несущую способность всего покрытия без дополнительных элементов жесткости. Отсутствие каркаса делает такие щиты более легкими и технологичными.

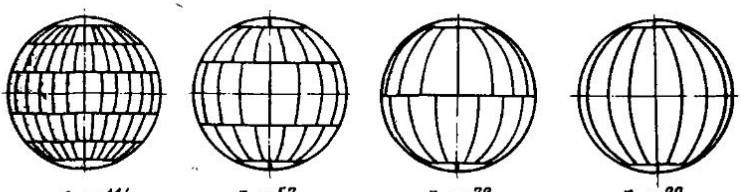


Рис. 20-19. Схемы раскроя корпусов сферических резервуаров объемом 600 $м^3$:

n — число лепестков; L — длина швов, $м$

Другим примером листовой конструкции большого размера, сооружаемой из габаритных заводских элементов, может служить сферический резервуар. Расчленение его на транспортабельные элементы выполняется исходя из технологических возможностей изготовления этих элементов в условиях завода и из условия сокращения трудоемкости сборочно-сварочных операций при монтаже.

Как видно из рис. 20-19, укрупнение элементов позволяет резко сократить длину монтажных швов. Для раскроя по вариантам *1, 2, 3* сферическую форму заготовкам придают штамповкой. При ограниченном размере штампа отправочный элемент получают из двух или более заготовок автоматической сваркой с двух сторон. Перед отправкой на заводе производится контрольная сборка каждой полусферы и после подгонки лепестков элементы оболочки маркируются. Хранение и транспортировка осуществляются в вертикальном положении с опиранием лепестков на меридиональную кромку. Лепестки бо́льшего размера

получают вальцовкой на специальных гибочных вальцах со сферическими валками. В этом случае плоская заготовка сваривается из листов, вырезается газовой резкой по копиру и затем вальцуется вхолодную. Таким способом выполняются элементы варианта *4* раскроя (рис. 20-19), поставляемые на монтаж в виде 16 лепестков и 4 полудниц. Для предотвращения деформаций при транспортировке лепестки и днища скрепляются между собой скобами в виде пакета с приваркой временных элементов жесткости или укладываются в контейнер.

При объеме 600 $м^3$ корпуса сферических резервуаров обычно монтируют из двух полушарий, предварительно собираемых на стенде-кондукторе. В зависимости от раскроя приемы сборки полусфер различны. При варианте *3* раскроя (рис. 20-19) схема сборки показана на рис. 20-20. Полуднища *2* устанавливаются

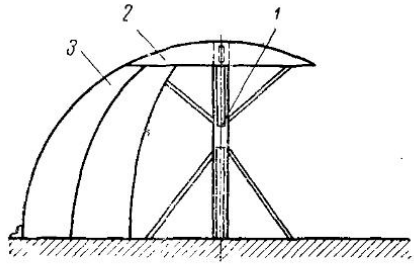


Рис. 20-20. Схема сборки нижней полусферы на стенде

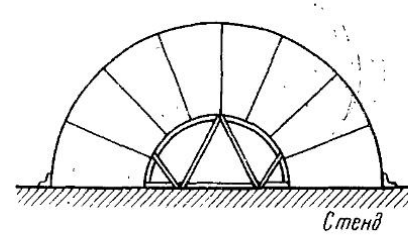


Рис. 20-21. Схема сборки полушара на стенде-кондукторе

на центральную стойку *1* стенда (грибок). Лепестки нижней полусферы *3*, попарно сваренные в блоки здесь же на монтаже автоматической сваркой под флюсом, подают на сборочный стенд в порядке, предусмотренном заводской маркировкой. Уширенной частью их ставят на опорное кольцо стенда, а верхнюю часть опирают на планки, приваренные к днищу. Блоки соединяют между собой сборочными планками и оправками с использованием сборочных шайб, приваренных к лепесткам при контрольной сборке на заводе. Подварку выполняют вручную, сначала меридиональных швов, затем кольцевого шва днища. Схема сборки полусферы из 8 лепестков и двух полудниц иная. Лепестки собирают в кондукторе (рис. 20-21) без полудниц, что облегчает доступ внутрь полушария. Временное соединение лепестков выполняют с помощью инвентарных стяжных приспособлений. Полуднища устанавливаются в последнюю очередь, подварка швов производится вручную с наружной стороны.

Общую сборку и сварку сферических резервуаров объемом 600 $м^3$ выполняют следующим образом. Используя специально приваренные трубчатые цапфы, нижнюю полусферу кантуют

и устанавливают на временную опору. На этом же стенде собирают верхнюю полусферу, затем поднимают ее и монтируют на нижнюю. Сборка заканчивается ручной подваркой замыкающего шва.

Автоматическая сварка по ручной подварке выполняется сварочным трактором, который при сварке с внешней стороны располагается вверху на сфере, при сварке внутри — внизу. Горизонтальное положение свариваемого участка шва обеспечивается вращением сферы с помощью специального манипулятора.

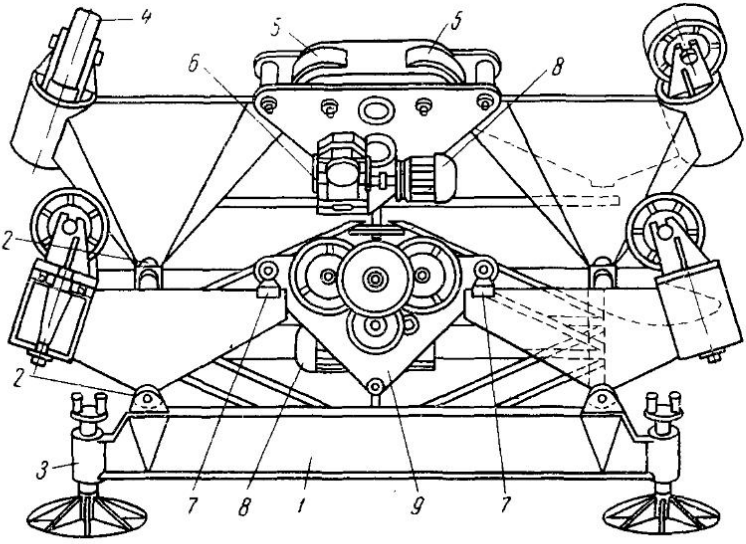


Рис. 20-22. Манипулятор для вращения сферического резервуара при сварке

Необходимость выполнения меридиональных, экваториальных и полюсных швов резервуара различного раскроя и перехода с одного шва на другой предъявляет к конструкции манипулятора требование вращения в любой плоскости. В конструкции манипулятора, показанной на рис. 20-22, это достигается применением четырех грузовых катков *4*, самоустанавливающихся в направлении вращения резервуара, и двух независимо работающих приводных станций *9*. Шарнирная система механической части манипулятора (шарниры *2*, *7*) обеспечивает равномерную нагрузку всех грузовых катков *4* и приводных катков *5*. Вращение приводных катков каждой станции обеспечивают моторы *8* через червячные редукторы *6* и зубчатые пары. Во избежание смещения центра тяжести резервуара раме *1* домкратами *3*

придают горизонтальное положение. Установка собранной сферы на манипулятор выполняется с помощью подъемных мачт или стреловых кранов.

Последовательность выполнения швов следующая. Сначала выполняются меридиональные швы со стороны разделки кромок в несколько слоев. С внутренней стороны подварка корня шва производится без вырубки его глубоким проплавлением. При сварке меридиональных швов приводные катки *5* обеих станций манипулятора вращаются в одну сторону, а поворотные катки *4* самоустанавливаются параллельно приводным. За один оборот резервуара производится сварка двух меридиональных, противоположно расположенных швов, с перерывами сварки на полюсных соединениях и на экваториальном, если меридиональные швы обоих полушарий смещены. Поворот резервуара в исходное положение для сварки другого меридионального шва производится путем включения приводных катков разных станций на вращение в противоположные стороны. После меридиональных свариваются широтные и полюсные швы. Положение резервуара на кантователе при сварке полюсного шва показано на рис. 20-23. Одна из приводных станций манипулятора выключается, другая работает со скоростью 34 *м/ч*. При этом скорость сварки полюсного шва составляет около 17 *м/ч*.

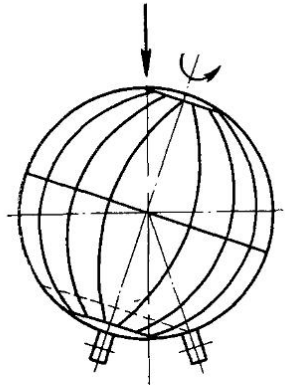


Рис. 20-23. Положение сферического резервуара при сварке полюсного шва

При выполнении сборочных и сварочных работ над резервуаром целесообразно устраивать общее светопрозрачное пленочное покрытие. В этом случае условия работы лучше чем под открытым небом, облегчается применение сварки в среде защитного газа.

В нашей стране опыт сооружения сферических резервуаров ограничивается резервуарами объемом 2000 $м^3$. За рубежом при сооружении резервуаров значительно больших размеров монтаж обычно осуществляют методом укрупнительной сборки лепестков заводского изготовления в блоки на монтажной площадке и автоматической их сварки под слоем флюса или в среде защитного газа. Монтаж блоков в проектное положение ведется последовательным наращиванием, швы между блоками выполняют в основном ручной сваркой обмазанными электродами. Очередность установки блоков при монтаже сферы определяется расположением опор. Если опоры примыкают к нижнему поясу, то сборка начинается с этого пояса последовательным наращи-

ванием верхних поясов. При закреплении опор в экваториальном поясе первым собирается этот пояс, затем — нижние и верхние пояса.

При сооружении конструкций, подобных кожуху домны (толщина листовых элементов до 40 *мм*), возможности механизации сварки в условиях монтажа в значительной степени зависят от характера расчленения всей конструкции на элементы, постав-

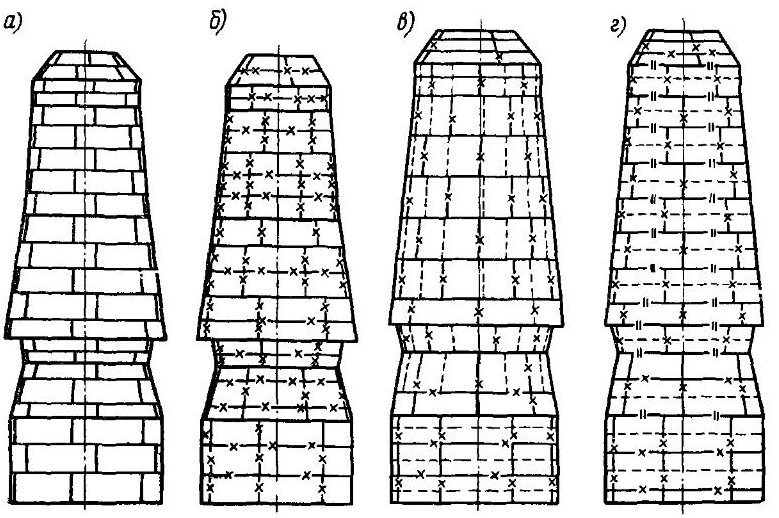


Рис. 20-24. Схемы раскроя кожуха доменной печи. Швы выполнены:

——— ручной электродуговой сваркой на монтаже; ——— автоматической сваркой на заводе; — ‖ — ‖ — газоэлектрической сваркой на монтаже; х—х— электрошлаковой сваркой на заводе

ляемые заводом. Наиболее характерные схемы раскроя показаны на рис. 20-24. Вариант раскроя, приведенный на рис. 20-24, *а*, предусматривает горизонтальное расположение листов с разбежкой вертикальных стыков в каждом поясе. При таком раскрое электрошлаковой сваркой могут выполняться только вертикальные стыки на высоту одного пояса, что составляет всего 20—23% общей протяженности швов. Вариант, показанный на рис. 20-24, *б*, при котором вертикальные стыки в отдельных поясах совмещаются в одну линию на высоту монтажного блока, позволяет использовать электрошлаковую сварку более широко. В этом случае из отдельных листов, расположенных в разных поясах друг над другом, при монтаже собирают и сваривают укрупненные элементы — скорлупы (рис. 20-25, *а*). Сборку под электрошлаковую сварку выполняют с помощью П-образных

скоб. Для компенсации неравномерной по длине шва поперечн деформации зазор в верхней части стыка задают больше, ч в нижней. Для электрошлаковой сварки собранный элеме устанавливают так, чтобы горизонтальные швы оказались в ве тикальной плоскости. После завершения сварки и удален технологических планок и скоб из скорлуп собирают монтажны блок (рис. 20-25, *б*). Концевые участки ранее сваренных горизо тальных швов на длине, необходимой для прохождения магнит шагающего аппарата и фо мующих ползунов, зачища заподлицо с основным мета лом. Блоки кожуха с угло наклона образующей кону около 45° сваривают теми ж аппаратами с использовани удлиненного заднего ползун

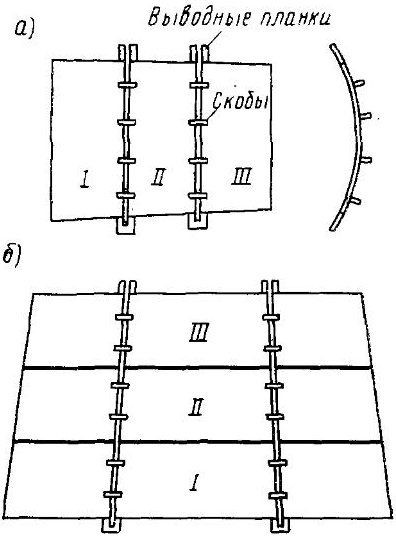


Рис. 20-25. Схемы сборки под электрошлаковую сварку:

а) горизонтальных швов; *б)* вертикальных швов монтажного блока

Рассмотренный прием п зволяет около 60% всех шв на монтаже выполнять одн проходной электрошлаков сваркой, однако его трудое кость оказывается значител ной из-за необходимости уст новки и закрепления каждо скорлупы при вертикально расположении горизонтальны швов и поворота скорлуп пр переходе к сборке монтажно блока. Этот недостаток устра няется при использовани схем раскроя, показанных н рис. 20-24, *в, г*. Так, схема приведенная на рис. 20-24, предусматривает укрупнени листов попарно в условиях завода с помощью сварки под флю сом при расположении листов длинной кромкой вдоль образую щей. В этом случае все швы монтажного блока прямолинейны однотипны и удобны для сборки и электрошлаковой сварк Если вальцовка листов по длинной кромке затрудняется отсут ствием на заводе-изготовителе листогибочных вальцев с боль шой длиной валков, то можно использовать раскрой, показан ный на рис. 20-24, *г*, при котором попарное укрупнение листов н заводе выполняется при расположении длинной кромки лист в окружном направлении.

Механизация выполнения горизонтальных швов между мон тажными блоками достигается применением полуавтоматическо сварки в среде CO_2 (рис. 20-24). Эти швы обычно выполняютс

с двусторонней разделкой кромок в несколько слоев. При сварке на высоте защита шва из-за ветра может нарушаться. В этом случае разделку с внешней стороны заполняют ручной сваркой обмазанным электродом, а внутри кожуха — полуавтоматической сваркой в среде CO_2.

За рубежом для выполнения кольцевых и продольных швов на вертикальной плоскости нередко используют специальные самоходные тележки, перемещающиеся по кромке собранного пояса или по рельсовой направляющей, закрепленной прихватками к стенке выше свариваемого стыка. Наличие направляющей позволяет производить сварку кольцевого шва без прекращения монтажа следующего пояса. Сварка производится с двух сторон либо под флюсом, либо в среде CO_2; количество слоев шва определяется толщиной свариваемых листов. При сварке под флюсом используются специальные флюсоудерживающие устройства.

При изготовлении корпуса цементной печи характер членения всей конструкции на отдельные транспортабельные элементы определяется прежде всего способом их доставки на место монтажа. Так, при использовании обычных железнодорожных платформ или полувагонов целая обечайка перевезена быть не может, ввиду негабаритности размера по диаметру (4,5—5,5 *м*). Поэтому при таком способе перевозки обечайки корпуса поставляются по частям в виде сваренных из двух свальцованных листов «четвертинок».

Использование методов временного деформирования с доведением незамкнутых по образующей обечаек до диаметра 3700 *мм* позволяет перевозить их на обычных платформах по условиям негабаритности II степени. При использовании колодцевых транспортеров по железной дороге можно перевозить обечайки длиной 2000 *мм* целиком. Перевозка целых обечаек большей длины (4000—8000 *мм*) возможна только автотракторным или водным транспортом. Так как подбандажные обечайки имеют более жесткий допуск на эллиптичность, то их обычно выполняют длиной 2000 *мм* и доставляют на место монтажа целиком. В условиях монтажа сварку продольных швов обечаек корпуса выполняют сварочным трактором с двух сторон. После сборки отдельных обечаек в блоки кольцевые стыки сваривают на приводном роликовом стенде сварочным трактором по ручной подварке или на флюсовой подушке.

Бандажи, представляющие собой кольца со сплошным прямоугольным сечением $(250 \div 400) \times (800 \div 1000)$ *мм* весом от 12 до 60 *Т*, на место монтажа могут поставляться либо целиком, либо в виде двух полуколец. В первом случае на заводе бандаж под сварку собирают из частей, прошедших черновую механическую обработку. Поэтому отклонения размеров, вызванные неточной сборкой и деформациями от сварки, не вызывают

затруднений, если они не выходят за пределы припуска на ч стовую обработку.

Во втором случае сборка и сварка двух окончательно обр ботанных на заводе полуколец в условиях монтажа должна бы точной, т. е. эллиптичность бандажей печи диаметром 5 не должна превышать 3 *мм*, а печи диаметром 4,5 *м* 2,5 *мм* при конусности не б лее 1,5 *мм*. Обычно эта опер ция выполняется выездн бригадой завода, имеющ опыт такой работы.

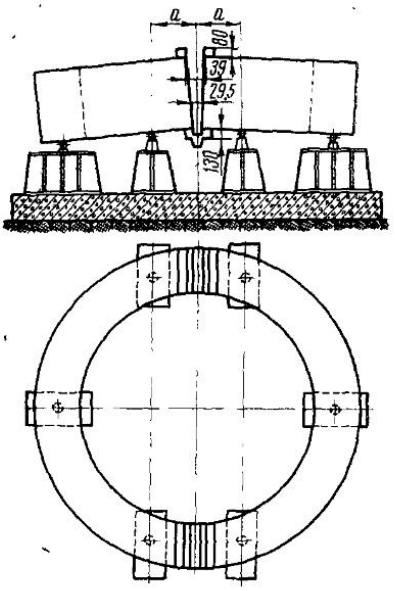


Рис. 20-26. Сборка половин бандажа под сварку

Так как усадка в верхн и нижней частях шва (р 20-26) неодинакова, то велич ны эллиптичности и конусн сти баидажа из-за сварочн деформаций могут быть ко пенсированы размерами кл нового зазора в стыке. П правильном выборе размер этого клинового зазора и о сутствии сборочных скоб ст бильность результатов п сварке ряда бандажей опред ляется точностью сборки, п стоянством условий сварк и постоянством размера (рис. 20-26), от которого зав сит момент силы тяжести ка дой половины бандажа, пр пятствующий закрывани клинового зазора. Сварку об их швов таких бандажей производят одновременно методо плавящегося мундштука.

Для снятия внутренних напряжений после сварки стыки по вергают местному отпуску. С помощью съемных электрическ печей участки бандажей длиной 700 *мм* в каждую сторону шва подвергаются нагреву до температуры 550— 600° С с соо ветствующей выдержкой и медленным охлаждением.

По мере изготовления блоков обечаек и сварки бандаж последние насаживают на подбандажные обечайки, и укрупне ные монтажные элементы краном устанавливают в проектн положение (рис. 20-27). После выверки соосности сварку кол цевых швов выполняют сначала однослойным швом вручну а затем трактором изнутри и снаружи с люльки, подвешенн на кране, с использованием механизма вращения печи для обе печения нижнего положения свариваемого шва.

Из всех рассмотренных типов листовых сварных конструкций большого размера наиболее сложной в изготовлении является спиральная камера гидротурбины. Значительная толщина листовых элементов, необходимость комбинирования листов из малоуглеродистой стали с листами из стали повышенной прочности, сложность геометрической формы и высокие требования к качеству выполнения сварных соединений — все это в серьезной степени затрудняет механизацию сборочно-сварочных операций при изготовлении подобных конструкций. Как видно из рис. 20-2, спиральная камера собирается из большого числа звеньев конусной формы различных размеров, причем каждое звено в свою очередь составляется из 2—5 технологических частей. После газовой вырезки заготовки подвергаются гибке на прессе с помощью универсального гибочного штампа с проверкой шаблонами. Контрольная сборка в условиях завода для таких конструкций является обязательной.

В отличие от общей сборки в горизонтальном положении, требующей значительных площадей и больших трудовых затрат, сборка в вертикальном положении оказывается более рациональной, хотя и требует бо́льшей точности изготовления заготовок (рис. 20-28). Половина статора *4* устанавливается на плитовой стенд *3*, на который наносится плазовая разметка сечений всех звеньев

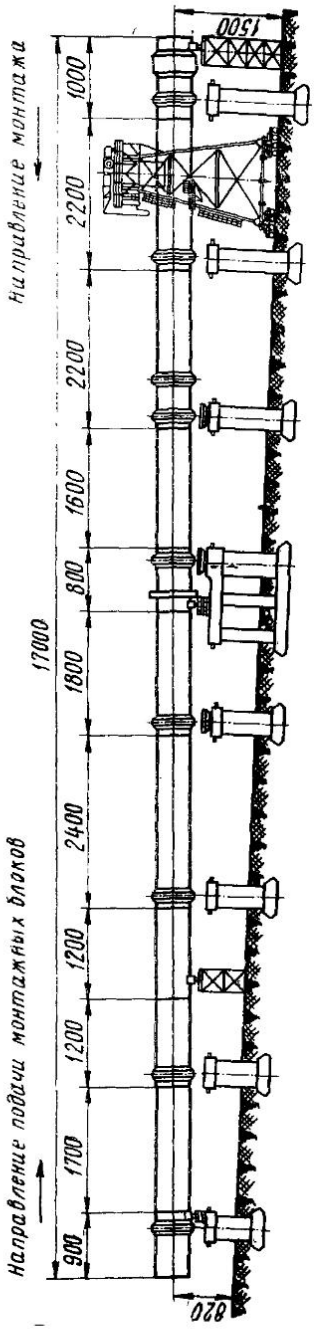


Рис. 20-27. Схема разделения корпуса печи на монтажные блоки (размеры даны в сантиметрах)

с их центрами и осевыми относительно статора. Кромко сопрягающейся со звеном *1*, звено *2* устанавливается на пл ту по плазовой разметке и собирается в кольцо с подго кой к статору в стыках частей звена и по плите с доведение зазоров до допустимой величины путем подрубки и наплав кромок. После закрепления в кольцо с помощью стяжек на пр хватках звено *2* снимается с плаза, а на его место устанавлив ются и подгоняются по плите и к статору в той же последов тельности элементы звена *1*. Затем на звено *1* устанавливает звено *2*. Подгонка стыка между ними производится за счет вер ней кромки звена *1*, не затрагивая базовую кромку звена *2*. Н этом операция контрольной сборки звена *1* заканчивается.

Порядок монтажной сборки можно проследить на рис. 20-2 Показанная на схеме спиральная камера состоит из 27 констру

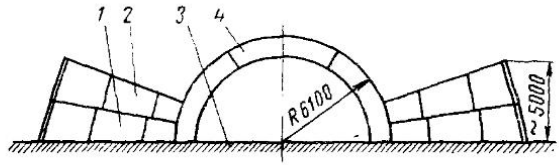


Рис. 20-28. Схема сборки в вертикальном положении спиральной камеры

тивных звеньев, поставляемых в виде 36 монтажных элементов. Звенья XXVII—XXIII и отражательный лист составляют один монтажный элемент, звенья XXII—XIII сварены в условиях завода попарно, звенья с VII по XII состоят каждое из двух, а с VI по I — из трех монтажных элементов. После установки и раскрепления статора гидротурбины, сборку обычно начинают с зуба спирали. Поэтому первыми устанавливают, подгоняют и прихватывают между собой и к статору секции *18* и *2*, а также отражательный лист *19*. Затем к каждой из секций последовательно устанавливаются и подгоняются смежные прилегающие секции от *18* к середине спирали до секции *13* и с другого конца от секции *2* к середине до секции *11*. Выполняемая с некоторым припуском замыкающая секция *12* устанавливается последней. Подтягивание сопрягаемых стыков производят с помощью болтовых стяжек и конусных оправок, подрезку — резаком. Регулировка высотного положения каждой секции и в целом всей спиральной камеры обеспечивается домкратами; форма трубы спирали исправляется растяжками.

Сварку спиральных камер производят преимущественно обмазанными электродами. Для уменьшения потолочной сварки разделку горизонтальных и кольцевых швов делают комбинированной, т. е. в нижней части трубы кромки разделываются

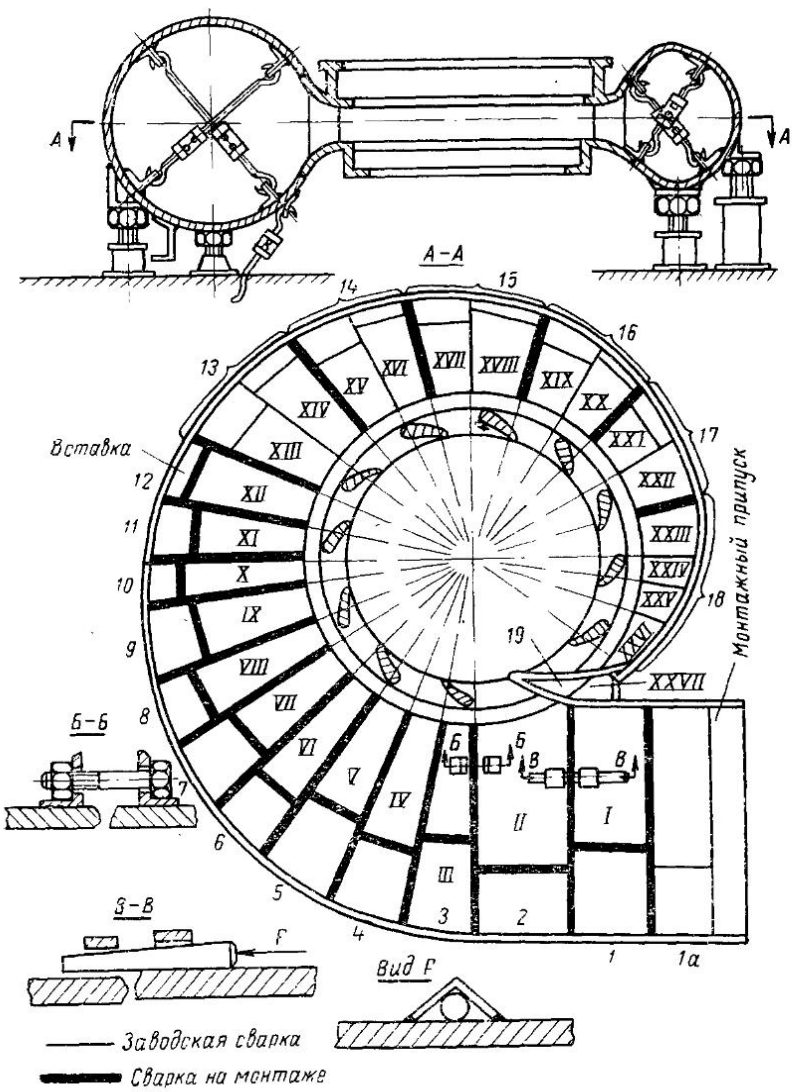


Рис. 20-29. Схема монтажа спиральной камеры радиально-осевой гидротурбины

с внутренней, а в верхней части — с наружной стороны. Боковая часть трубы обычно имеет кромки с Х-образной разделкой. Общее направление сварки то же, что и при сборке, т. е. от краев к середине спирали до замыкающего звена, завариваемого последним. В каждой секции сначала завариваются продольные швы, затем швы, соединяющие секцию со статором. Кольцевой шов варят в секции последним при одновременной работе нескольких сварщиков, располагающихся равномерно по стыку. Швы выполняются обратноступенчатым способом с длиной ступени 250÷300 *мм*, укладка их в несколько слоев осуществляется секционным методом (длина секции — 500÷600 *мм*) или горкой.

§ 2. СОСУДЫ, РАБОТАЮЩИЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

При рассмотрении вопросов технологии изготовления сварные сосуды, работающие под давлением, целесообразно разделить на три группы: тонкостенные, со стенками из листов средней толщины и толстостенные.

В таких сосудах типовыми являются прямолинейные, кольцевые и круговые стыковые швы. Приемы выполнения каждого из них имеют свои особенности; разнообразна и применяемая оснастка.

Сборку стыковых швов тонкостенных сосудов рекомендуется производить с помощью зажимных приспособлений без прихватки; при сварке прямолинейных швов целесообразно по концам соединения прихватывать встык технологические планки.

Для обеспечения высокого качества стыковых соединений большое значение имеет конструкция подкладок и плотность прижатия к ней кромок листов. Материал подкладок, а также форма и размеры канавок могут быть различными в зависимости от материала изделия, толщины свариваемых элементов и расположения шва. Так, например, при сварке тонколистовых элементов из жаропрочных и нержавеющих сталей используют медные подкладки, а при сварке высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов применяют стальные подкладки.

При сборке и сварке прямолинейных швов между листами и продольных швов обечаек равномерное и плотное прижатие кромок к подкладке достигается использованием зажимных приспособлений клавишного типа. Усилие прижатия в таких приспособлениях обычно составляет 30÷70 *кГ* на 1 *см* длины шва и создается гидравлическим или пневматическим устройством.

Приспособление для сварки прямолинейных швов с пневмошланговым прижатием клавиш показано на рис. 20-30. На верхнем основании жесткого каркаса закреплен ложемент *1* с подкладкой *2*. Прижим свариваемых кромок осуществляется раздельно для каждого листа через набор клавиш *4*, укрепленных на балках *8*. Давление на клавиши передается пневмошланга-

ми *5* и *6* и регулируется редуктором. Установка и прижатие листов производятся в следующей последовательности: поворотом эксцентрикового валика *7* из подкладки выдвигаются фиксаторы *3*, после чего до упора в них справа заводится листовая заготовка и зажимается подачей воздуха в шланг *5*. Затем фиксаторы убираются; до упора в кромку правой заготовки устанавливается левая заготовка и зажимается подачей воздуха в шланг *6*. Этим достигается легкая и точная установка заготовок по ручью подкладки и совмещение стыка свариваемых кромок с плоскостью перемещения электрода сварочной головки.

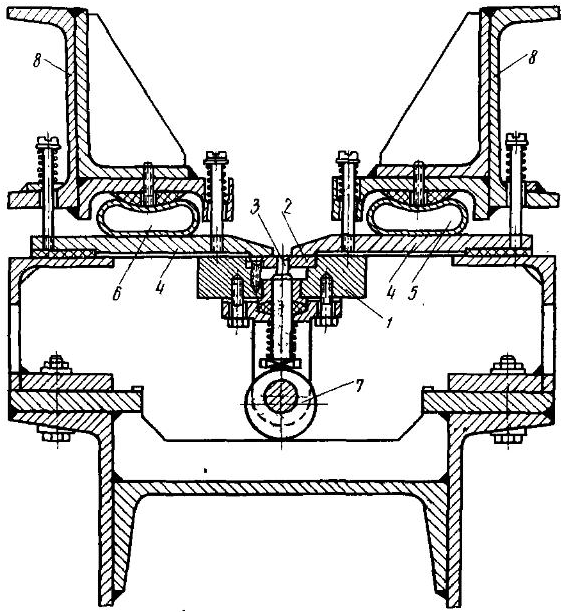


Рис. 20-30. Приспособление пневмошлангового типа для сварки прямолинейных швов

Рассмотренное приспособление можно использовать как для сборки и сварки плоских листов, так и для сборки и сварки продольных стыков обечаек (рис. 20-31). В последнем случае основание *1* выполняется в виде консоли, прижимные балки *2* с клавишами *3* закрепляются одним концом жестко, а другим концом — посредством откидных болтов *4*.

Деформации тонкостенных обечаек от продольных швов выражаются в нарушении прямолинейности образующих и уменьшении кривизны в зоне шва в поперечном сечении, как показано

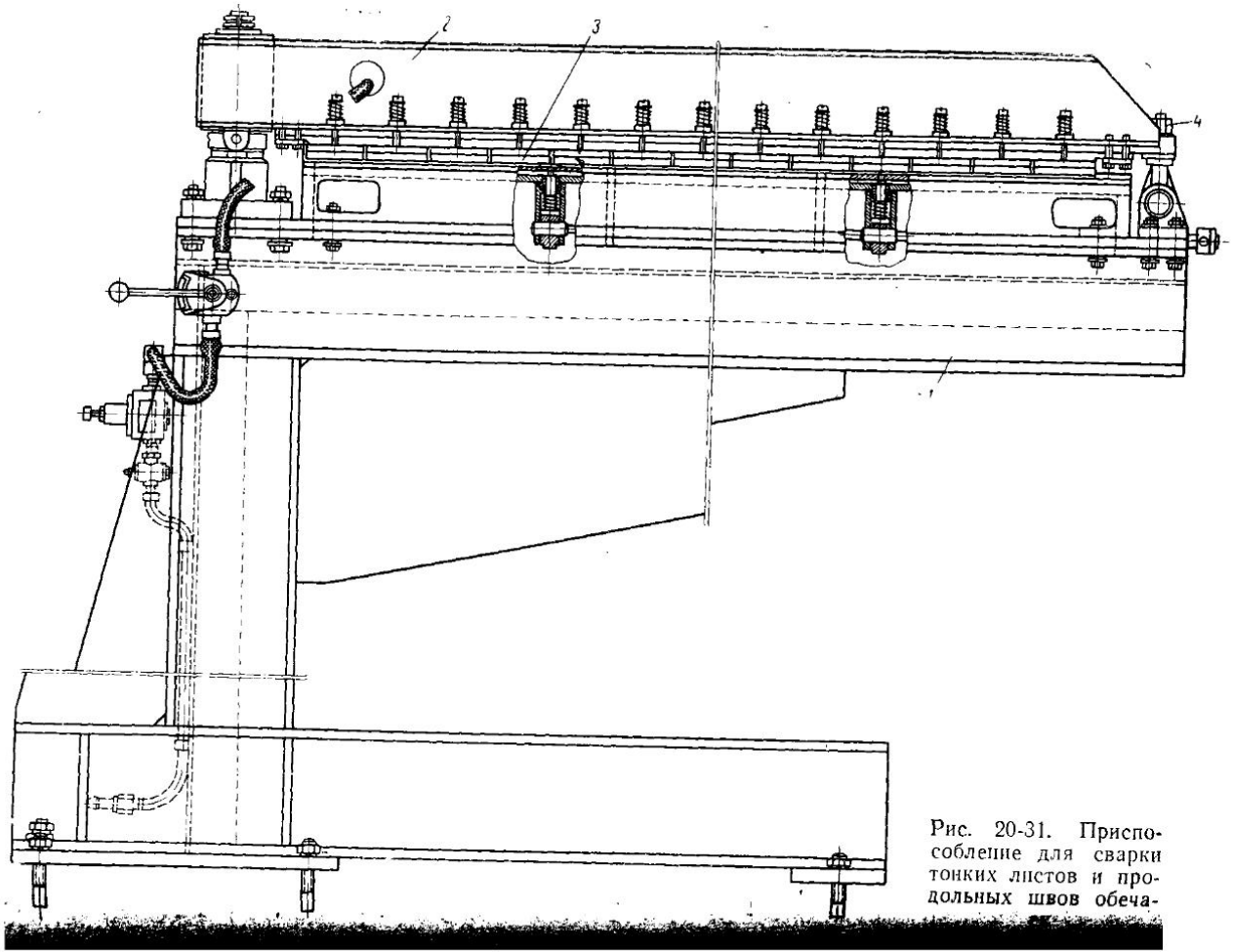


Рис. 20-31. Приспособление для сварки тонких листов и продольных швов обеча-

на рис. 20-32. Как и в случае плоских листов, эта деформация является следствием потери устойчивости под действием напряжений сжатия, уравновешивающих растянутую зону шва. Поэтому приемы исправления сварочных деформаций плоских листов прокаткой роликами в полной мере имеют отношение и к продольным швам обечаек и широко используются при их правке.

Кольцевой шов тонкостенной обечайки является одним из наиболее ответственных и трудновыполнимых соединений. Трудности заключаются в необходимости точной сборки стыкового шва и предотвращения перемещения кромок в радиальном направлении при сварке. Для этой цели сборку и сварку кольцевых стыков обычно выполняют на подкладках разжимных колец.

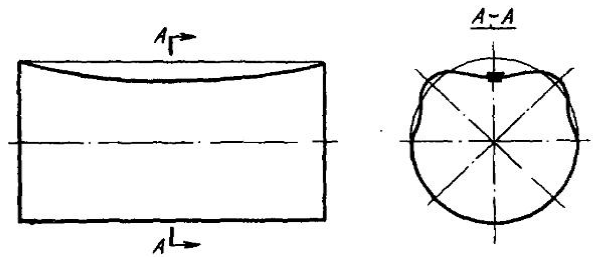


Рис. 20-32. Характер деформации обечайки от продольного шва

Такой прием имеет определенные недостатки. Подогрев кромок впереди сварочной дуги заставляет их расширяться и отходить от подкладного кольца в радиальном направлении. Так как сварка кольцевых стыков обычно выполняется без прихваток, то любое смещение электрода с оси стыка сопровождается изменением нагрева каждой из стыкуемых кромок, что вызывает различие в величине их радиальных перемещений и, следовательно, смещение друг относительно друга. При недостаточно точном совпадении периметров стыкуемых обечаек, а также при различной жесткости стыкуемых кромок (например, при сварке цилиндрической обечайки с днищем) образование таких смещений происходит еще в большей степени. В тонкостенных сосудах, работающих под давлением, смещение кромок в стыковом шве является опасным для прочности концентратором, и при изготовлении необходимо принимать меры по их предотвращению или устранению.

Для прижатия кромок можно применять наружные стяжные ленты (рис. 20-33), однако их приходится располагать на некотором расстоянии от оси стыка, и перемещения предотвращаются лишь частично. Более эффективно оказывается прижатие

кромок к подкладке роликом, перекатывающимся по поверхности стыка непосредственно перед сварочной дугой. Роль прижима сводится к тому, чтобы не дать возможности кромкам оторваться от поверхности подкладного кольца в месте образования сварного соединения. Приспособление для прижатия кромок обечаек показано на рис. 20-34, оно закреплено на консоли сварочной головки. Прижимные ролики опираются на обе свариваемые кромки, выравнивая их и прижимая к подкладному кольцу с помощью пружины.

Помимо рассмотренного приема сварки на подкладном кольце, для сварки стыка обечаек можно использовать схему, при которой стык выполняется изнутри обечайки. Такой принцип использован в установках ракетной промышленности США для сварки тонкостенных стальных обечаек, где зона кольцевого шва охватывается жестким бандажом, вращающимся при сварке вместе с изделием, а сварка первого прохода выполняется изнутри обечайки. В этом случае напряжения сжатия, возникающие в зоне нагрева, стремясь увеличить длину свободной кромки стыка, прижимают ее к наружному кольцу бандажа, исключая возможность образования смещений и вспучивания.

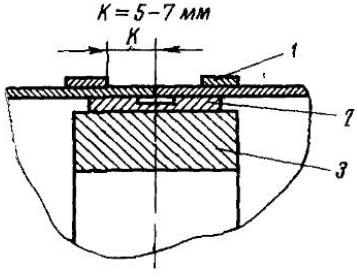


Рис. 20-33. Сборка обечаек под сварку кольцевого шва:

1 — стяжные ленты; *2* — подкладка; *3* — распорное кольцо

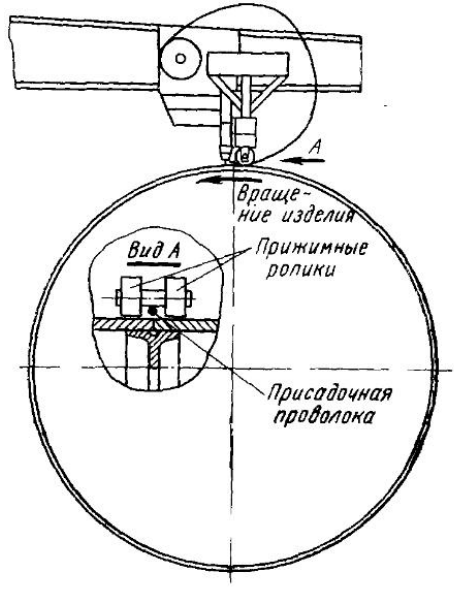


Рис. 20-34. Схема приспособления для прижатия кромок к подкладному кольцу перед сварочной головкой

Деформации от кольцевого шва для большинства материалов выражаются в виде местного уменьшения диаметра обечайки. Такое сокращение зоны шва хорошо поддается исправлению

прокаткой роликами. В противоположность этому при сварке алюминиевых сплавов диаметр обечайки в зоне кольцевого шва, выполненного на подкладном кольце, может оказаться не только не меньше, но даже больше первоначального размера. Рассмотренный выше прием прижатия кромок к подкладному кольцу роликом, расположенным перед сварочной головкой (рис. 20-34), позволяет такое увеличение диаметра при сварке стыков обечаек из алюминиевых сплавов предотвратить практически полностью.

Элементы арматуры (фланцы, штуцеры) завариваются в стенки сосудов с помощью круговых швов. Как и другие соединения тонкостенных сосудов, работающих под давлением, круговые швы выполняются встык на подкладке с канавкой. Требования к сборочно-сварочной оснастке и конструктивному оформлению стыка определяются необходимостью плотного прижатия кромок к подкладке, предотвращения их перемещений в процессе выпол-

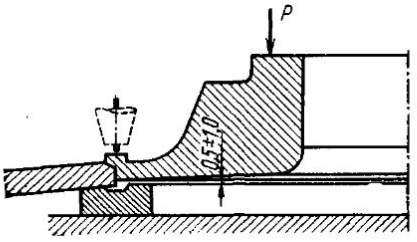


Рис. 20-35. Сборка фланца с оболочкой при наличии технологического буртика на фланце

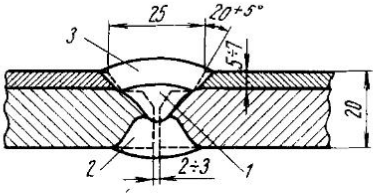


Рис. 20-36. Форма разделки и схема сварки двуслойного проката Ст. 3 и Х18Н10Т

нения кругового шва и устранения сварочных деформаций, приводящих к местному искажению формы оболочки в зоне сварного шва. В зависимости от формы поверхности стенки сосуда (сферической или цилиндрической), материала и толщины свариваемых элементов конструктивно-технологические решения могут быть различными. Так, например, при вварке фланца в сферический сосуд из алюминиевого сплава АМГ-6 целесообразно использовать соединение с буртиком, показанное на рис. 20-35. Назначение технологического буртика состоит в передаче усилия прижатия с фланца на оболочку, обеспечении их соосности и повышении жесткости кромки фланца. Использование такого буртика позволяет упростить прижимное приспособление, так как усилие прижатия прикладывается только к фланцу, и предотвратить смещение кромок в процессе сварки, а также уменьшить местные искажения формы оболочки, возникающие в результате усадки кругового шва.

При небольших размерах сосуда или того элемента, в который вваривается деталь арматуры, сварку кругового шва целесообразно осуществлять неподвижной сварочной головкой при вращении приспособления с закрепленным свариваемым стыком. При вварке арматуры в узел значительных размеров круговой шов более удобно выполнять сварочной головкой, перемещающейся непосредственно по поверхности элемента оболочки, закрепленного неподвижно.

Сосуды со стенками из листов средней толщины (до 40 *мм*) из малоуглеродистых и низколегированных сталей изготавливают преимущественно с помощью автоматической сварки под флюсом.

В химической промышленности для изготовления сосудов, работающих в агрессивных средах, из хромоникелевых и хромистых сталей, цветных металлов и их сплавов применяют автоматическую сварку под флюсом, автоматическую сварку по слою флюса полуоткрытой дугой (алюминиевые сплавы) и аргонодуговую сварку. Необходимость экономии дорогостоящих материалов заставляет расширять применение двухслойных листов.

Технология гибки, вальцовки, штамповки и механической обработки двухслойных сталей существенно не отличается от технологии обработки монолитных коррозионностойких сталей. Однако сварка двухслойных сталей имеет существенное отличие. Она должна выполняться так, чтобы не происходило одновременного плавления углеродистой стали и металла защитного слоя, из-за опасения понижения коррозионной стойкости и пластичности зоны шва. Поэтому особенностью сварки двухслойных сталей является необходимость использования не одинаковых технологических процессов и материалов для сварки основного и плакирующего слоев. Так, на рис. 20-36 показана форма разделки двухслойного проката Ст. 3 и Х18Н10Т под автоматическую сварку. Углеродистую часть шва *1* и *2* выполняют проволокой Св-08А под флюсом АН-348 за два прохода, облицовочный слой *3* также выполняют автоматом за один проход двумя проволоками ЭП-389 расщепленной дугой под флюсом АН-26. Использование автомата как для сварки основного, так и плакирующего слоя требует точной сборки и высокой культуры выполнения сварного соединения. Поэтому более часто при сварке двухслойной стали автомат используют только для основного слоя, а плакированный сваривают вручную.

Сосуды из листов средней толщины обычно имеют цилиндрическую форму. По длине сосуд составляется из нескольких обечаек и двух полусферических или эллиптических днищ. В зависимости от диаметра сосуда каждая обечайка либо вальцуется из целого листа, либо составляется из нескольких листов. В последнем случае нередко встык сваривают плоские листы и вальцовке подвергают сварную карту при расположении швов вдоль обра-

зующей. Днища сваривают из отдельных штампованных лепестков или штампуют из целого листа или сварной заготовки. В последнем случае предпочтительным является центральное (диаметральное) расположение швов, так как при этом соблюдается осесимметричное распределение напряжений и деформаций при штамповке, способствующее получению наиболее качественной формы днища.

Сборку и сварку цилиндрической части сосуда производят на роликовом стенде. Продольный стык обечайки собирают на прихватках с помощью простейших стяжных приспособлений, как показано на рис. 20-37 или с помощью стяжных струбцин (рис. 20-38). Сборка кольцевого стыка между обечайками является более трудоемкой

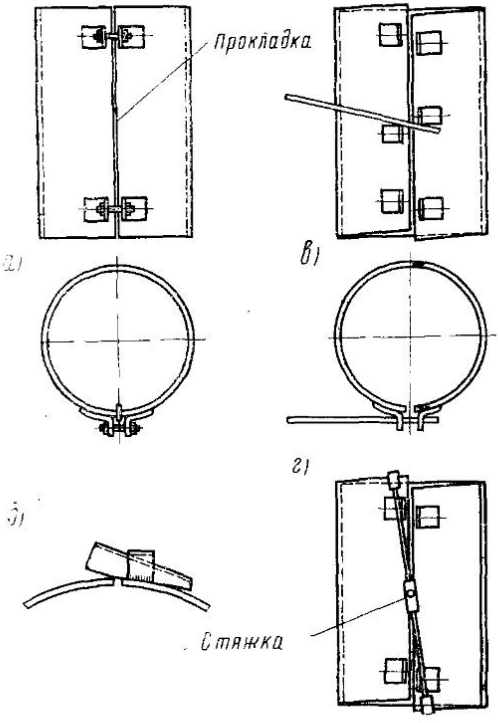


Рис. 20-37. Приемы сборки продольного стыка обечайки:

а) при правильной вальцовке; *б)* при поперечном смещении кромок; *в), г)* при продольном смещении кромок

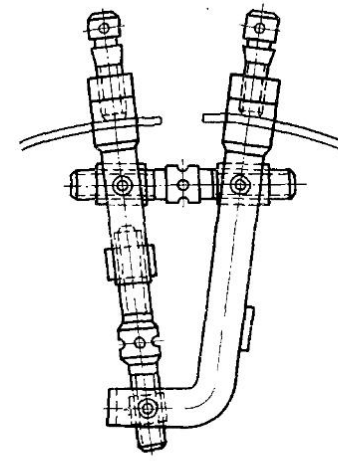


Рис. 20-38. Стяжная струбцина

операцией. Для ее механизации роликовый стенд можно оборудовать, как показано на рис. 20-39. Установленная на тележке *4* скоба *1* передвигается вдоль стенда по рельсовому пути *10*. Последовательность операций при сборке в этом случае следующая. На роликовый стенд краном подают две обечайки. Скобу

продвигают так, чтобы опора *6* гидроцилиндра *7* оказалась посередине собираемого стыка, и закрепляют на первой обечайке включением гидроцилиндра *9*. После того, как торцовый гидроцилиндр *5*, сдвигая вторую обечайку к первой, установит требуемый зазор в стыке, гидроцилиндром *7* выравнивают кромки и ставят прихватку. Поворот собираемых обечаек на некоторый угол для постановки других прихваток требует не только отвода прижимов гидродомкратов *9* и *7*, но и опор *8* и *6*. Последнее осуществляется путем небольшого поворота скобы *1* вокруг оси *2* под действием штока поршня гидроцилиндра *7*. Первоначально шток *12* движется вниз при неподвижном цилиндре, но, встретив неподвижную регулируемую опору *13*, поднимает цилиндр, поворачивая скобу *1*. Дальнейшая сборка стыка осуществляется движениями гидроцилиндра *7* и поворотом роликового стенда *11*, тогда как гидроцилиндры *5* и *9* используются лишь по мере надобности для устранения зазоров в стыке обечаек. После завершения сборки стыка скоба *1* отводится, на ее место устанавливается следующая обечайка, и операции повторяются в той же последовательности. Регулировка положения скобы *1* по высоте для сборки обечаек сосудов разных диаметров осуществляется с помощью вертикального винта *3* и конических шестерен.

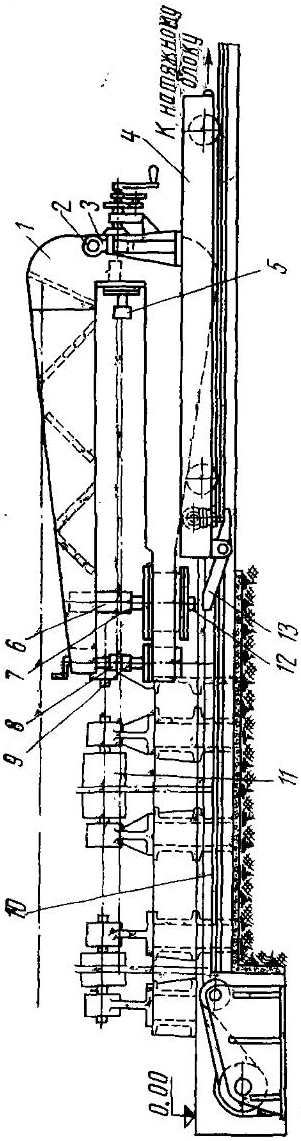


Рис. 20-39. Установка для механизированной сборки кольцевых стыков корпусов цилиндрических сосудов

Сварка продольных и кольцевых швов сосудов со средней толщиной стенки выполняется, как правило, с двух сторон. Выполнение первого слоя на весу требует тщательной сборки и ограничения величины зазора по всей длине шва. Поэтому роликовые стенды обычно оборудуют флюсовыми подушками, позволяющи-

ми производить сварку первого слоя шва без ограничения величины зазора в стыке. Такие флюсовые подушки удобно монтировать на тележках, предусматривая между роликами стенда рельсовый путь для их передвижения к свариваемому стыку.

Флюсовая подушка для продольных швов (рис. 20-40) представляет собой жесткий короб *3*, закрепленный на тележке *1*. Телескопическое устройство пневмоцилиндров *2* обеспечивает поднятие короба *3* до упора в изделие. Плотное прижатие флюса к стыку создается подачей сжатого воздуха в шланг *4*. Поджатие флюса при сварке кольцевых швов осуществляется иначе.

На рис. 20-41 показана схема подушки ременного типа. Движение ремня и подача флюса к месту горения дуги происходит вследствие сил трения, возникающих при вращении изделия.

Другая конструкция флюсовой подушки для кольцевых швов представлена на рис. 20-42. При подаче воздуха в пневмоцилиндр *4* диск флюсовой подушки *3* поднимается вверх до упора в изделие, а сам цилиндр, благодаря пружинной подвеске, опускается вниз и упирается траверсой *7* в рельсы, фиксируя положение тележки *1*. При вращении изделие увлекает за собой диск *3* с ложементом *5* и, поворачивая его вокруг наклонной оси *2*, заставляет флюс, находящийся в резиновой камере *6*, прижиматься к стыку.

После выполнения первого слоя шва изнутри обечайки на флюсовой подушке второй слой

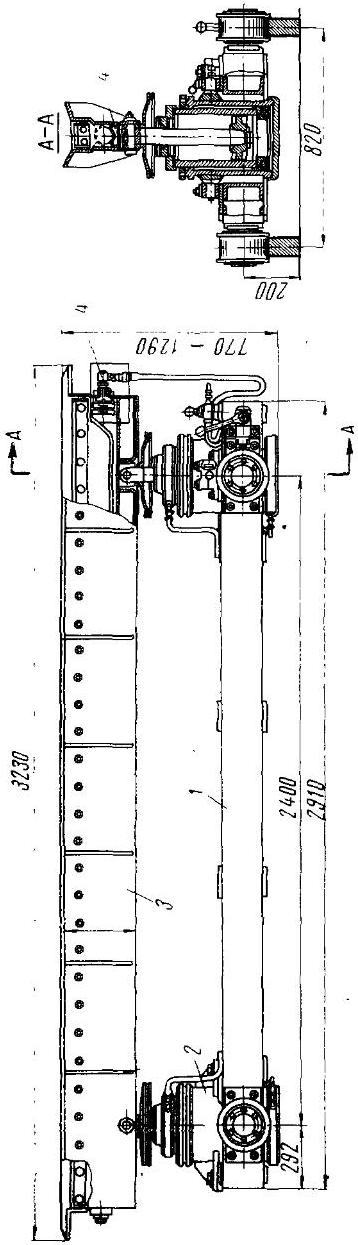


Рис. 20-40. Флюсовая подушка для сварки продольных швов

сваривается снаружи по ранее уложенному первому, обеспечивая полное проплавление всей толщины стенки. При толщине стенки сосуда более 25 *мм* автоматическая сварка под флюсом обычно выполняется в несколько слоев.

При серийном изготовлении сосудов днища часто выполняют штамповкой целиком, причем листовая заготовка может быть

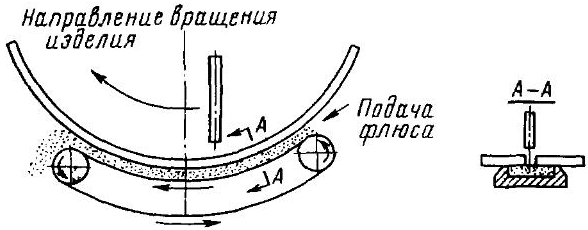


Рис. 20-41. Схема флюсоременной подушки — для сварки кольцевых швов

сварной. В мелкосерийном и индивидуальном производстве днища обычно собирают и сваривают из отдельных штампованных элементов. Такое изготовление полусферических днищ схематически показано на рис. 20-43.

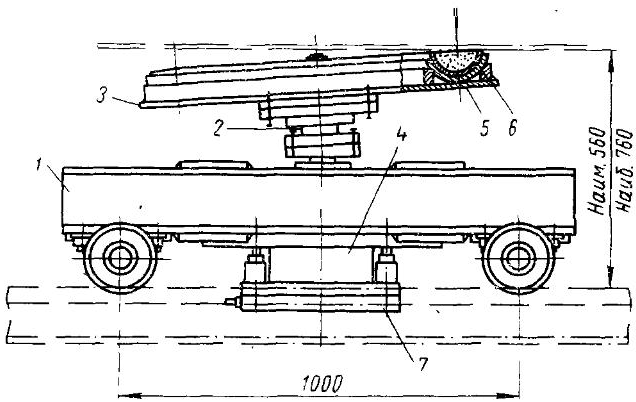


Рис. 20-42. Флюсовая подушка с эластичным лотком для сварки кольцевых швов

На сборочном стенде-кондукторе *I* прихватывают и подваривают вручную с наружной стороны меридиональные швы для автоматической сварки. После установки и прихватки центрального листа собранное днище переворачивают, подают на стенд *II* и на него устанавливают второе полусферическое днище для

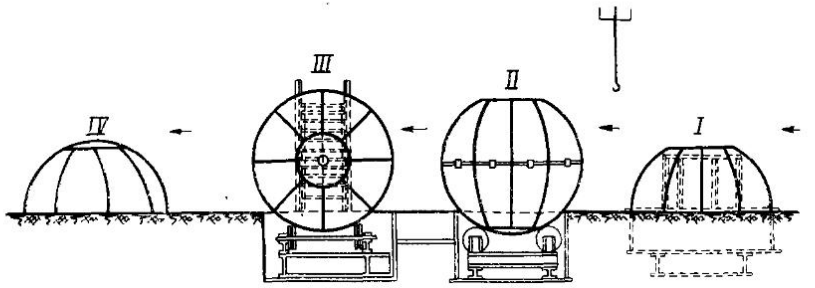


Рис. 20-43. Схема технологического процесса сборки и сварки полусферических днищ

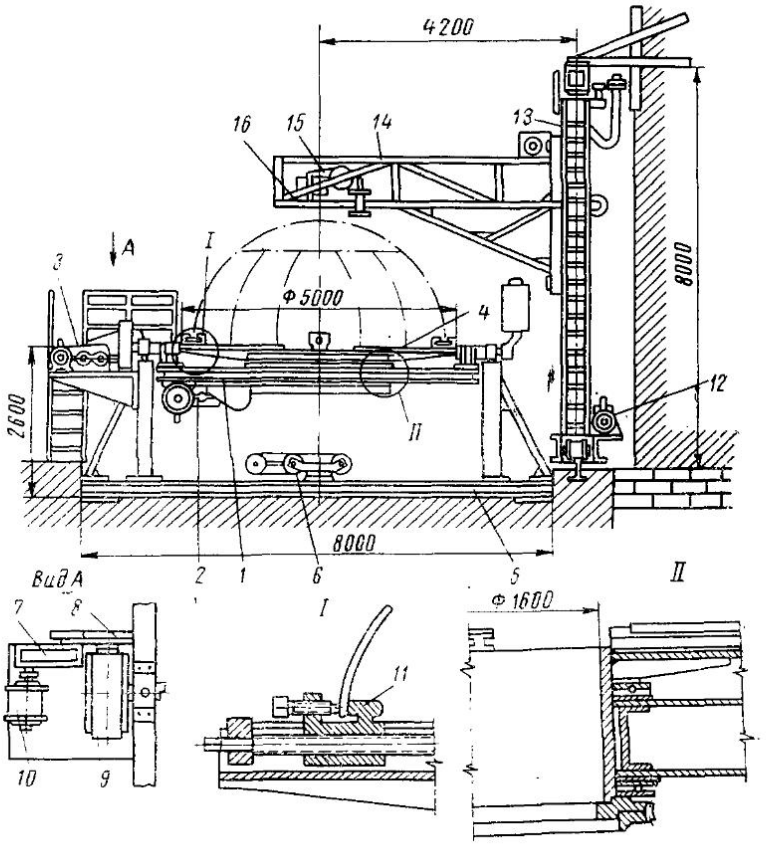


Рис. 20-44. Установка для автоматической сварки полусферических днищ

спаривания с первым в полную сферу, причем меридиональные швы обоих днищ совмещаются, а соединение днищ осуществляется коротышами. Собранный шар переносят на кантователь *III* и производят автоматическую сварку меридиональных швов трактором сначала внутри сферы, затем снаружи. По окончании сварки коротыши сбивают, разъединяя шар на два днища.

Установка, показанная на рис. 20-44, предназначена для автоматической сварки шаровых днищ и позволяет избежать ручной подварки. Манипулятор установки состоит из поворотной рамы *1*, планшайбы *4* и опорной рамы со стойками *5*. Манипулятор обеспечивает вращение днища относительно двух взаимно перпендикулярных осей. При сварке швов, соединяющих лепестки днища, стол манипулятора вращается вокруг горизонтальной оси с помощью механизма привода рамы *3*.

Сварка швов, соединяющих лепестки со сферическим сегментом, производится при вращении планшайбы вокруг вертикальной оси от привода *2*. Механизм привода рамы состоит из электродвигателя *10*, редуктора *7*, пары сменных шестерен *8* и червячного редуктора *9*. Так же устроен механизм привода планшайбы. Собранное на прихватках днище устанавливают в зажимах *11*, после чего производят сварку первого шва с внутренней стороны на флюсовой подушке *6*, причем трактор заводится внутрь полусферы через отверстие в поворотной раме манипулятора (выносной элемент *II*). После сварки внутренних швов к манипулятору подводят велосипедную тележку и производят сварку наружных швов. Положения днища при сварке внутренних и наружных швов показаны на рис. 20-45, *а, б*.

Велосипедная тележка состоит из передвижной колонны *13* (см. рис. 20-44), снабженной электроприводом *12*, и подвижной площадки *14* с направляющими *16*, на которых установлен сварочный трактор *15*.

При сборке цилиндрических обечаек с днищами целесообразно использовать центрирующие устройства; сварка этих кольцевых стыков выполняется так же, как и стыков между обечайками.

В некоторых случаях емкости имеют эллиптическую или овальную форму поперечного сечения (бензовозы, автоцистерны для перевозки молока и т. п.). При выполнении стыков обечаек с днищами автоматической сваркой под флюсом вращение сосуда необходимо осуществлять так, чтобы скорость сварки была постоянной, и в зоне горения дуги шов располагался горизонтально. Станок, схема которого показана на рис. 20-46, удовлетворяет этим требованиям. Копирный диск *8* имеет две беговые дорожки: наружную, по которой катится ведущий ролик приводного механизма *4*, и внутреннюю — для опорного холостого ролика *6*. Под действием пружинящего упора *7* копирный диск *8* оказывается зажатым между ведущим и опорным роликами *4* и *6*,

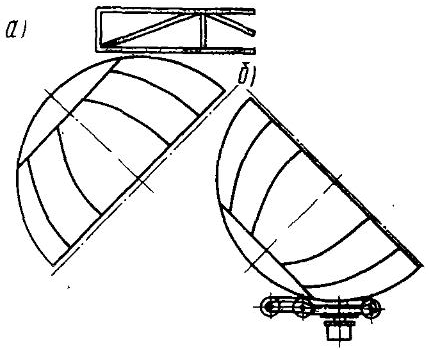
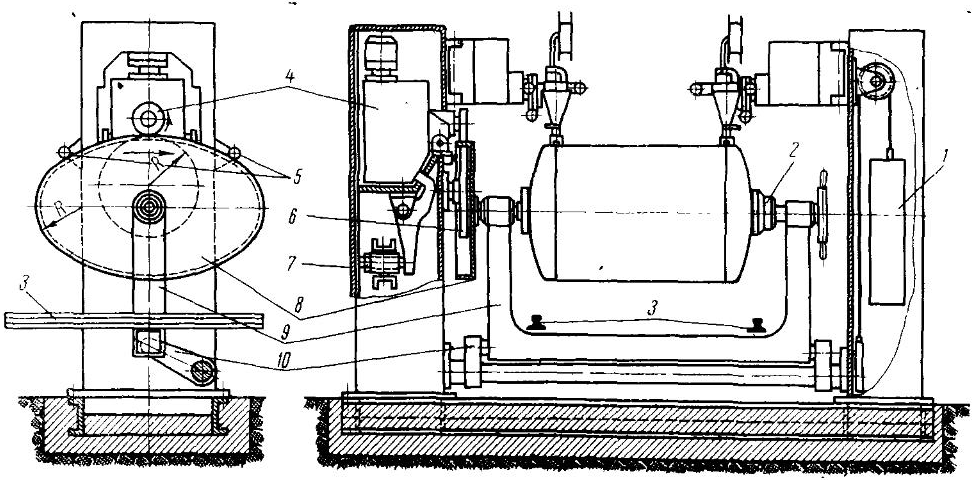


Рис. 20-45. Положение днища при сварке швов:
а) наружного; *б)* внутреннего

Рис. 20-46. Схема станка для автоматической сварки овальных сосудов



а его крайние положения ограничиваются холостыми роликами *5*. Наружная беговая дорожка копирного диска *8* представляет собой замкнутый овал, равный овалу изделия. Цистерна, предварительно собранная на прихватках, подается на станок тележкой по рельсам *3* и закрепляется в плавающей скобе *9* зажимным центрирующим приспособлением *2*, жестко связанным с копирным диском. Вес изделия уравновешивается противовесом *1* с помощью поджимных рычагов *10*. Наличие двух сварочных головок позволяет одновременно выполнять сварку обоих швов.

В серийном производстве сосудов используются поточные методы производства. Примером может служить изготовление котлов железнодорожных цистерн емкостью 60 $м^3$ из стали Ст. 3 на Ждановском заводе тяжелого машиностроения. Поточная линия имеет два участка: изготовления полотнищ и сборки, сварки и испытания цистерн. Цилиндрическая часть цистерны составляется из четырех листов 9280×1680×9 *мм* и одного листа 9280×2100×11 *мм*.

На первом участке линии после правки в многовалковых вальцах листы собираются в пакеты толщиной до 150 *мм*. Продольные кромки пакетов обрабатываются на кромкострогальном станке, поперечные кромки — на специальном стенде, где они обрезаются огневой резкой и фрезеруются. Затем листы раскладываются на сборочном стенде, и стыковые швы полотнища собираются на прихватках с постановкой заходных и выходных планок. Собранное полотнище приподнимается системой роликов и транспортирующим устройством *2* подается на стенд для сварки (рис. 20-47). С помощью клиновых устройств *8* ролики *1*, расположенные на рамках *3* и *7*, опускаются, и полотнище собранными стыками ложится на пневматические флюсовые подушки *4*. Прижатие кромок обеспечивается пневматическими цилиндрами *5*, расположенными на двух поперечных балках порталов *6*. Эти же балки *6* служат направляющими для движения четырех сварочных головок типа АБС, предназначенных для одновременной сварки всех швов полотнища. По окончании сварки ролики *1* вновь поднимаются, полотнище передается на кантователь кассетного типа, поворачивается на 180° и подается на стенд для сварки с другой стороны. Этот стенд также оборудован четырьмя головками АБС, но на нем отсутствуют пневмоприжимы и флюсовые подушки, так как сварка ведется по основному подварочному шву первой стороны. Далее полотнище передается рольгангом в трехвалковые десятиметровые гибочные вальцы, где вальцуется вдоль швов в обечайку диаметром 2800 *мм* без предварительной подгибки кромок. Свальцованная обечайка мостовым краном переносится в сборочный стапель. Кромки продольного стыка выравнивают, стягивают и прихватывают с постановкой технологических планок для вывода начала и конца шва.

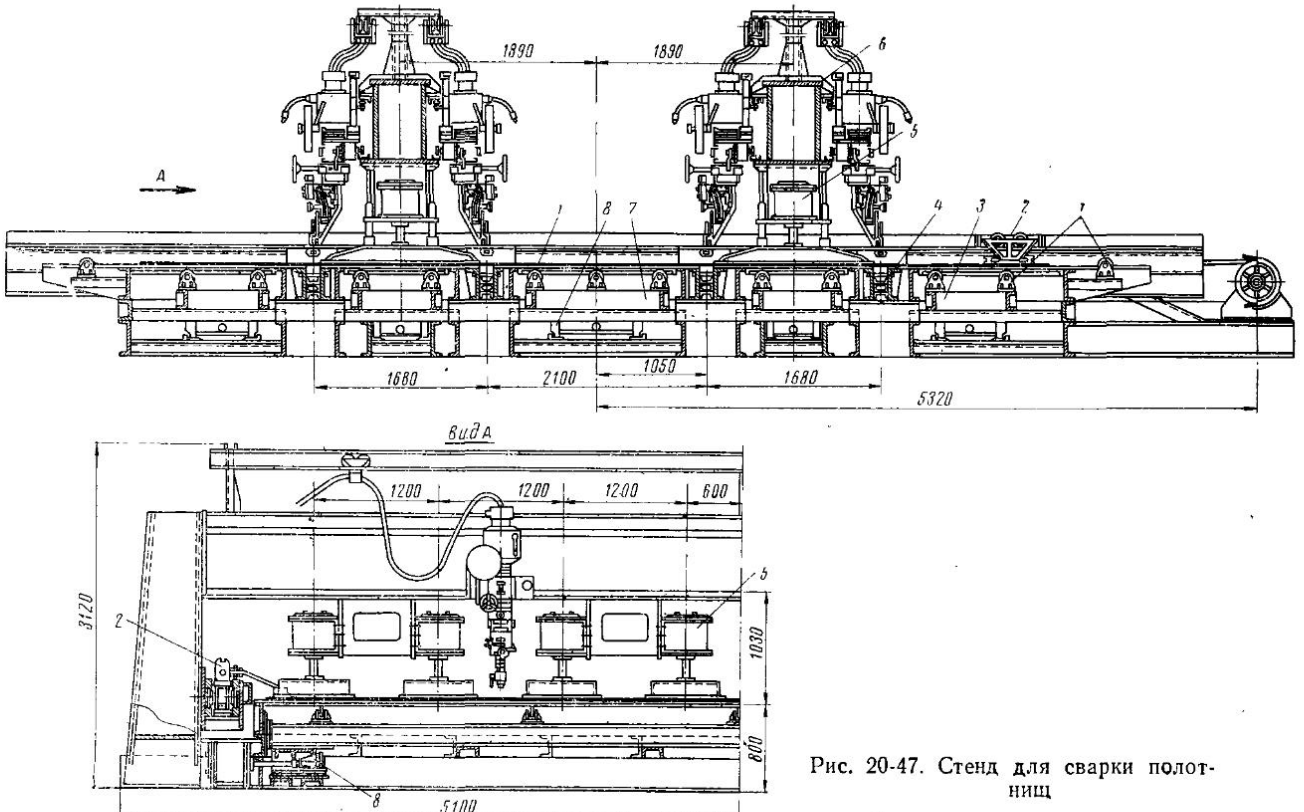


Рис. 20-47. Стенд для сварки полотнищ

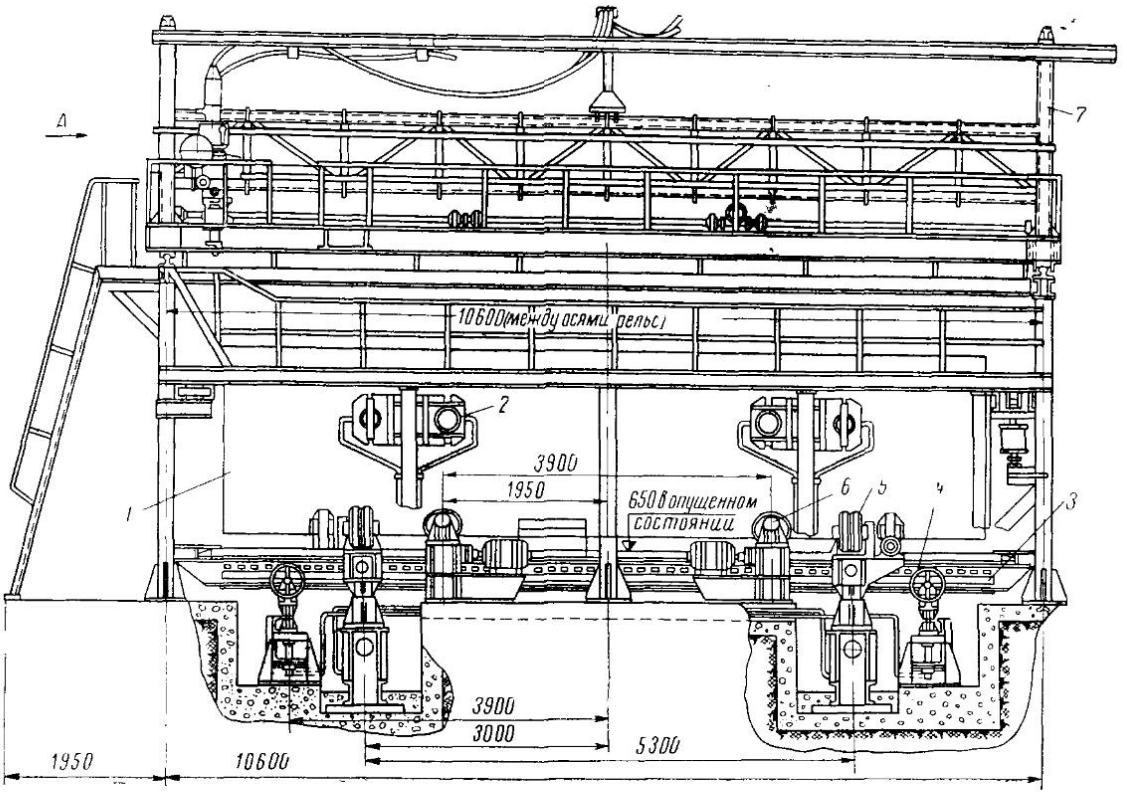


Рис. 20-48. Стенд для сварки замыкающего стыка обечайки цистерны:
а) продольный разрез; *б)* вид по стрелке *А*

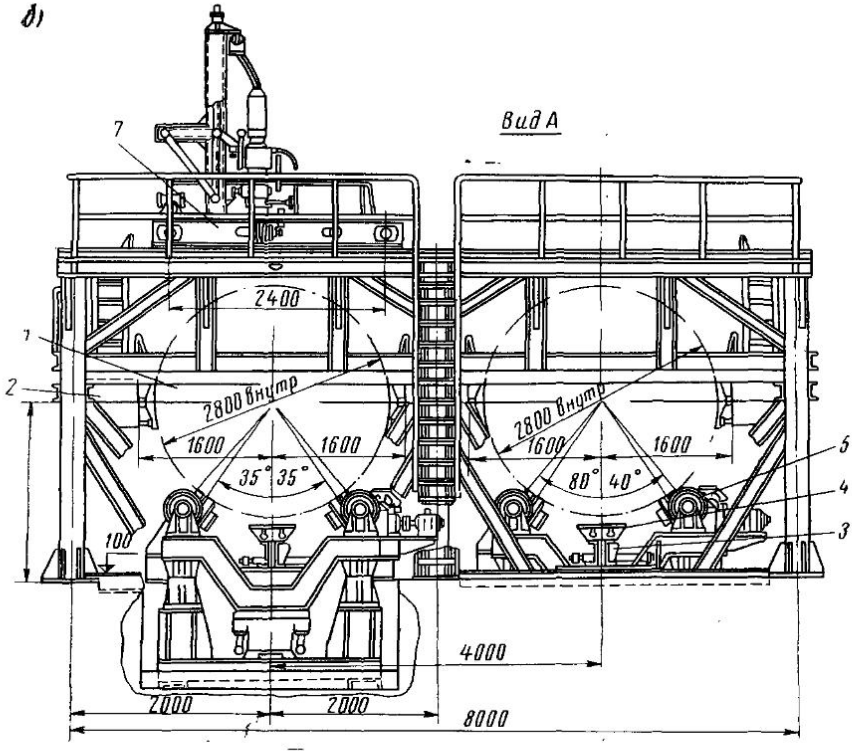


Рис. 20-48. (Продолжение)

Правильная форма обеспечивается последующей калибровкой собранной и сваренной обечайки в гибочных вальцах, расположенных на участке изготовления котла цистерны.

В установку для сварки замыкающего шва обечайка *1* подается краном и с помощью роликоопор *5* (рис. 20-48) разворачивается так, чтобы замыкающий стык оказался в нижнем положении. После зажатия обечайки пневмоцилиндрами *2* снизу к стыку подъемной балкой *3* прижимается флюсовая подушка *4*. Сварка внутреннего шва осуществляется трактором, перемещающимся по направляющим, вводимым внутрь обечайки. Затем обечайка освобождается от зажатия, разворачивается стыком вверх и наружный шов выполняется сварочной головкой АБС, перемещающейся по катучей балке *7*. После завершения сварки ролики *5* опускаются, и рольгангом *6* обечайка выдается из установки. Ее прием и подача на калибровочные вальцы производится передаточной тележкой, перемещающейся поперек пролета. Этой же тележкой откалиброванная обечайка передается

на одну из двух ниток конвейера поточной линии изготовления котла. На каждом рабочем месте обечайка с помощью подъемных поперечных роликоопор поднимается над роликами конвейера и может поворачиваться ими в соответствии с технологическим процессом рабочего места. После завершения операции обечайка опускается на роликовый конвейер и перемещается им на следующее рабочее место.

На первой позиции конвейера производится подготовка обечайки под сборку с днищем: зачищаются места прихватки технологических планок, вырезаются и зачищаются отверстия люков, сливного прибора и предохранительного клапана. Затем обечайка по рольгангу передается на второе рабочее место — установку для сборки обечайки с днищем. Эта установка (рис. 20-49) состоит из двух центраторов *2*, связанных продольной балкой, и двух откидных консольных рабочих площадок *1*. Каждый центратор оборудован 26 радиальными пневмоцилиндрами *4*, четырьмя торцовыми откидными винтовыми прижимами *5* и двумя винтовыми домкратами *3*. Внутрь центраторов обечайка заводится рольгангом. Днище штампуется из сварной листовой заготовки и поступает на сборку стыкового соединения с обечайкой после обрезки кромок. Для подачи днища используют специальный захват *1*, показанный на рис. 20-50. С помощью серьги *2* днище краном в вертикальном положении подводят к обечайке, расположенной в центраторе и первоначально закрепляют винтовыми торцовыми прижимами *5* (см. рис. 20-49). Затем посекционным включением радиальных пневматических цилиндров *4* производят выравнивание кромок кольцевого стыка и его прихватку. При необходимости используют винтовые домкраты *3*.

Следующее рабочее место — стенд для сварки внутренних кольцевых швов, оборудованный двумя флюсоременными подушками. Сварка осуществляется сварочным трактором ТС-18, который позволяет выполнять швы при ограниченной длине отбортованного участка днища. Изготовление цилиндрической части котла завершается на стенде для сварки наружных швов. Этот стенд укомплектован двумя поворотными консолями, несущими по одной сварочной головке АБС, откидными и постоянными площадками для удобства обслуживания сварочных головок.

При изготовлении толстостенных сосудов (толщина свыше 40—60 *мм*) наиболее эффективным оказывается способ электрошлаковой сварки. Этот способ позволяет получить надежное проплавление всего сечения любой толщины за один проход, тогда как при сварке под флюсом для выполнения такой задачи требуется специальная разделка кромок и определенная последовательность укладки многослойного шва. Так, например, при выполнении продольных швов толщиной 90 *мм* многослойной сваркой применяют разделку, показанную на

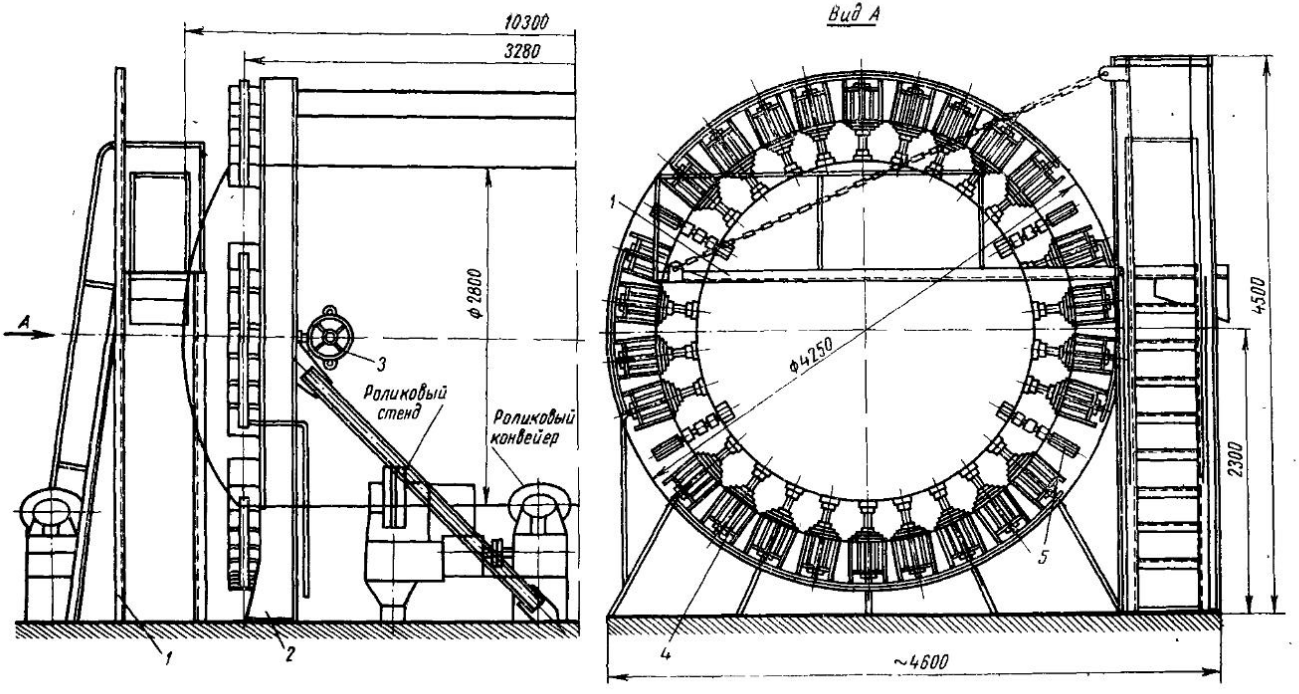


Рис. 20-49. Установка для сборки днищ с обечайкой

рис. 20-51, *а*. После автоматической сварки внутреннего подварочного шва (рис. 20-51, *б*) обечайка снова устанавливается на станок, разделка с внешней стороны углубляется, и только после этого производится ее многослойное заполнение. Сборка кольцевых швов получается менее точной, чем продольных. Поэтому полное проплавление часто обеспечивается тем, что сначала

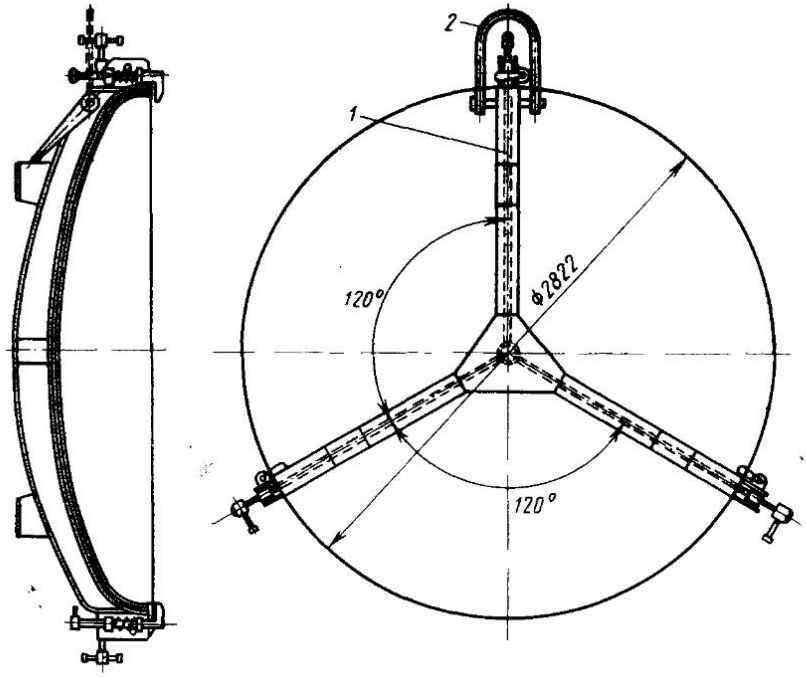


Рис. 20-50. Захват для удержания днища

укладывают в разделку с внешней стороны (рис. 20-52) несколько слоев подварочного шва *1* вручную, затем пневматическим зубилом или с помощью резака зачищается корень шва, вручную выполняется внутренний подварочный шов *2*, и только после этого производится многослойное заполнение внешней разделки *3*.

Преимущества электрошлакового способа сварки листов большой толщины особенно проявляются при выполнении прямолинейных швов. Поэтому продольные швы толстостенных обечаек выполняются, как правило, электрошлаковой сваркой. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании цилиндрической части сосуда и выборе приема формирования обечаек.

Листовую заготовку можно гнуть либо вдоль длинной, либо вдоль короткой кромки листа. В первом случае обечайка получается длинной и этим сокращается количество кольцевых швов в сосуде. Однако для сосудов большого диаметра длина короткой кромки листа оказывается меньше периметра поперечного сечения и приходится обечайку составлять из двух корыт двумя продольными швами. Во втором случае обечайка получается

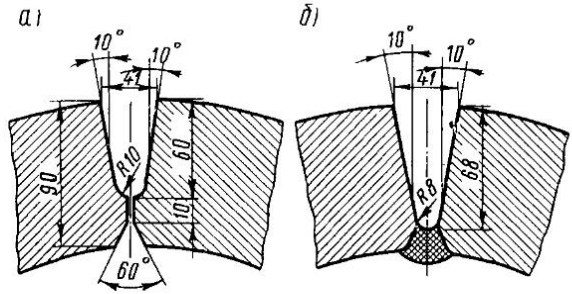


Рис. 20-51. Форма разделки продольного стыка обечайки под многослойную сварку:

а) предварительная разделка стыка; *б)* окончательная разделка после подварки

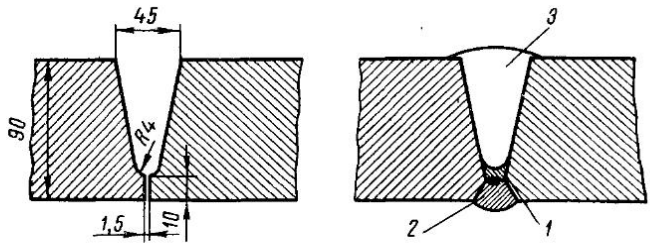


Рис. 20-52. Форма разделки кольцевого стыка под многослойную сварку

более короткой, но с одним продольным швом. Второй прием представляется менее целесообразным, так как кольцевые швы более трудоемки, по сравнению с продольными.

В условиях производства используют один из этих приемов в зависимости от имеющегося в наличии оборудования для гибки толстолистового металла. Так, обечайку с одним продольным швом можно получить вальцовкой. Лист после обрезки нагревают в печи до 1000 ÷ 1050° С и вальцуют до замыкания стыка, оставляя недовальцованными плоские участки шириной 100— 150 *мм* (рис. 20-53). После остывания обечайки стык

закрепляется приваркой скоб, и огневой резкой вырезают зазор шириной 26÷28 *мм*. Необходимую величину зазора можно обеспечить также при раскрое листов, для чего у заготовок по краям оставляют фигурные выступы *1* и *2* (рис. 20-54). Эти выступы при вальцевании не позволяют кромкам войти в соприкосновение; после установки скоб их срезают. Методом вальцовки трудно получить обечайки длиной более 3500 *мм* и толщиной более 100 *мм*, тогда как штамповка на мощном прессе таких огра-

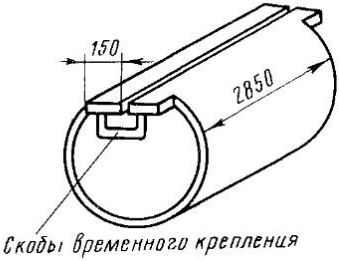


Рис. 20-53. Свальцованная обечанка с одним продольным стыком

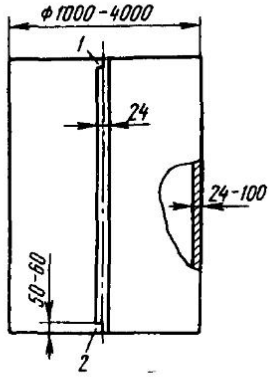


Рис. 20-54. Технологические выступы (*1* и *2*) у вальцуемых обечаек

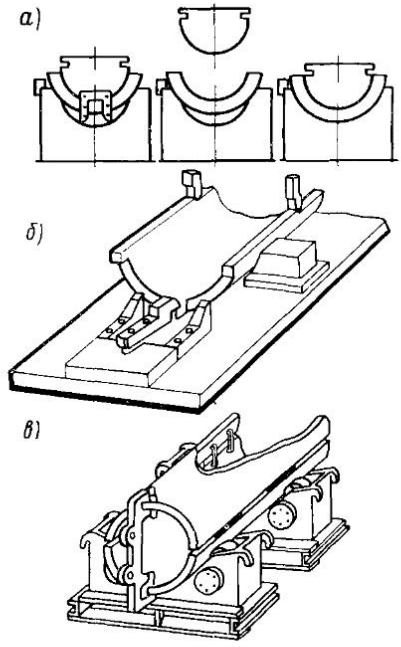


Рис. 20-55. Заготовка элементов и сборка обечайки с двумя продольными стыками

ничений не имеет. На рис. 20-55 показаны операции другой технологии, когда обечайка образуется из двух корыт гибкой в горячем состоянии на прессе (рис. 20-55, *а*) с последующей строжкой кромок на станке (рис. 20-55, *б*) или кислородной резкой. Сборка обечайки (рис. 20-55, *в*) выполняется с помощью скоб, постоянство зазора в стыке достигается постановкой прокладок, удаляемых перед сваркой.

После приварки выходных планок и кармана для наведения шлаковой ванны собранную под сварку обечайку устанавливают вертикально. Установка для одновременной сварки двух продольных швов показана на рис. 20-56. Фермы *3*, несущие направляющие рейки *6* сварочных аппаратов *7*, кабины лифтов *2* и подъемные краны *1* смонтированы на самоходных тележках *4*. Вертикальное перемещение лифта с оператором осуществляется лебедкой *8*. Свариваемая обечайка устанавливается на тумбу *5*, выравнивается клиньями и закрепляется натяжными устройствами *9*.

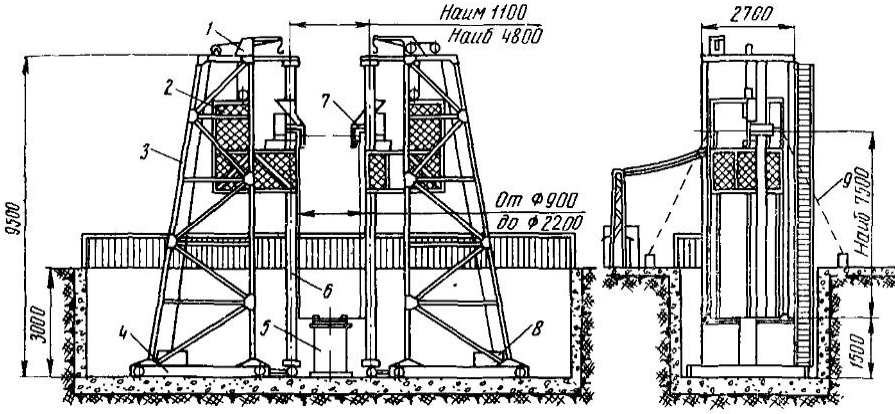


Рис. 20-56. Установка для электрошлаковой сварки продольных швов

Ввиду возможной местной депланации кромок продольные швы целесообразно выполнять с использованием шарнирных ползунов.

При сварке гнутых под прессом корыт можно получить обечайки достаточно правильной цилиндрической формы, их последующая калибровка не обязательна. Напротив, обечайки, получаемые вальцовкой, требуют правки. При предварительном нагреве обечайки до температуры 1000÷1050° С и охлаждении ее на воздухе во время калибровки в гибочных вальцах этот процесс используют одновременно для нормализации.

При электрошлаковой сварке кольцевых швов необходима точная сборка, так как местная депланация криволинейных кромок стыка свыше 3 *мм* может привести к нарушению уплотнения и вытеканию шлаковой ванны. Поэтому сборке обычно предшествует проточка внешней и внутренней поверхностей каждой из обечаек на ширину 70—100 *мм* от торца (рис. 20-57). Так же осуществляют подготовку стыка обечайки с днищем. Собирают стык с помощью планок, которые устанавливают «на ребро» поперек кольцевого шва и приваривают к поверхности обечаек.

Если в качестве внутреннего формирующего устройства используют медные охлаждаемые подкладки, изогнутые по радиусу свариваемого изделия, то внутри обечайки дополнительно устанавливаются скобы временного крепления. Подкладки *1* (рис. 20-58) заводят в отверстия скоб *2* и закрепляют клиньями *3* или винтовыми прижимами. Внутренний ползун *1* (рис. 20-59) применяют тогда, когда форма изделия допускает установку штанги *3* и люнета *2*, в этом случае внутренних скоб не ставят. При сварке закрытых сосудов с малыми размерами лазовых отверстий и при расположении стыка на большом расстоянии от торца изделия установка обратного ползуна затруднительна.

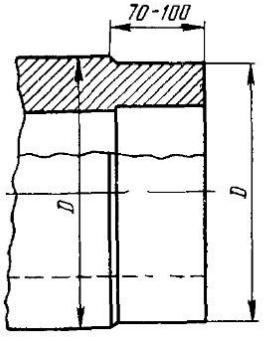


Рис. 20-57. Обработка торцов обечайки

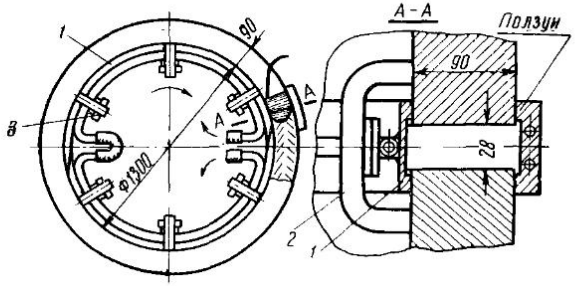


Рис. 20-58. Кольцевой стык, собранный под электрошлаковую сварку

Техника выполнения электрошлаковой сварки кольцевого шва своеобразна. Сварку начинают на вспомогательной пластинке, вваренной в зазоре стыка (рис. 20-60, *а*). После заварки примерно полуокружности стыка участок с началом шва появляется на другой стороне кантователя (рис. 20-60, *б*); сварщик резаком удаляет из зазора начало шва до полного устранения непровара и придает торцу шва наклонный срез, облегчающий выполнение замыкания шва (замка) (рис. 20-60, *в*). Усадочную раковину либо выводят в специальный прилив в наружном ползуне или в медный кокиль, либо выплавляют и заваривают вручную.

Установка для сварки кольцевых швов показана на рис. 20-61. Несущая конструкция представляет собой портал *1*, передвигающийся по рельсовому пути вдоль роликового стенда *2* от шва к шву. Настройка на сварку кольцевого шва обечайки определенного диаметра производится перемещением относительно портала *1* тележки *6*, несущей колонну *4* со сварочным аппаратом *3*. Перемещение тележки осуществляется приводом *5*, а закрепление — тормозом.

После завершения сварки корпуса сосуда вырезку отверстий для вварных штуцеров производят или механическим путем на радиально-сверлильных станках, или с помощью огневой резки. Особенно большой объем таких работ имеет место при изготовлении барабанов котлов и коллекторов. В целях

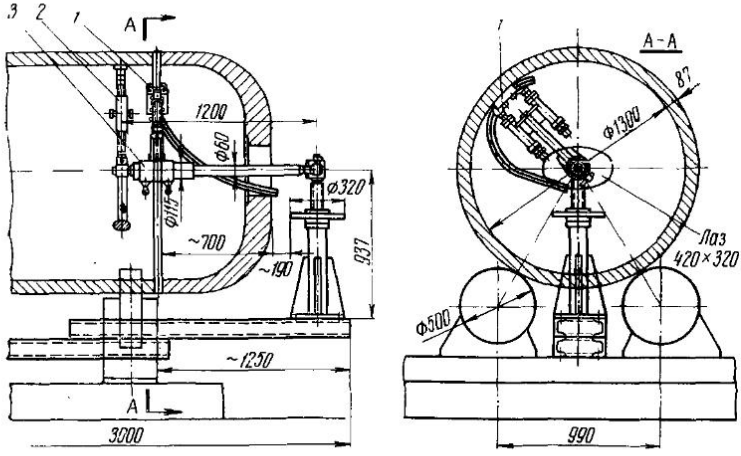


Рис. 20-59. Сварка сосуда с применением внутреннего ползуна

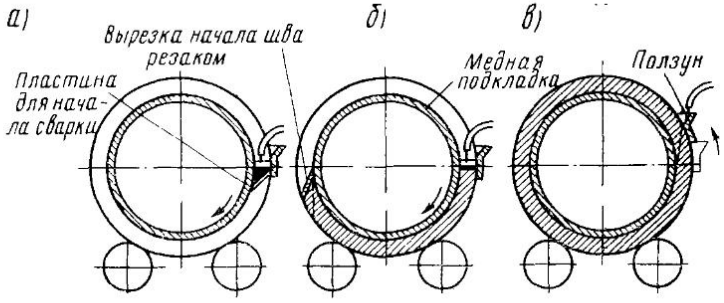


Рис. 20-60. Схема электрошлаковой сварки кольцевых швов

сокращения подгоночных работ на монтаже при сборке коллекторов и барабанов с блоками экранных труб к точности установки штуцеров предъявляют жесткие требования. Приварка большого числа штуцеров является работой массовой и ее автоматизация весьма целесообразна. Применяемые для этой цели специализированные автоматы и полуавтоматы обычно центрируются по верхней части самого свариваемого штуцера.

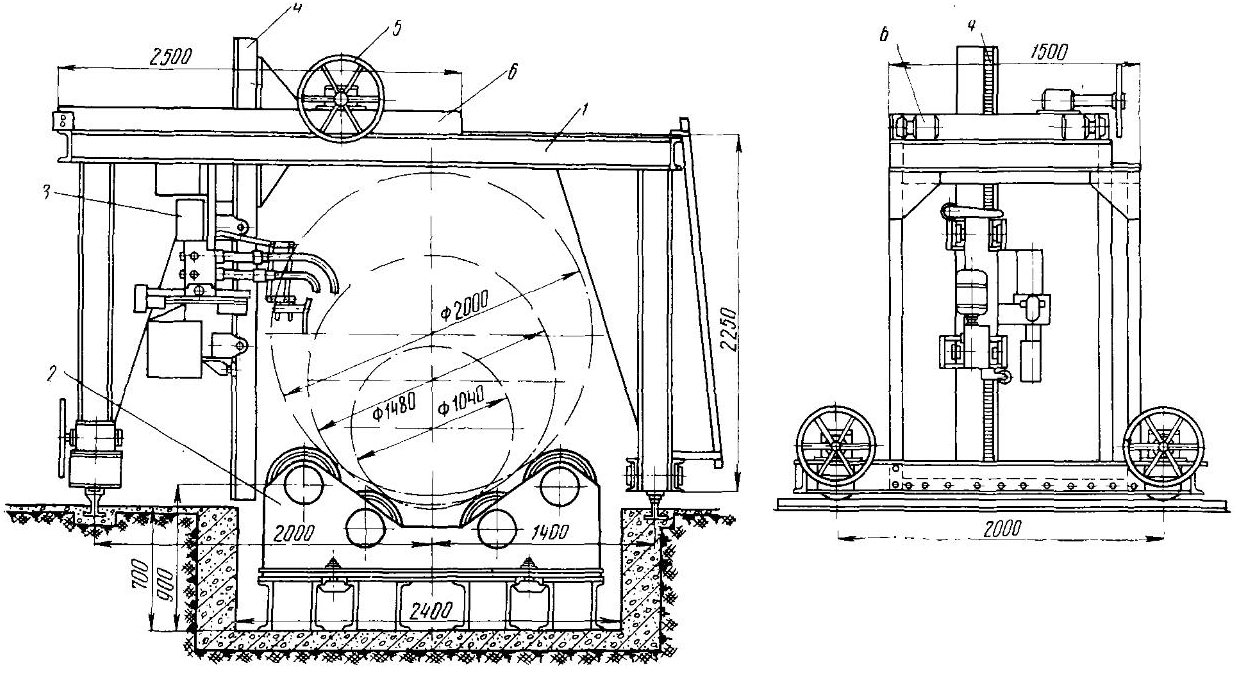


Рис. 20-61. Установка для электрошлаковой сварки кольцевых швов

При изготовлении барабанов котлов, сосудов высокого давления и реакторов большое значение придают вопросам термообработки. Согласно правилам котлонадзора 1950 г. обязательной последующей термической обработке подлежат барабаны, изготовленные из углеродистой стали со стенками толщиной более 25 *мм* и из легированной стали со стенками толщиной более 10 *мм*. Толстостенные котельные барабаны и сосуды в процессе изготовления подвергаются термообработке, по крайней мере, дважды. Так, нагрев под калибровку после сварки цилиндрической части обычно используется для нормализации. Окончательная термообработка полностью сваренного сосуда часто ограничивается высоким отпуском. Это делается из опасения, что при нагреве до более высоких температур могут развиваться деформации от собственного веса. Однако при приварке днищ электрошлаковой сваркой иногда требуют нормализации для улучшения структуры зоны шва. В этом случае предотвратить деформирование от собственного веса при нагреве до температуры нормализации (900—1000° С) можно путем предварительной герметизации готового сосуда и создания в нем избыточного внутреннего давления CO_2 в 2÷3 *ат*. Такое мероприятие не только сохраняет форму сосуда, но и предотвращает образование окалины на его внутренней поверхности.

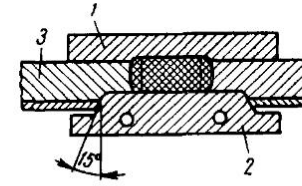


Рис. 20-62. Схема электрошлаковой сварки двухслойной стали:

1 — наружный водоохлаждаемый башмак; *2* — внутренний водоохлаждаемый башмак; *3* — свариваемый лист

Для термообработки обычно используют печи большого размера. Если сосуд не может быть подвергнут термообработке целиком из-за отсутствия печи требуемого размера или из-за необходимости выполнения монтажных стыков, то применяют местную или общую термообработку с использованием индукционных или иных нагревателей. Так, например, при сооружении атомной электростанции Колдер-Холл внутри корпуса устанавливались электронагреватели на расстоянии 1150 *мм* от стенок в виде труб из нержавеющей стали. Размеры труб были подобраны из условия нагрева их до 800° С. Снаружи корпус был покрыт тепловой изоляцией. Операция термической обработки длилась шесть дней при температуре нагрева различных зон реактора в пределах 550÷600° С. Весьма производительным способом нагрева крупных конструкций является нагрев их с помощью пламени нефтяных или газовых форсунок, располагаемых внутри сосуда.

При изготовлении толстостенных сосудов из двухслойных сталей основной слой сваривают электрошлаковой сваркой. Для

того чтобы не допустить подплавления плакирующего слоя, применяют охлаждаемые ползуны и подкладки специальной формы (рис. 20-62). Наплавку коррозионностойкого слоя производят только после термообработки сваренного узла и контроля.

§ 3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВАРНЫХ ТРУБ

На изготовление труб расходуют около $^1/_{10}$ всего мирового производства стали, причем доля выпуска сварных труб составляет более половины и продолжает возрастать. Такая тенденция объясняется тем, что применение сварки позволяет получать наиболее экономичные трубы с пониженной толщиной стенки и лучшего качества, чем бесшовные. В особенности это относится к трубам большого диаметра (более 500 *мм*), которые выпускаются только сварными. Серийный характер производства, большая протяженность швов и сравнительно простая форма изделия позволяют эффективно использовать прогрессивные методы сварки на весьма высоких скоростях и полностью механизировать весь процесс изготовления труб.

Быстрое развитие трубопроводного транспорта требует резкого увеличения производства труб больших диаметров из низколегированных сталей. В отличие от практики США, где сеть трубопроводов сооружена в основном из труб небольшого диаметра, в СССР удельный вес газопроводов, построенных из труб диаметром 720÷1020 *мм* превышает 50%. В годы текущей пятилетки (1966—1970 гг.) впервые в мировой практике советские строители будут прокладывать трубопроводы диаметром 1220 и 1420 *мм*. При строительстве мощных трубопроводов большой протяженности переход к таким диаметрам даст огромную экономию металла и капитальных затрат. В США также принимаются срочные меры к организации производства труб больших диаметров.

При изготовлении труб для магистральных трубопроводов используют дуговую сварку под флюсом; шов располагают либо по образующей, либо по спирали. Трубы с прямым швом в зависимости от способа формовки трубной заготовки производят по двум основным схемам: а) формовка труб с помощью вальцов с последующей правкой нагретой трубы также в вальцах; б) формовка штамповкой в прессах с последующей раздачей сваренных труб в специальных прессах-расширителях.

Вторая схема позволяет выпускать трубы большей длины и более точных размеров. По такой схеме работает цех Челябинского трубного завода, выпускающий трубы диаметром до 820 *мм* с толщиной стенки 6÷12 *мм* и длиной до 12 000 *мм*. Общая схема расположения оборудования этого цеха показана на рис. 20-63. Заготовительный участок включает ряд агрегатов, расположенных в одной поточной линии и работающих в авто-

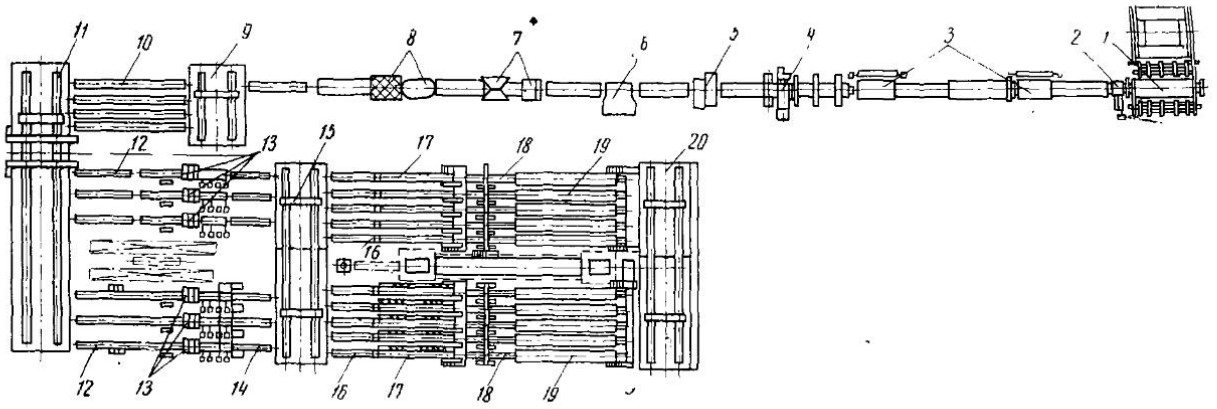


Рис. 20-63. Схема расположения оборудования при производстве труб большого диаметра с прямым швом

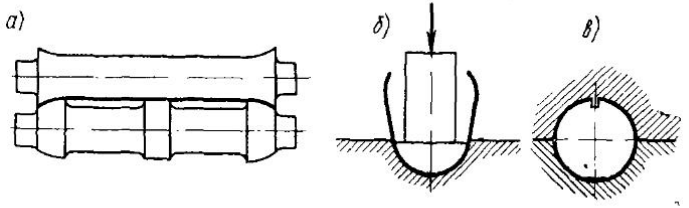


Рис. 20-64. Операции формовки трубы с прямолинейным швом: *а)* формовка краев листа на валковом стане; *б)* промежуточная операция формовки на прессе; *в)* окончательная операция формовки на прессе

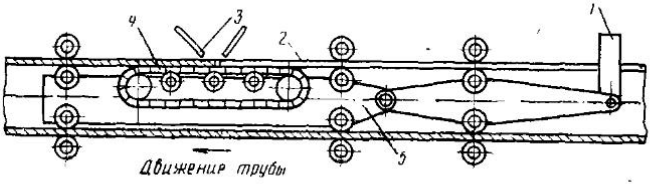


Рис. 20-65. Схема сварки наружного шва трубы

матическом цикле. Листоукладчик *1* захватывает листы со стеллажа по одному и подает на рольганг, направляющий их в правильную машину *2*. По выходе из правильной машины листы центрируются транспортером и подаются к кромкострогальным станкам *3*, один из которых осуществляет предварительную строжку, а второй придает листу точную ширину и разделку кромок под сварку. После обрезки концов на ножницах *4* и зачистки кромок на ширине 50÷70 *мм* с двух сторон на установке *5*, лист проходит операции формовки на стане *6* и прессах *7* и *8*, показанные на рис. 20-64, *а*, *б*, *в*. Затем трубная заготовка поступает на передвижной рольганг *9* (рис. 20-63), который распределяет сформованные заготовки по четырем рольгангам-аккумуляторам *10*, откуда они поступают на передвижной рольганг *11*, передающий их на приемные рольганги *12* непрерывных станов для наружной сварки *13*. Эти станы проходного типа.

Перед станом подъемными кантующими роликами заготовка устанавливается разъемом вверх по оси направляющего ножа *1* (рис. 20-65). Проходя стан, трубная заготовка *2* надвигается на оправку *5*, подвешенную к направляющему ножу и опирающуюся роликами на внутреннюю поверхность трубы *2*. Движение трубы обеспечивается приводными горизонтальными валками стана, причем щель между кромками по мере продвижения заготовки суживается за счет бокового давления вертикальных неприводных валков, и в зоне сварки *3* зазор отсутствует. Вытекание сварочной ванны предотвращается установленным на раме оправки *5* гусеничным башмаком *4*, устройство которого показано на рис. 20-66. Бесконечная лента *2*, выполненная из шарнирно скрепленных пластин с медными накладками, поддерживается и направляется роликами *3* и *4* корпуса *1*. Движение трубы увлекает ленту, и под сварочной ванной всегда находится свежая пластина, охлажденная сжатым воздухом, подаваемым по трубам. Сварка под флюсом производится двумя дугами, горящими в одной сварочной ванне, что обеспечивает хорошее формирование шва при скорости сварки 170—190 *м/ч* для стенок толщиной 7 *мм* и 115—135 *м/ч* для стенок толщиной 12 *мм*.

После сварки наружного шва на непрерывном стане трубы по выводным рольгангам *14* (см. рис. 20-63) передаются на передвижной рольганг *15*, который распределяет их по пяти вводным рольгангам *16* установок *17* для приварки выводных технологических планок, необходимых при внутренней сварке. Кроме того, на этом рабочем месте производится доварка незаваренных участков наружного шва на концах трубы.

Приварку выводных планок можно исключить при условии выполнения концевого участка продольного шва длиной 150—200 *мм* одной дугой с одновременным снижением скорости сварки. Потери на обрезку концов труб в этом случае невелики.

Затем труба по рольгангу *18* поступает к установке внутренней сварки *19* и подается внутрь подвижных люлек, поднимающих и поворачивающих трубу швом вниз. Люльки смонтированы на подвижной тележке, с помощью которой труба со скоростью, равной скорости сварки, надвигается на штангу длиной 12 *м* с укрепленной на ней сварочной головкой. Контроль за направлением электродов по оси шва производится сварщиком по разогретому участку наружного шва под сварочной ванной с помощью зеркала.

По окончании сварки тележка с трубой движется в обратном направлении, труба опускается на рольганг *18*, проходит под установкой и передается на передвижной рольганг *20*. После осмотра и исправления дефектов трубы торцуются, и на длине 300 *мм* с внутренней стороны снимается усиление шва. Калибровка, раздача и гидроиспытание производятся в прессе-расширителе (экспандере). Для этого труба *1* (рис. 20-67, *а, б*) подается в раскрытую толстостенную матрицу *4*. Затем рычагами *5* матрица *4* закрывается, запирается замками *2* гидродомкратов *3* и в трубу вводятся уплотняющие,

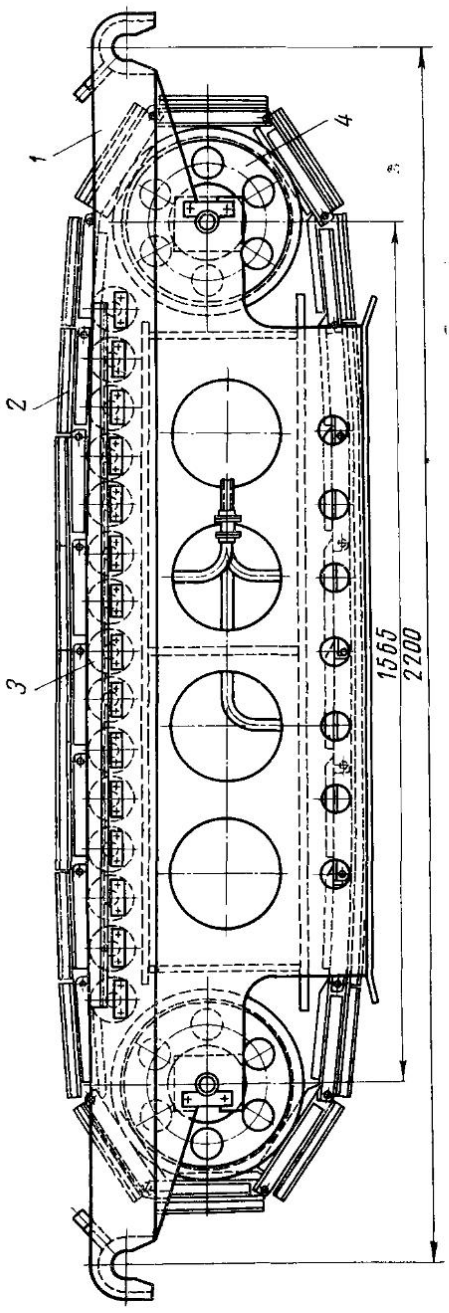


Рис. 20-66. Конструкция гусеничного башмака

конусные заглушки *б* (рис. 20-67, *б*). Внутренним гидравлическим давлением труба раздается на 1,0÷1,5%, чем достигается правка трубы по всей длине и калибровка по диаметру. Затем давление снижают до испытательного уровня и дают выдержку 30 *сек* при таком давлении с одновременным разовым обстукиванием трубы молотками. Следует иметь в виду, что неправильное использование операции экспандирования может принести вред. Так, например, назначение величины раздачи без достаточного учета свойств металла трубы и неравномерности распределения пластических деформаций по периметру трубы при разда-

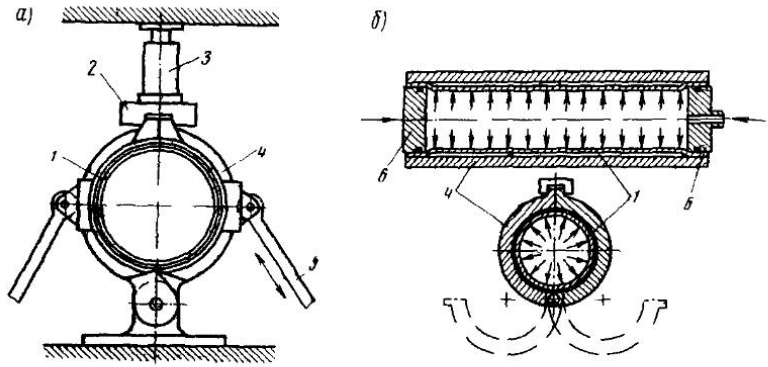


Рис. 20-67. Схема пресса-расширителя

че может привести к недопустимому снижению пластических свойств, а износ деталей пресса-расширителя — к резкому возрастанию отклонений размеров.

Для формования труб диаметром, превышающим 820 *мм*, с одним прямолинейным швом требуются листы слишком большой ширины. Поэтому трубы таких размеров выполняют с двумя швами из двух листов. Трубы диаметром 1020 *мм* и длиной 6 *м* с предварительной двусторонней сваркой листов «в карту» необходимой ширины и последующей вальцовкой этой карты для получения заготовки трубы изготавливают на Новомосковском металлургическом заводе.

Челябинский завод изготавливает трубы диаметром 1220 *мм* и длиной 12 *м* из двух предварительно отформованных половин; общая схема технологического потока показана на рис. 20-68. Можно видеть, что последовательность и содержание операций в значительной степени повторяют то, что было рассмотрено выше применительно к изготовлению труб диаметром до 820 *мм*. Исключение составляет операция сборки трубы из двух корыт.

С помощью кран-балки, к траверсе которой подвешены магниты с профилем полукруга, полуцилиндрические заготовки по

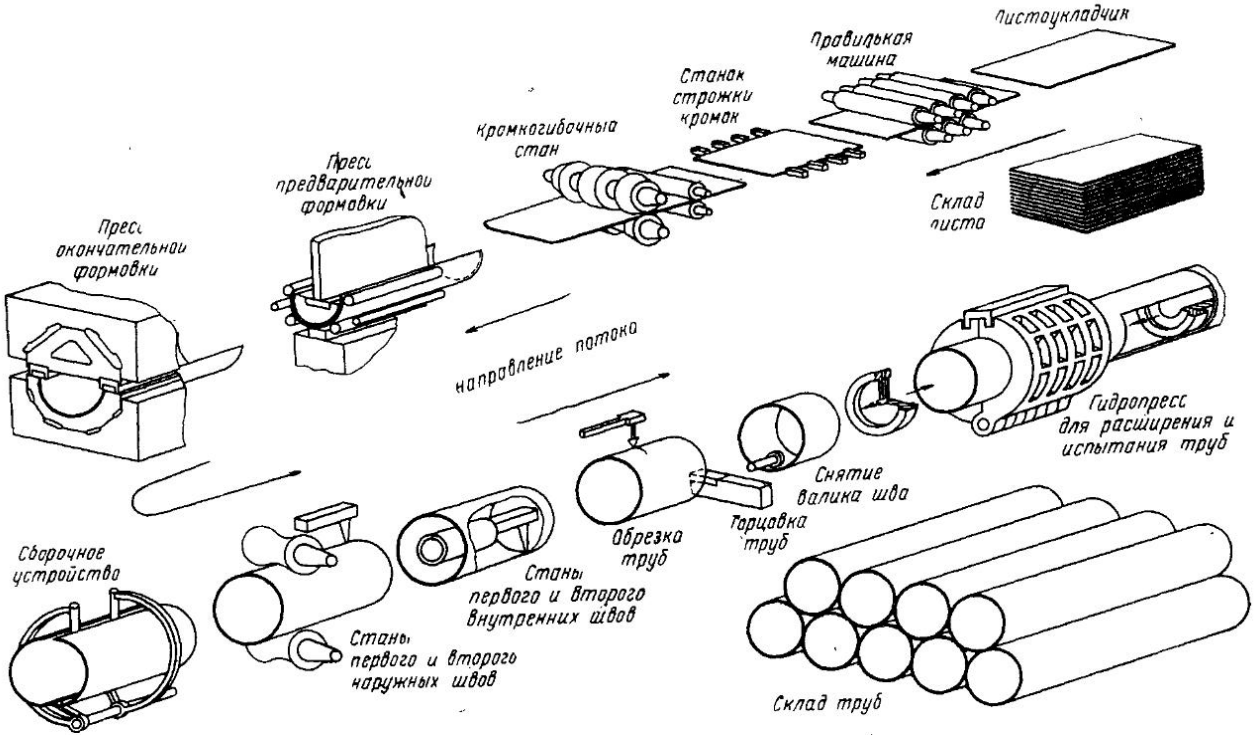


Рис. 20-68. Схема технологического потока изготовления труб диаметром 1220 *мм*

одной штуке укладываются на две параллельные нитки входных рольгангов каждого из трех сборочных устройств. Затем кромки заготовок специальным выравнивающим приспособлением устанавливаются в одной горизонтальной плоскости, и в таком положении корыта рольгангами подаются в раскрытое сборочное устройство (рис. 20-69, *а*). Штоки пневмоцилиндров *1* (рис. 20-69, *б*), поворачивая элементы стапеля *2*, устанавливают заготовки в исходное для подачи в непрерывный сварочный стан положение, образуя цилиндрическую трубу с вертикальным

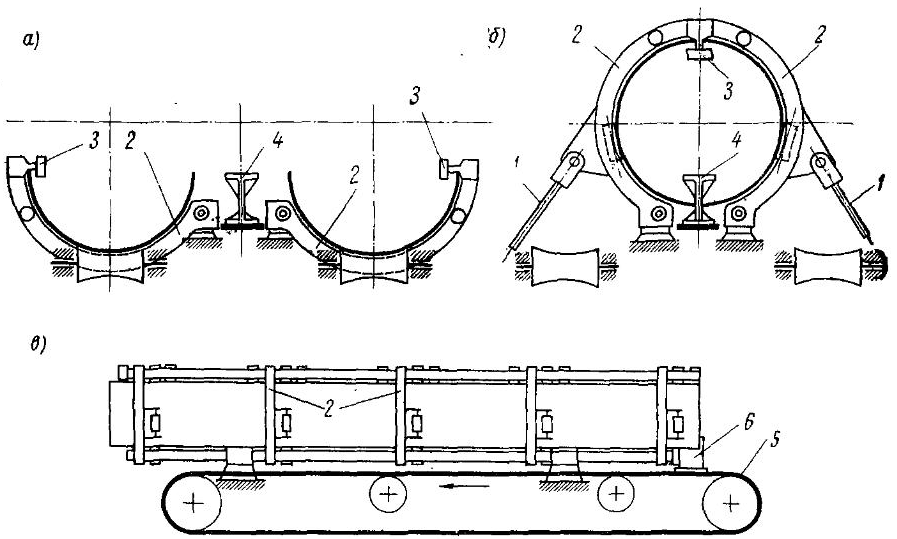


Рис. 20-69. Устройство для сборки трубы из двух корыт

разъемом, задаваемым деталями *3* и *4*. Подача собранной трубы осуществляется упором *6* (рис. 20-69, *в*) цепного заталкивателя *5* со скоростью, несколько превышающей скорость сварки. При этом направляющий нож непрерывного стана для сварки первого наружного шва попадает в зазор между верхними кромками корыт, направляя стык под сварочную головку. Доведя трубу до положения, в котором она захватывается горизонтальными приводными валками сварочного стана, цепной заталкиватель выключается, а затем возвращается в исходное положение.

Станы наружной сварки первого и второго швов труб диаметром 1220 *мм* расположены последовательно тремя параллельными линиями. После сварки первого наружного шва заготовка поворачивается разъемом вверх и по рольгангу поступает в стан для сварки второго наружного шва. Затем передвижны-

ми рольгангами трубы распределяются по четырем параллельным линиям станов для сварки сначала первого, а затем второго внутренних швов. После выполнения каждого внутреннего шва на установках для очистки внутренней поверхности трубы наклоняются на угол 50°, и от встряхивания флюсовая корка ссыпается в короб. Дальнейшие операции те же, что и при изготовлении труб диаметром до 820 *мм*.

В последние годы значительное развитие получил метод изготовления труб со спиральным швом. По сравнению с изготовлением прямошовных труб, этот метод обладает следующими преимуществами: 1) возможностью изготовления труб больших диаметров из относительно узкой и более дешевой полосы, прокатываемой на непрерывных станах; 2) возможностью получе-

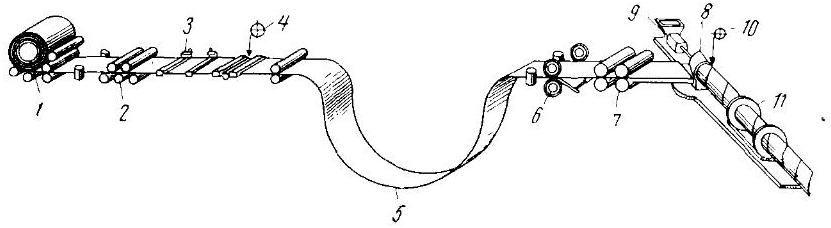


Рис. 20-70. Схема технологического процесса производства спиральношовных труб для газопроводов диаметром 1020 *мм*

ния тонкостенных труб с отношением диаметра к толщине стенки, значительно превышающем 100; 3) точностью размеров труб, исключающей необходимость трудоемких операций правки и калибровки; 4) возможностью использования непрерывного процесса; 5) относительной простотой оборудования, не требующего больших мощностей привода и позволяющего приблизить производство труб к месту их потребления.

На рис. 20-70 показана схема стана, выпускающего газопроводные трубы со спиральным швом диаметром от 720 до 1020 *мм*.

Для изготовления труб диаметром 1020 *мм* из стали 15Г2С с пределом прочности $\sigma_в = 52$ *кГ/мм*^{2} используют рулонированную полосу шириной 1450 *мм*, толщиной 10,6 *мм* и длиной более 50 *м*. После отгиба конца полосы и захвата его механизмом правильных вальцов *2*, разматывание рулона *1* осуществляется со скоростью, превышающей скорость сварки. Этим достигается накапливание полосы в компенсационной петле *5*, необходимое для обеспечения непрерывной работы сварочного участка. Обрезка концов полосы выполняется гильотинными ножницами *3*, а сварка их под флюсом — на флюсомедной подкладке *4*. Дальнейшие операции после компенсационной петли производятся со

скоростью сварки, создаваемой механизмом стана 7. Полоса протягивается через парные дисковые ножи *6*, обрезающие продольные кромки под сварку, удаление обрезков производится кромкомоталками.

Все машины и механизмы линии подготовки полосы неподвижно смонтированы на фундаменте, поэтому настройка стана на угол, необходимый для получения из полосы данной ширины требуемого диаметра трубы, достигается разворотом формовочной машины и выходного моста, перемещающегося на катках по криволинейным рельсовым путям. Сворачивание в трубу осуществляется подающей машиной *7* при заталкивании полосы во втулочно-роликовое устройство формовочной машины *8* снизу. Спиральный шов выполняется сваркой под флюсом тремя сварочными головками, их схематическое расположение показано на рис. 20-71, *а*.

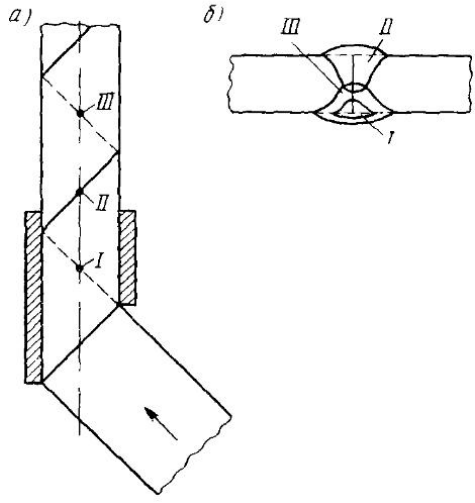


Рис. 20-71. Схема сварки спирального шва трубы тремя сварочными головками:

а) схема расположения головок; *б)* сечение сварного соединения

Две головки — первая и третья (см. рис. 20-70) крепятся на общей штанге *9*, вводимой внутрь трубы, вторая *10* расположена снаружи. Первый внутренний шов *I*, приваривающий к сформованной трубе кромку полосы в момент ее захода в формовочную улитку, является технологическим. Он выполняется на весу при глубине провара всего 2,5÷3 *мм* в условиях полного соприкосновения кромок или зазора порядка 1 *мм*. Назначение технологического шва — устранить возможность взаимного перемещения кромок и предотвратить вытекание сварочной ванны при сварке наружного рабочего шва II, выполняемого второй головкой. Внутренний рабочий шов III варит двухэлектродная головка, обеспечивая хорошее формирование и полный переплав технологического шва, как показано на рис. 20-71, *б*. Такая технология позволяет гарантировать отсутствие кристаллизационных трещин при сварке низколегированных сталей типа 15Г2С со скоростью до 110 *м/ч*.

Выходящая из стана непрерывная труба разрезается (ацетилено-кислородной резкой) на трубы длиной 11,8÷12 *м* при вра-

щении трубы относительно резака, закрепленного на тележке *11*, движущейся в продольном направлении совместно с трубой (см. рис. 20-70). Отделочные операции предусматривают обработку торцов труб, гидроиспытание и исправление дефектов. Правку труб со спиральным швом не производят, так как принятая технология обеспечивает требуемый допуск ±4 *мм* на трубы диаметром 1020 *мм* и кривизну не более 1,5 *мм* на 1 *м* длины.

Рассмотренная отечественная технология изготовления газопроводных труб со спиральным швом и конструкция стана «1020» являются удачными и обеспечивают более высокую производительность, по сравнению с зарубежными станами подобного типа. Поэтому при проектировании более мощных станов «1420» конструкция стана «1020» принята за основу.

Широко применяемым и производительным способом получения труб средних и малых диаметров из углеродистых хорошо свариваемых сталей с содержанием углерода не более 0,4% является сварка сопротивлением. У нас этот вид сварки применяется в основном при изготовлении труб диаметром до 152 *мм*, тогда как в ряде зарубежных стран его используют для труб диаметром до 600 *мм* с максимальной толщиной стенки 20 *мм*. Сварка осуществляется переменным током частотой от 50 до 350 *гц*; в зависимости от частоты тока и толщины стенки трубы максимальная скорость сварки может быть порядка 10÷60 *м/мин*.

В станах для сварки сопротивлением процесс идет непрерывно в полностью механизированных поточных линиях, как схематически показано на рис. 20-72. Лента

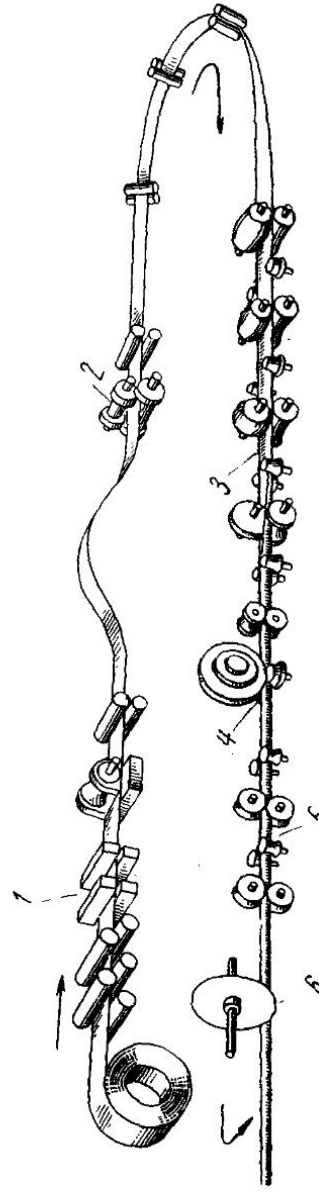


Рис. 20-72. Схема технологического процесса производства труб методом электросварки сопротивлением

разматывается из рулона и правится. Концы рулонов свариваются на стыкосварочной машине *1* с последующим удалением грата, при этом постоянство скорости движения ленты на формовочном и сварочном участках обеспечивается наличием компенсационной петли. В случае необходимости лента обрезается по ширине дисковыми ножницами *2*, затем формуется роликами *3* и поступает в сварочный узел *4*, где сваривается с помощью вращающегося трансформатора с дисковыми электродами. Отделочные операции включают удаление грата, калибровку *5* и разрезку *6* на трубы мерной длины.

Использование тока высокой частоты (до 450 *кгц*) позволяет расширить область применения контактной сварки сопротивле-

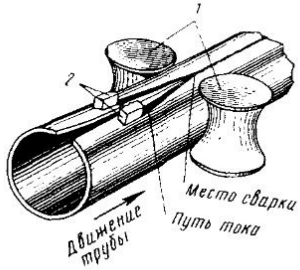


Рис. 20-73. Схема контактной сварки труб током высокой частоты

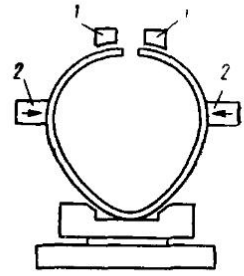


Рис. 20-74. Положение заготовки трубы при контактной сварке оплавлением

нием при изготовлении тонкостенных труб из легированных и нержавеющих сталей, алюминия, меди и их сплавов, а также других теплопроводных материалов. Ограничение размера труб по диаметру при таком способе определяется только опасностью деформирования стенки трубы в процессе сварки. Ток подводится скользящими контактами *2* (рис. 20-73), касающимися кромок трубы на определенном расстоянии от места их соприкосновения, определяемого расположением обжимных роликов *1*. Скорость сварки достигает 120 *м/мин*. Однако, несмотря на высокую производительность, этот метод еще не получил широкого распространения при изготовлении труб ответственного назначения из-за трудности контроля качества.

Контактная сварка оплавлением с неподвижными контактами пригодна для массового производства труб большого диаметра с толщиной стенок 7—18 *мм*. Время сварки одной трубы не превышает 30 *сек*, однако осуществление такого процесса требует больших установочных мощностей и значительных капиталовложений.

За рубежом этот метод применяют при изготовлении труб из различных марок сталей, включая нержавеющие стали. Сварочная операция выполняется при неподвижной трубе методом «вспышки». Электроды *1* (рис. 20-74) располагают на кромках, которые при разогреве стыка плотно прижимаются друг к другу зажимами *2*. Затем кромки раздвигаются, и оплавление производится при медленном их сближении с последующей осадкой.

Индукционная сварка, по сравнению с контактной, обладает тем преимуществом, что трубы могут изготавливаться из горячекатаной неочищенной ленты, так как индукционный нагрев не требует наличия контакта с поверхностью изделия. Наиболее концентрированный нагрев можно получить с помощью индукто-

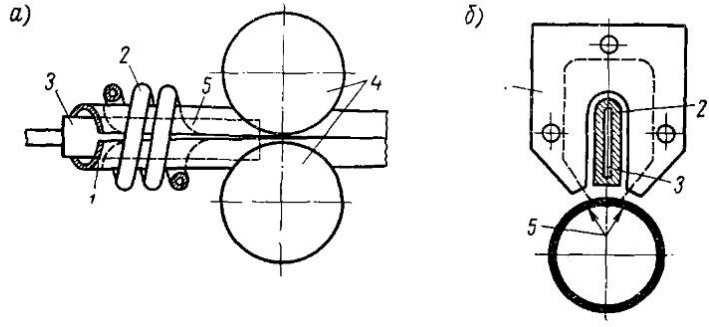


Рис. 20-75. Схемы индукционной сварки труб:

а) с охватывающим индуктором; *б)* с продольным индуктором; *1* — трубная заготовка; *2* — индуктор; *3* — магнитный сердечник; *4* — обжимные валки; *5* — путь тока

ра-соленоида, охватывающего трубу (рис. 20-75, *а*). Такую схему применяют для сварки углеродистых и нержавеющих сталей и цветных металлов. Из конструктивных соображений продольный индуктор (рис. 20-75, *б*) более удобен, чем охватывающий, но зато нагрев получается менее концентрированным. Индукционная сварка линейным индуктором применяется главным образом на средней частоте (1,0—10 *кгц*) при производстве труб небольшого диаметра (60—219 *мм*) из малоуглеродистой стали с толщиной стенок 1,5—10 *мм*. При этом скорость сварки может достигать 60 *м/мин*, т. е. по производительности такой способ сопоставим с контактной сваркой роликовыми электродами на повышенной частоте.

Несмотря на развитие высокопроизводительных методов сварки токами высокой частоты (контактной, индукционной), трубы из спецсталей и цветных металлов и сплавов по-прежнему сваривают аргонодуговой сваркой при скорости 1,2—2,6 *м/мин*.

Это объясняется большей надежностью и простотой методов контроля.

Аргонодуговую сварку используют не только при изготовлении труб с прямым швом, но и широко применяют при изготовлении труб со спиральным швом из специальных сталей и сплавов. Характерным является универсальность такого метода, позволяющего выпускать трубы в широком диапазоне диаметров (20—1000 *мм*) и толщин стенок (0,1—10 *мм*).

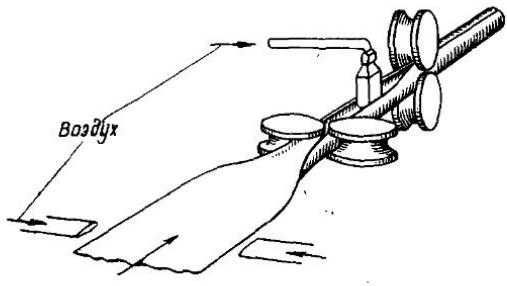


Рис. 20-76. Принципиальная схема непрерывной печной сварки труб встык

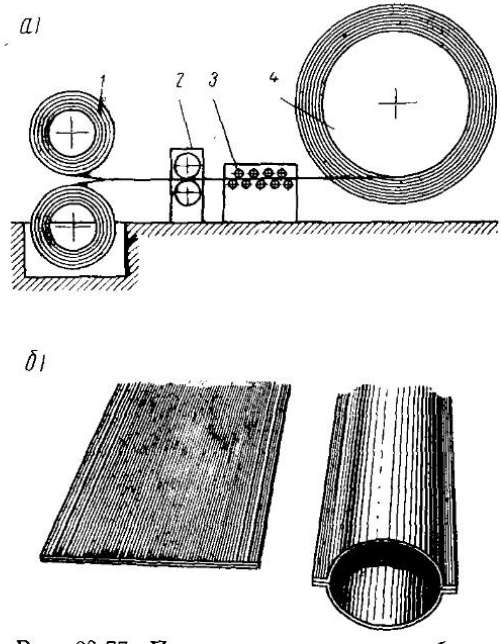


Рис. 20-77. Плоскосворачиваемые трубы:

а) схема изготовления с помощью контактной шовной сварки; *б)* вид трубы до и после раздутия

Весьма производительна печная сварка при изготовлении водогазопроводных труб малого диаметра из малоуглеродистой стали. На непрерывных станах процесс производства полностью механизирован, скорость сварки достигает 500 *м/мин*. Непрерывная полоса протаскивается через нагревательную печь роликами формовочно - сварочного стана, которые свертывают ее в трубу и сваривают, как показано на рис. 20-76. В непрерывной печи полоса нагревается по ширине неравномерно. Кромки, нагретые до размягчения, обеспечивают качественную сварку, а прогретая слабее середина предотвращает разрыв полосы при протаскивании через печь.

Заканчивая обзор методов изготовления сварных труб, необходимо упомянуть о плоскосворачиваемых трубах, нашедших

применение при прокладке промысловых и газосборных трубопроводов. Схема изготовления таких труб показана на рис. 20-77, *а*. Две стальные ленты *1* накладываются одна на другую и свариваются двумя продольными швами на роликовой контактной машине *2*. По мере сварки трубная заготовка проходит правильное устройство *3* и свертывается в рулон *4*. Контроль плотности швов готовой свернутой в рулон трубы производится путем присоединения к одному из концов трубы сети сжатого воздуха. При этом рулон закрепляется в жесткой обойме, предотвращающей его разворачивание или раздутие трубы. Показание манометра, присоединяемого к другому, предварительно заглушенному концу трубы, позволяет установить отсутствие или наличие неплотностей. Такие трубы могут иметь толщину стенок до 4 *мм*, диаметр — до 300—400 *мм* и длину — до 250—300 *м*. На месте укладки трубопровода рулон разматывается, и труба раздувается (рис. 20-77, *б*). Отдельные плети соединяют друг с другом либо сваркой плоских концов труб до их раздутия, либо с помощью фланцевых соединений.

§ 4. СВАРКА ТРУБ И ТРУБОПРОВОДОВ

При строительстве магистральных трубопроводов приходится собирать и сваривать миллионы стыков труб большого диаметра.

Укладка трубопроводов может быть либо непрерывной, либо секционной. В первом случае производят последовательное наращивание, причем все стыки выполняют без поворота. Во втором случае первоначально сваривают секции, вращая при этом трубы, а затем на трассе соединяют секции без поворота. В СССР на строительстве магистральных трубопроводов применяют главным образом секционный способ укладки труб. Трубы длиной 12 *м* поступают на полевые сварочные базы, где их соединяют в секции длиной 24—36 *м*. Последние на специальных автомашинах транспортируют на трассу и сваривают в плети. Трубы соединяют встык без использования подкладных колец. Сборка стыков труб является важнейшей операцией, во многом определяющей качество сварки. При сборке необходимо обеспечить соосность труб, достаточно точное совпадение свариваемых кромок и равномерный зазор в стыке, позволяющий проварить корень шва по всему периметру. Для этой цели применяют центраторы наружные или внутренние.

Наружный центратор (рис. 20-78) состоит из ряда шарнирно соединенных звеньев *5* и *6* с роликовыми опорами *4*. При сборке раскрытую цепь центратора подводят под трубы, и крючки *3* надевают на цапфы крестовин *2*. При этом пластины цепи располагаются симметрично по обеим сторонам от плоскости стыка. Затем цепь натягивают винтом *1*, ролики совмещают кромки обеих труб и производится прихватка. Наружные центраторы

в определенной степени облегчают центровку труб, но не исключают применения ручного труда.

Применение внутренних центраторов позволяет механизировать операцию сборки более полно. Кроме того, собранный стык

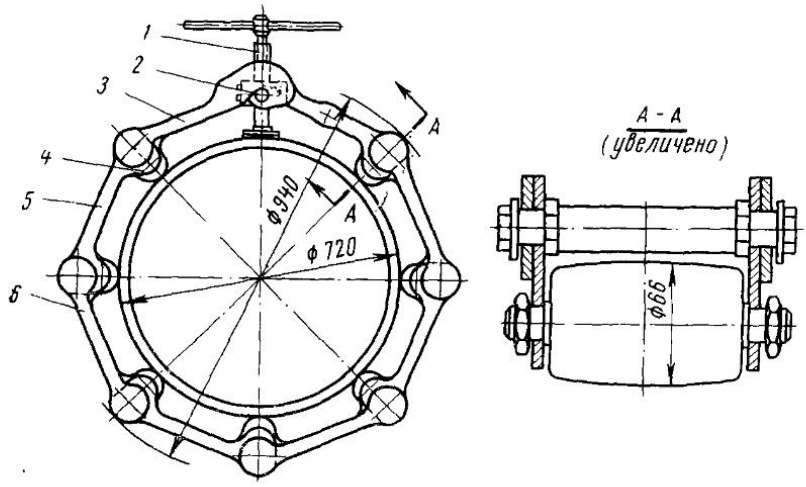


Рис. 20-78. Наружный центратор для сборки труб

оказывается целиком доступным для сварки и корневой шов можно выполнить от начала до конца без остановок и прихваток. Для внутреннего центратора используют механизм типа

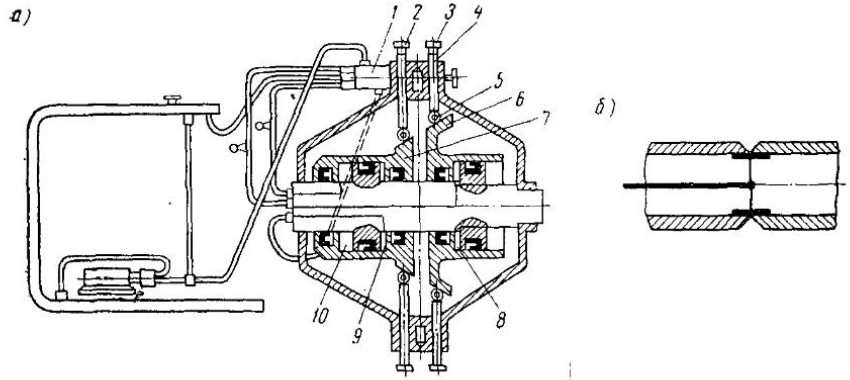


Рис. 20-79. Схема внутреннего центратора

«зонтик» с радиальным приложением сил к кромкам труб (рис. 20-79, *а*). Два ряда центрирующих элементов *2* и *3* могут разжиматься независимо, а сжиматься одновременно. Управле-

ние осуществляется перемещением золотника *1*. Последовательное разжатие заднего (левого) и переднего рядов центрирующих элементов *2* и *3* достигается подачей масла в полости *10* и 8. При этом движение каждого из конусов *6* и *7* влево через ролики *5* и жимки *4* передается башмакам *2* и *3*, которые непосредственно соприкасаются с поверхностями собираемых труб и обеспечивают их центровку. Для освобождения стыка после сборки и прихватки масло подается в полость *9*. Конус *7*, двигаясь вправо, упирается в конус *6* и увлекает его за собой. Этим достигается одновременный отвод центрирующих элементов обоих рядов. При сборке поворотных стыков центратор внутрь трубы обычно вводится с помощью штанги (рис. 20-79, *б*). Для использования

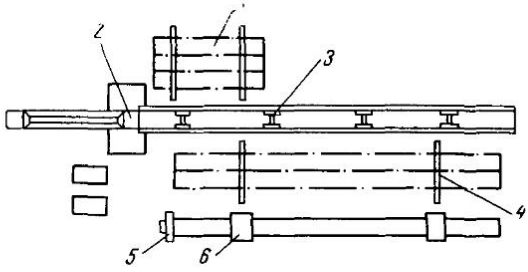


Рис. 20-80. Механизированная трубосварочная линия (МТЛ) для наружной сварки поворотных стыков

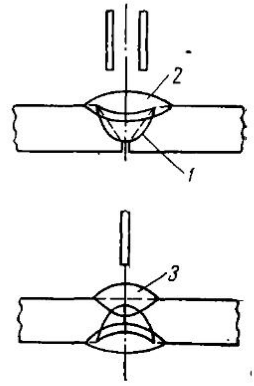


Рис. 20-81. Схемы наложения швов:
1, 2, 3 — слои шва

центратора в качестве вращателя штанга закрепляется в подшипниках и ей сообщается вращательное движение. При сборке неповоротных стыков перемещение центратора внутри трубопровода целесообразно производить с помощью самоходного устройства.

При сварке поворотных стыков труб большого диаметра корневой шов выполняют полуавтоматами в среде CO_2 или ручной сваркой; заполнение разделки — автоматами под флюсом. Неповоротные стыки, как правило, выполняются ручной сваркой в несколько слоев.

При сборке и сварке секций на полевых базах такие вспомогательные операции, как подача отдельных труб, накатка и скатка секций, установка центратора и т. д., при использовании примитивной оснастки оказываются достаточно трудоемкими. Комплексную механизацию обеспечивает использование механизированных трубосварочных линий типа МТЛ (рис. 20-80). Трубы

с накопителя *1* поочередно гидравлическими отсекателями плавно укладываются на рольганг *3*. Сборка выполняется с помощью внутреннего поворотного центратора *2*, закрепленного на одном месте штангой. Первая труба рольгангом *3* надвигается на центратор так, чтобы ее торец располагался на расстоянии 15—20 *мм* от ряда жимков центратора, которые при разжатии фиксируют ее в этом положении. Вторая труба подается рольгангом *3* до соприкосновения с первой и фиксируется разжатием второго ряда жимков центратора, чем достигается центровка стыка. Требуемый зазор устанавливается поднятием конца секции гидроцилиндром. Центратор одновременно выполняет роль вращателя с широким диапазоном скоростей. Два сварщика одновременно выполняют корневой шов полуавтоматами в среде CO_2 или ручной дуговой сваркой. Сваренная первым слоем двухтрубная секция отводится рольгангом вперед, на ее место на центратор надвигается третья труба, и цикл сборки стыка и сварки первого слоя повторяется. После этого собранная трехтрубная секция перегружателем передается на промежуточный стеллаж *4* и поступает на второй стенд *6*, где стыки окончательно сваривают автоматами под флюсом с помощью торцового вращателя *5*. Над местом сборки стыков *2* предусмотрено укрытие в виде застекленного домика. В случае непогоды на этом рабочем месте стыки можно сваривать полностью, т. е. выполнять не только корневой шов, но и последующие слои автоматом под флюсом.

Предполагается дальнейшее усовершенствование выполнения поворотных стыков труб большого диаметра путем сварки их автоматами под флюсом с двух сторон на передвижных базах, состоящих из двух линий. На первой линии сборка стыков осуществляется, как было изложено выше при описании работы линии МТЛ, однако первый слой с наружной стороны выполняется на весу расщепленным электродом на автомате под флюсом, а затем второй, как показано на рис. 20-81. После этого трехтрубная секция поступает на линию внутренней сварки с приводными опорами для вращения секции со скоростью сварки. Сварка швов *3* первого и второго стыков выполняется двумя сварочными головками под флюсом, поочередно вводимыми внутрь трубы с корректировкой направления по пятну разогрева.

Другим усовершенствованием процесса укладки магистральных трубопроводов можно считать поставку на трассу труб длиной 24 *м* непосредственно с завода, минуя промежуточные передвижные сварочные базы. Перевозку таких труб по железным дорогам можно осуществлять на двух открытых платформах обычного типа или в полувагонах длиной 25 *м*.

Выпуск труб длиной 24 *м* со спиральным швом особых трудностей не представляет. Прямошовные трубы длиной 12 *м* можно удлинить двусторонней сваркой поворотного стыка автоматами под флюсом. Использование более тяжелого и совершенного

оборудования позволяет выполнять эту операцию в условиях завода более эффективно, чем на передвижных базах. Для этой цели применяют стационарные установки (рис. 20-82), обеспечивающие механизированную подачу труб, их сборку, двустороннюю сварку и выдачу длинномерной трубы на стеллаж. Трубы *1* по рольгангу *7* подаются до упора *10* так, чтобы кольцевой стык оказался в плоскости расположения сварочных головок *2* и *4*. Затем трубы приподнимаются опорными роликами *6* и зажимаются роликами наружного центратора-вращателя *8* и *3*. Первым начинают сваривать внутренний шов головкой *2*, закрепленной на штанге *5*. После того, как на флюсоременной подушке *9* сва-

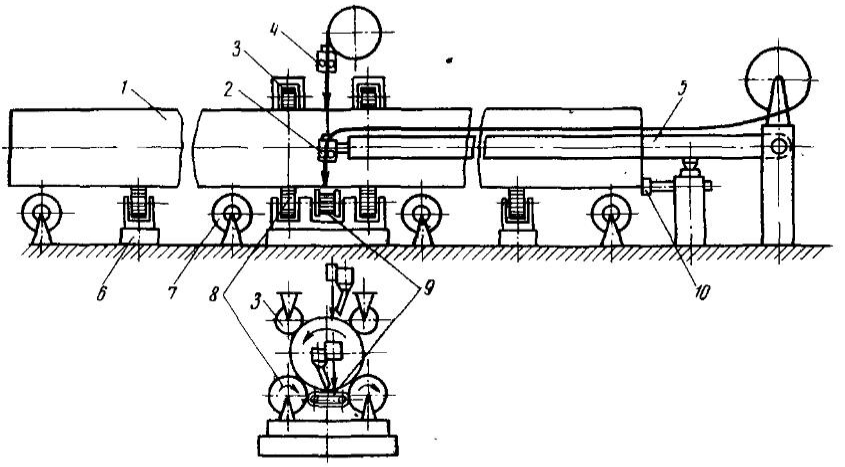


Рис. 20-82. Схема установки для двусторонней сварки стыков труб

рена половина внутреннего шва, включается подача проволоки наружной головки *4*, и сварка с наружной стороны происходит на уже заваренном внутреннем шве.

Выполнение неповоротных стыков магистральных трубопроводов большого диаметра продолжает оставаться весьма трудоемким. Использование трубоукладчиков и внутренних гидравлических центраторов обеспечивает механизацию процесса сборки, однако сварка по-прежнему выполняется, как правило, вручную.

Заметное повышение темпа укладки трубопроводов дает расчленение процесса сварки стыков на ряд последовательных операций. Так, при выполнении неповоротных стыков трубопровода диаметром 1020 *мм* с толщиной стенки 10—12 *мм* при поточно-расчлененном методе одновременно работают бригада сборщиков и четыре бригады сварщиков (по 3 человека). Впереди движется бригада сборщиков, собирая стыки с помощью

внутреннего центратора. За ней от стыка к стыку движутся бригады сварщиков. Каждая бригада сварщиков выполняет свой слой шва, а каждый сварщик — определенный участок этого слоя.

При укладке трубопроводов диаметром 114—529 *мм* эффективно применение прессовых методов сварки. Для контактной сварки оплавлением предназначены установки типа ТКУС и ТКУП. Основным агрегатом стационарной установки ТКУС (рис. 20-83) является неразъемная сборочно-сварочная головка, имеющая кольцевой трансформатр *6* и механизм центровки *4* стыкуемых кромок с гидравлическим приводом *5* зажима, оплавления и осадки труб. Установка выполнена в виде одностендовой поточной линии и обслуживается трубоукладчиками *3*. Трубы со стеллажа *1* накатываются на рольганг *2*, подаются к сварочной головке, центрируются и свариваются. Удаление грата (внутри и снаружи) производится гратоснимателями непосредственно после сварки. Установки ТКУС позволяют сочетать высокую производительность стыковой контактной сварки с механизацией сборочных и вспомогательных операций при соединении труб в укрупненные секции. Передвижная установка ТКУП, используемая при сварке стыков на трассе, имеет разъемную сварочную головку, которая подвешивается на стреле специального трактора.

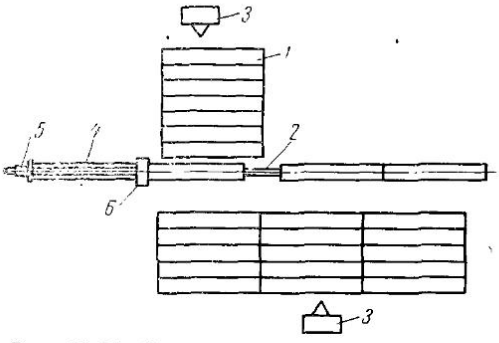


Рис. 20-83. Схема стационарной установки для стыковой электроконтактной сварки труб в секции (ТКУС)

Дуго-контактный способ сварки позволяет обходиться источником тока меньшей мощности, чем при контактной сварке с использованием кольцевого трансформатора. Кромки труб нагревают сварочной дугой, горящей в зазоре между их торцами и вращающейся с большой скоростью под действием магнитного поля. Одна из первых установок такого типа УДС-1 предназначена для сварки промысловых трубопроводов диаметром 114 *мм*. Она имеет сварочную головку с пневмогидравлическим механизмом зажатия и осадки, включение механизма осадки производится с помощью реле времени.

Определенный интерес представляют попытки зарубежных фирм создать при укладке трубопроводов оборудование для изготовления труб в полевых условиях. Так, малогабаритная

установка, размещающаяся в автомобильном фургоне, может выпускать спирально-шовные трубы диаметром 150—1020 *мм* и выше непосредственно на месте их укладки. Основной частью этой установки является формующее устройство. Сварка выполняется двумя сварочными головками с внутренней и с наружной сторон трубы. Другая установка, использующая контактную сварку токами радиочастоты, предназначена для изготовления прямошовной трубы неограниченной длины диаметром 200—400 *мм* непосредственно во время ее укладки. В процессе изготовления установка движется со скоростью сварки, готовая труба укладывается вдоль траншеи.

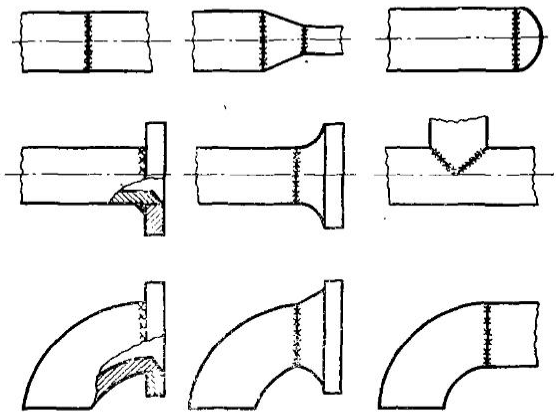


Рис. 20-84. Схемы основных стыков заводских трубопроводов

Огромное количество стыков труб приходится выполнять при сооружении нефтяных, химических, металлургических заводов и др. Так, современный нефтеперерабатывающий завод может иметь 500—600 *км* обвязочных и 1500—1600 *км* межцеховых трубопроводов. Эти трубопроводы имеют большое количество вварных деталей. В среднем на 10 *м* обвязочного трубопровода приходится устанавливать две задвижки, четыре фланца, два угольника, сваривать до десяти стыков, вваривать два штуцера и т. д. (рис. 20-84). Часть вварных деталей также изготавливается с помощью сварки.

Межцеховые трубопроводы отличаются от обвязочных большим диаметром прокладываемых труб и меньшим количеством привариваемых деталей.

Сборку и сварку большинства стыков заводских трубопроводов обычно выполняют в трубозаготовительных цехах, а на

монтаже сваривают только стыки, соединяющие готовые секции или узлы. В условиях цеха трубы со склада направляются в заготовительное отделение, где их обрезают и скашивают кромки. Затем трубы подают на сборку, куда поступают и готовые детали (отводы, тройники, фланцы, переходы и т. п.), поставляемые специализированными заводами. Сборку узлов производят на столах-стендах, оснащенных приспособлениями, позволяющими собирать элементы в определенном диапазоне размеров.

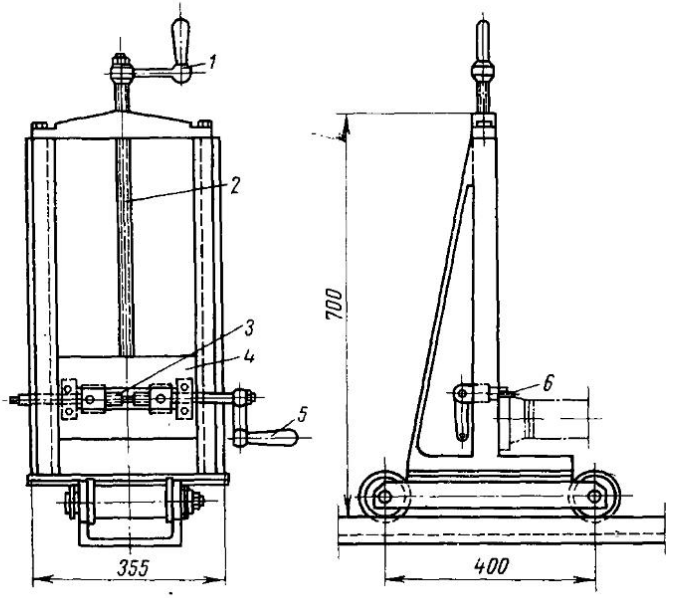


Рис. 20-85. Приспособление для сборки трубы с фланцем

Широко применяют приспособления для сборки элементов типа «труба — фланец» (рис. 20-85). Привариваемый фланец устанавливается на сменных контрольных штифтах *6*, соответствующих по диаметру болтовым отверстиям фланца. С помощью двухзаходного винта *3* и рукоятки *5* штифты раздвигаются и фиксируют положение отверстий фланца симметрично вертикальной оси. Требуемое положение фланца относительно оси трубы достигается прижимом зеркала фланца к поверхности установочной каретки *4* и перемещением каретки с фланцем по вертикали с помощью винта *2* и рукоятки *1*.

Комплексный стенд для сборки элементов типа «труба — фланец», «труба — отвод» и «отвод — труба — фланец» показан на

рис. 20-86. Базовая поверхность стола *2* изготовлена из швеллеров, по которым перемещаются элементы приспособлений. Для сборки трубы с отводом служит приспособление *1*, имеющее подъемную площадку, на которую вертикально устанавливается отвод на один из торцов. Второй торец отвода стыкуется с трубой, уложенной в призмах на двух подвижных каретках *3*. Для сборки плоских приварных фланцев применяют приспособление *4* со специальной подвижной оправкой, имеющей выступ по внутреннему диаметру соответствующих фланцев. Сварка собранных узлов трубопроводов выполняется под флюсом или в среде CO_2 с использованием вращателей и манипуляторов.

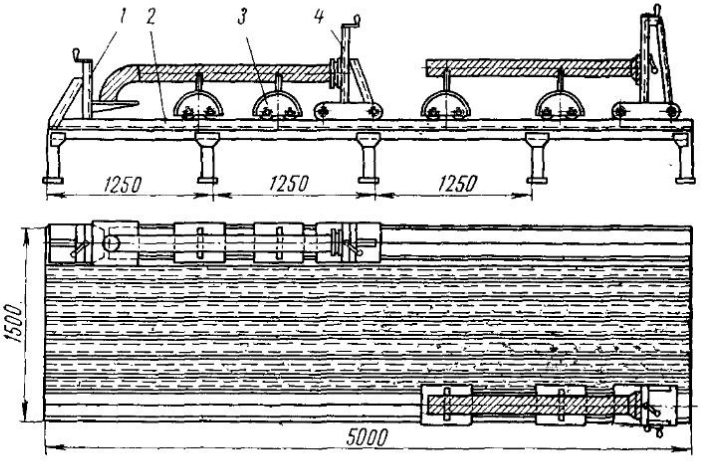


Рис. 20-86. Схема стенда для сборки элементов трубопроводов

Несмотря на большое количество типоразмеров элементов, разделение их на группы позволяет выделить из технологического процесса значительную часть операций с большими партиями однотипных деталей и организовать производство узлов в специализированных поточных линиях. В таких линиях обычно сначала собирают и сваривают отдельные подузлы (например, трубу с фланцем или угольником), а затем эти подузлы поступают на укрупнительную сборку и окончательную сварку готовых узлов. В крупных трубозаготовительных цехах при выпуске больших партий узлов одинаковых размеров используют специализированные установки дуговой автоматической сварки, а также применяют контактную сварку встык.

Неповоротные монтажные стыки труб сваривают вручную

или специальными автоматами в среде защитных газов. Использование таких автоматических головок, обегающих стык, особенно необходимо для выполнения труднодоступных швов, а также в условиях, опасных для человека.

В нефтяной, химической и атомной промышленности применяют трубы из специальных сталей, цветных металлов и их сплавов, предназначенные для работы при высоких давлениях и в активных средах. Технология сварки таких труб весьма разнообразна, но общим требованием является надежное проплавление всего сечения. Помимо этого, высокие требования часто предъявляют к состоянию поверхности и очертанию сварного шва внутри трубы. Так, в атомной промышленности при выполнении стыков трубопроводов контактную сварку не применяют из-за необходимости тщательного удаления грата. В этом случае основным методом является аргонодуговая сварка без присадки, а если трудно собрать стык без зазора, то с присадкой в V-образную разделку.

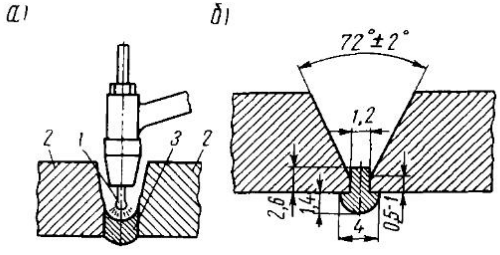


Рис. 20-87. Проплавление корня шва:

а) формирование корня шва; *б)* подготовка стыка со вставкой грибовидного сечения

Для обеспечения надежного проплавления и хорошего формирования проплава при выполнении первого слоя часто используют специальное расплавляющееся кольцо грибовидного сечения (рис. 20-87, *а, б*). При выполнении монтажных стыков ответственных трубопроводов их сборка под сварку автоматической головкой, обегающей стык, выполняется обычно с помощью специального жесткого центратора, исключающего необходимость прихваток.

Значительный объем работ по сварке труб выполняют в котлостроении и аппаратостроении. Стыкование труб экранов и змеевиков производится преимущественно контактной сваркой оплавлением с последующим удалением грата. К топочным экранным трубам привариваются большое количество шипов (рис. 20-88), удерживающих защитные тугоплавкие покрытия. Обычно это осуществляется под флюсом полуавтоматами пистолетного типа, однако ввиду очень большого количества шипов (более 1 млн. на один котел П-50) такую операцию целесообразно автоматизировать полностью. Использование специализированных установок типа ЦШ-1 с автоматической подачей шипов из бункера позволяет с помощью контактной сварки приваривать их до 2000 шт. в час.

Соединения труб с трубными досками являются основными узлами большинства теплообменников. Соединения *II* и *III* (рис. 20-89) просты в подготовке, но сложны для сварки из-за большого различия толщин сопрягаемых элементов. Соединение *I* воспроизводит соединение с отбортовой и хотя оказывается сложнее в подготовке, но зато более удобно для сварки. Этот

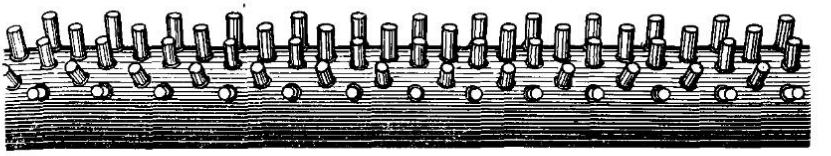


Рис. 20-88. Экранная труба с шипами

тип соединения применяют при выполнении трубных решеток из материалов с ограниченной свариваемостью.

Для увеличения теплоотдачи или для других целей часто приваривают к трубам продольные или спиральные ребра. При выполнении таких операций целесообразно использовать контактную сварку токами высокой частоты, как показано на рис. 20-90.

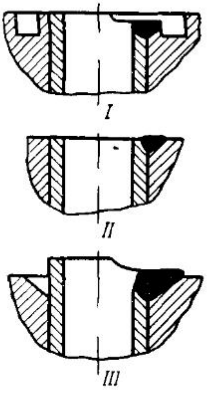


Рис. 20-89. Типы соединений труб с трубными досками

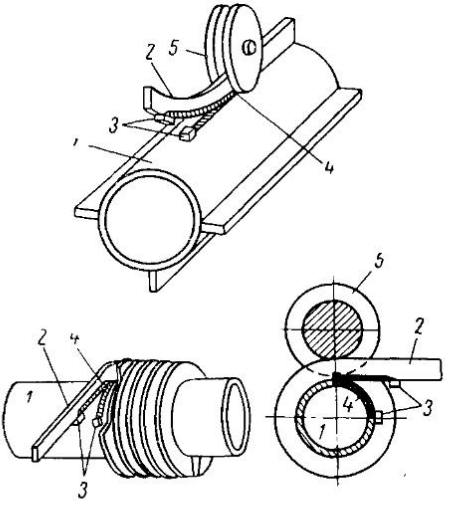


Рис. 20-90. Приварка ребер к трубам с помощью контактной сварки токами ВЧ:

1 — труба; *2* — ребро; *3* — токоподводящие контакты; *4* — путь тока; *5* — прижимной ролик

§ 5. КОРПУСНЫЕ ЛИСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Характерными представителями этого типа конструкций являются кузова цельнометаллических вагонов и корпуса судов. Общим для них является использование плоских или криволинейных полотнищ с последующим объединением их в жесткую пространственную конструкцию, способную воспринимать статические, вибрационные и динамические нагрузки.

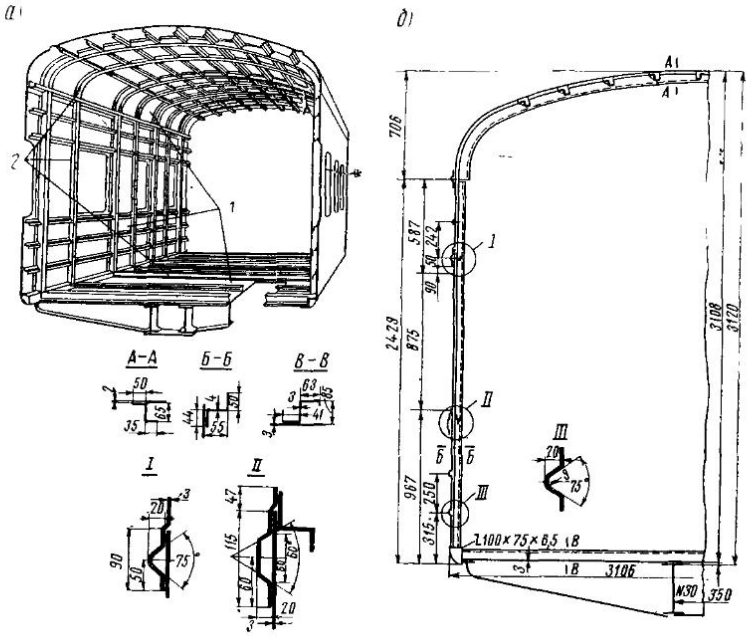


Рис. 20-91. Кузов цельнометаллического пассажирского вагона:
а) общий вид *б)* поперечное сечение

Кузов пассажирского вагона имеет решетку-основу *2*, полностью закрытую наружной тонколистовой обшивкой *1* (рис. 20-91, *а*). Местная жесткость листовой обшивки увеличивается за счет создания гофр. При этом повышается устойчивость тонкостенных элементов под нагрузкой и снижается их коробление от сварки (рис. 20-91, *б*). Кузов вагона собирается и сваривается из предварительно изготовленных крупногабаритных узлов: крыши, боковых стен, настила пола, концевых и тамбурных стен.

Плоские узлы вагона — боковые стенки и настил пола собирают на специальных стендах. Сначала раскладывают и свари-

вают между собой листы обшивки, затем на них с помощью фиксаторов устанавливают элементы жесткости, прижимают к обшивке и прихватывают. Сварку обшивки с элементами жесткости выполняют посредством самоходных портальных двухточечных машин с двусторонним подводом тока. Верхняя сварочная головка перемещается по рельсобалкам портала на катках, ее электроды имеют установочный и рабочий ход. Нижняя сварочная головка отличается от верхней только тем, что ее электроды не имеют установочного хода, но при рабочем ходе перемещаются до упора, обеспечивающего их установку на уровне свариваемого изделия. Схема поточной линии сварки боковой стенки вагона показана на рис. 20-92. Два сварочных агрегата портальной конструкции *1* установлены в промежутках рольганговой линии *2*. Каждый из них имеет возможность перемещаться

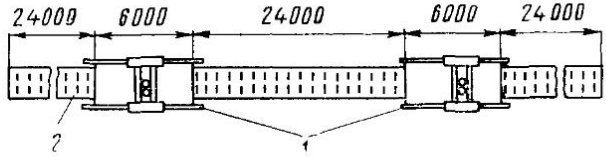


Рис. 20-92. Схема поточной линии контактной сварки боковых стен вагона

по рельсам на 5—6 *м*. Собранный узел укладывают на рольганг перед первым сварочным агрегатом. Самоходный портал наезжает на боковую стенку, зажимает ее между электродами и перемещает на длину 5—6 *м*. Обратным ходом сварочный агрегат приваривает продольные элементы к обшивке на этом участке. Затем цикл повторяется, и по мере сварки узел по рольгангу поступает ко второму сварочному агрегату, где подобным же образом производится приварка к обшивке поперечных элементов. Рассмотренная поточная линия сварки боковой стенки с перемещением узла обеспечивает высокую производительность, но требует значительных площадей (рис. 20-92).

Неподвижность узла в процессе сварки позволяет заметно сократить требуемую производственную площадь. Так, на рис. 20-93 показана установка для сварки настила пола вагона, которая перемещается по всей длине неподвижного свариваемого узла, что сокращает длину рабочего участка до 32 *м*. Беспрепятственное перемещение сварочной машины портального типа *1* с двусторонним подводом тока обеспечивается наличием специальных убирающихся опор *5*. По мере выполнения сварки и перемещения портала штанги управления *2*, встречая на пути краны пневматической системы *3* и *4*, автоматически убирают

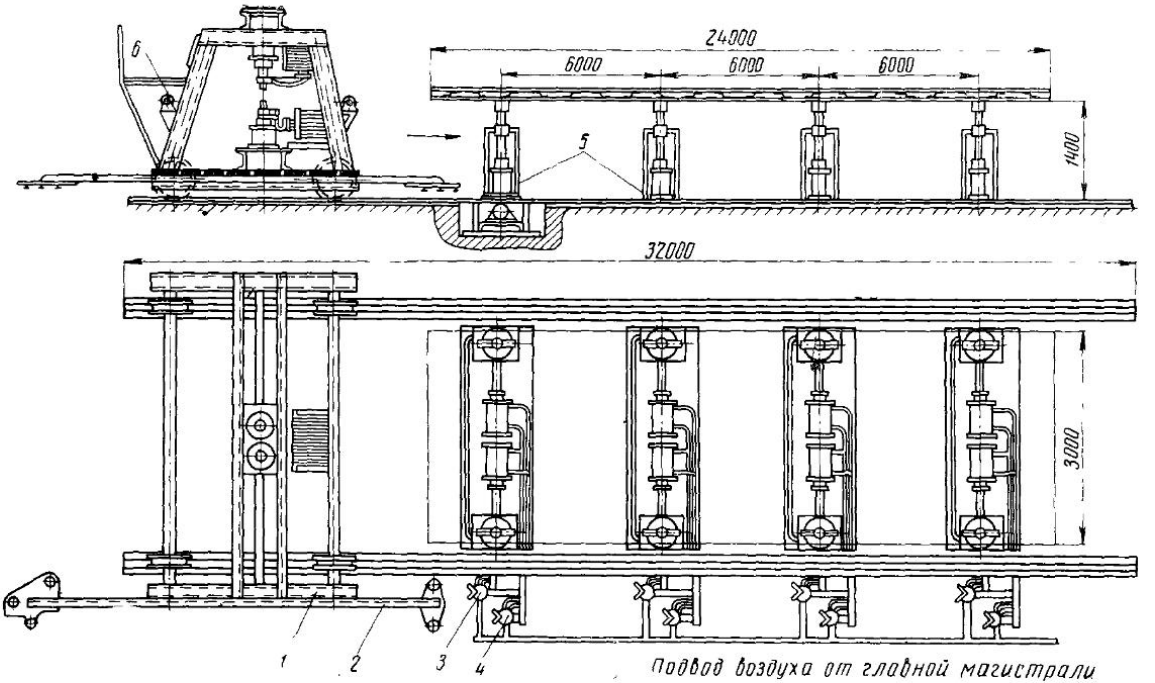


Рис. 20-93. Установка для сварки настила пола вагона

опоры *5*. При этом изделие временно поддерживается направляющими роликами *6* станины портала сварочного агрегата. После прохождения портала опоры поднимаются снова.

Крыша вагона представляет собой корытообразную конструкцию с элементами жесткости Z-образного сечения. Сборка крыши производится в кондукторе (рис. 20-94). Элементы жесткости укладываются в вырезы кондуктора и накрываются листами

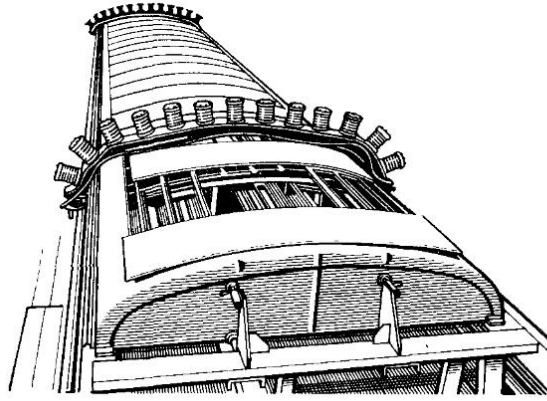


Рис. 20-94. Кондуктор для сборки крыш

обшивки. Пневматическими цилиндрами сборочной скобы, перемещаемой вдоль крыши, листы обшивки прижимаются к обрешетке, прихватываются и свариваются между собой внахлестку

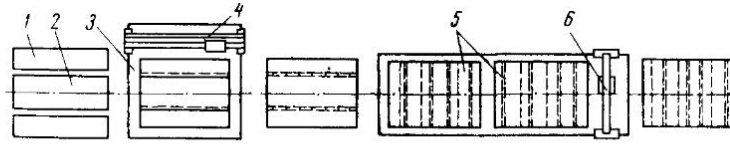
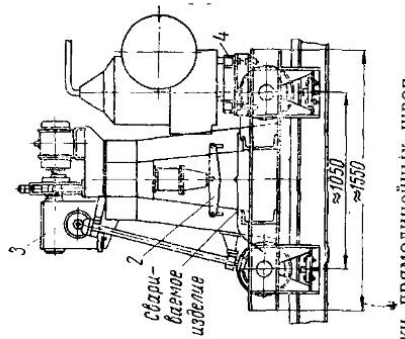


Рис. 20-95. Схема поточной линии сборки и сварки секций крыши электровагона

дуговой сваркой. Затем собранная целиком крыша вагона снимается с кондуктора и направляется для точечной сварки обшивки с элементами жесткости в поточную линию, аналогичную показанной на рис. 20-92. Отличие этой линии от линии сварки боковой стенки заключается в ином устройстве портальной машины, предусматривающей одностороннюю сварку элементов жесткости крыши с обшивкой.

По сравнению со сборкой и сваркой всей крыши вагона целиком, сборка и сварка крыши вагона секциями дает определенное сокращение производственных площадей. Такой прием используется в производстве электровагонов, где крыши моторного, прицепного и головного вагонов монтируют из секций трех типоразмеров длиной по 4,5 *м* каждая, изготавливаемых в одной поточной линии. Схема такой линии показана на рис. 20-95. Полотнище обшивки секции собирают на столе стенда *3*, где по фиксаторам укладывают средний лист *2* и два листа скруглений *1*. Нахлесточное соединение листов выполняют под слоем флюса; для прижатия листов и направления сварочной головки вдоль шва используют самоходный портал *4*. Листы прижимают друг к другу внахлестку (рис. 20-96) траверсами *2* с помощью пневматических прижимов, закрепленных на раме портала *1*. Установочное перемещение портала обеспечивается механизмом *3*, движение сварочной головки происходит по направляющим *4*.



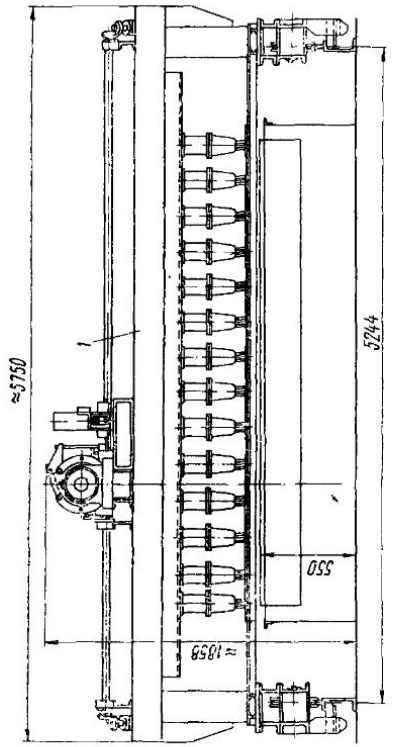


Рис. 20-96. Самоходный портал с прижимной траверсой для сварки прямолинейных швов

Сборку секций выполняют в стапеле *5* (рис. 20-95), который рассчитан на одновременную сборку и сварку четырех разных по конструкции секций: одной крайней, двух средних и одной головной. Дуги крыши раскладывают по медным подкладкам стапеля и прижимают к ним пневмоцилиндрами. На дуги накладывают полотнища обшивки, приварку их выполняют специальной контактной машиной *6* портального типа, пока-

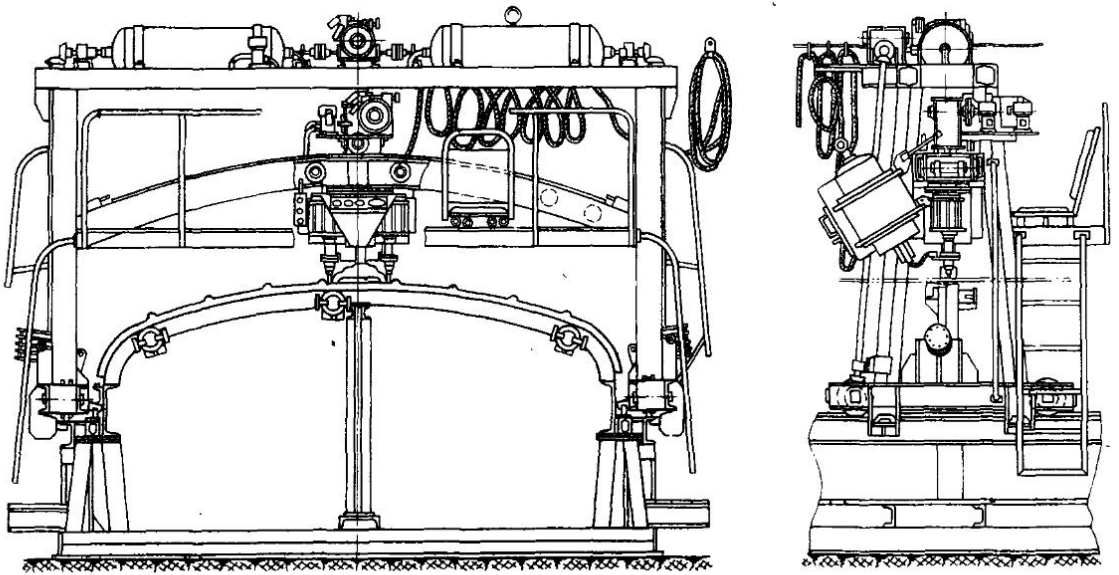


Рис. 20-97. Самоходная двухэлектродная контактная машина для сварки секции крыши

занной на рис. 20-97. Машина перемещается от дуги к дуге с точной установкой и фиксацией ее положения на время сварки. Подвижная двухэлектродная головка перемещается вдоль дуги по криволинейным направляющим портала.

Секции крыши на стапеле можно собирать и сваривать независимо друг от друга, т. е. в то время, как первую секцию собирают, вторую сваривают, а готовую третью снимают со стапеля. Приведенные выше примеры показывают широкое использование специальных контактных машин портального типа с двумя

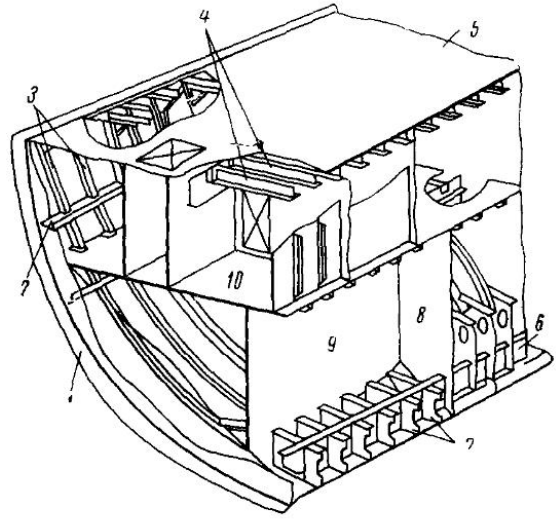


Рис. 20-98. Конструкция корпуса корабля

электродами. Следует отметить возможность эффективного использования и многоточечных машин. Так, например, для точечной сварки боковых стен кузова тепловоза используют многоточечную машину, оборудованную конвейером подачи свариваемого изделия.

Корпус судна (рис. 20-98) состоит из листовых элементов: наружной обшивки *1*, настила верхней палубы *5*, нижней палубы *10*, продольных и поперечных перегородок *8* и *9* и элементов жесткости в виде прокатных профилей и сварных балок: флор *7*, шпангоутов *3*, бортовых стрингеров *2*, бимсов *4*, вертикального киля *6* и т. п. Корпуса всех типов судов в настоящее время выпускают только сварными, при этом широко применяют автоматическую сварку под флюсом.

Ввиду сложного очертания корабля при заготовке элементов особое значение имеет разметка. До последнего времени разметочные работы и изготовление шаблонов в судостроении произ-

водились с использованием плазов и вычерчиванием сечений корабля в натуральную величину. Большая трудоемкость этих работ и необходимость их повторения на каждом заводе заставили искать новые приемы. Применение масштабной разбивки чертежа взамен плаза, фотопроекционной разметки или газорезки по копир-чертежам автоматами с фотоэлектрической копировальной системой позволяет в значительной степени механизировать ручные разметочные работы.

В основе существующих методов постройки судов лежит предварительное изготовление частей корпуса судна в виде сборочных элементов, секций и блоков. Разбивку корпуса на элементы, секции и блоки производят в зависимости от его конструкции с учетом ряда факторов. Каждая отдельная секция должна быть достаточно жесткой. Границы плоских и объемных секций намечают по возможности в районах поперечных переборок симметрично относительно диаметральной плоскости судна. Размеры секций выбирают с учетом габаритных ограничений перемещения их к месту сборки на стапеле, а также грузоподъемности кранов и транспортных средств. По технологическим соображениям разбивка должна предусматривать выполнение возможно большего объема сборочно-сварочных работ в условиях цеха при их максимальной механизации, а также учитывать особенности приемов сборки на стапеле. Так, носовую и кормовую части корпуса обычно выделяют в крупные объемные секции, а в случае использования блочного способа сборки корпус расчленяют поперечными сечениями от палубы до киля.

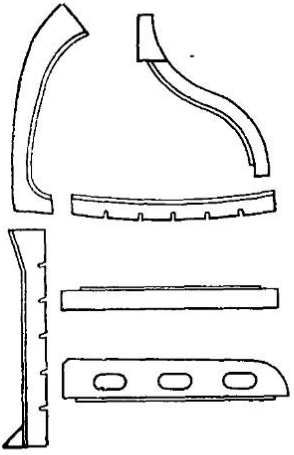


Рис. 20-99. Типы составных сварных балок корпуса

Большинство сборочных элементов состоит из простых листовых деталей или из прокатных и составных балок и рамок, имеющих обычно сечение тавра (рис. 20-99). Для механизированной сборки и автоматической сварки под флюсом прямых и криволинейных балок таврового профиля используют станки типа СТС. Работа таких станков была рассмотрена ранее в главе XVI и на рис. 16-13.

При сборке и сварке листовых полотнищ широко используют электромагнитные стенды. Стенд обычно состоит из нескольких балок *1* с флюсовыми подушками *3* (рис. 20-100). С помощью тележек *13* и рельсовых путей балки *9* передвигают в соответствии с расположением стыков собираемого полотнища. Стойки

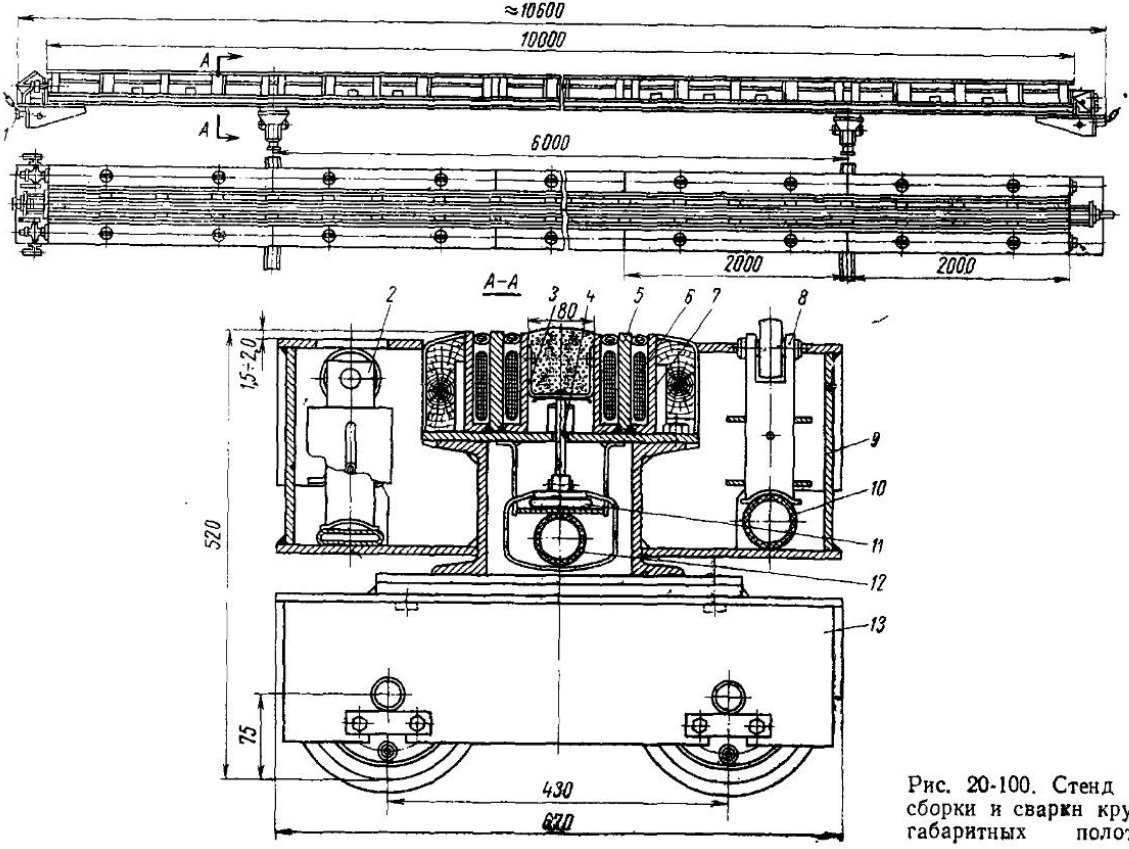


Рис. 20-100. Стенд для сборки и сварки крупногабаритных полотнищ

2 и *8* с роликами для продольного и поперечного перемещения листов могут подниматься или опускаться в зависимости от подачи сжатого воздуха в шланги *10*. Это облегчает перемещение листов при сборке и снятии полотнища после сварки. Собранные стыки фиксируются включением электромагнитов, состоящих из сердечников *5*, катушек *6* и корпусов *7*. При подаче воздуха в шланги *11* толкатели *4* поднимают брезентовый желоб *3* и прижимают флюс к стыку. После сварки уровень флюса опускают подачей сжатого воздуха в шланг *12* с одновременным отключением шланга *11*. Для сварки стыков с обратной стороны кантовку полотнища обычно производят мостовым краном. При толщине листов до 6—8 *мм* полное проплавление и хорошее формирование шва с обеих сторон можно получить и при односторонней сварке на флюсовой подушке стенда без кантовки путем тщательного подбора режима.

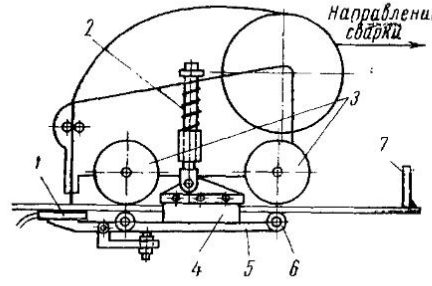


Рис. 20-101. Схема трактора ТС-32

Одностороннюю сварку листов толщиной до 10 *мм* с принудительным формированием обратной стороны шва также выполняют с помощью сварочных тракторов ТС-30 и ТС-32 (рис. 20-101). В этом случае для сборки полотнища используют стеллаж, обеспечивающий свободный доступ к нижней поверхности стыков. Листы собирают с обязательным зазором 2—3 *мм* посредством скоб-планок *7*. Реборды колес *3* входят в зазор и направляют движение трактора. Формирование стыка снизу осуществляется медным охлаждаемым водой ползуном *1*, закрепленным на подвеске *5*. Прижатие роликов подвески *6* к нижней поверхности листов создается пружиной *2* с помощью проходящей через зазор ножевой тяги *4*. По мере продвижения трактора вдоль стыка планки *7* сбивают.

Различают секции плоскостные, с погибью и объемные. Сборку и сварку плоскостных секций осуществляют на плоских стендах. При этом широко применяют способ раздельной сборки и сварки продольного и поперечного набора, позволяющий увеличить объем сварки, выполняемый автоматами (рис. 20-102). На стенд укладывают полотнище, зачищают места установки набора, устанавливают и приваривают набор главного направления (рис. 20-102, *а*). Затем устанавливают набор другого направления (рис. 20-102, *б*) и приваривают к полотнищу полуавтоматами, а соединения набора разных направлений между собой выполняют вручную. После этого производят обрезку припусков

и разделку кромок, а если необходимо, то и правку. Для выравнивания кромок плоскостных секций и повышения их жесткости на время транспортировки часто используют постановку временных жесткостей.

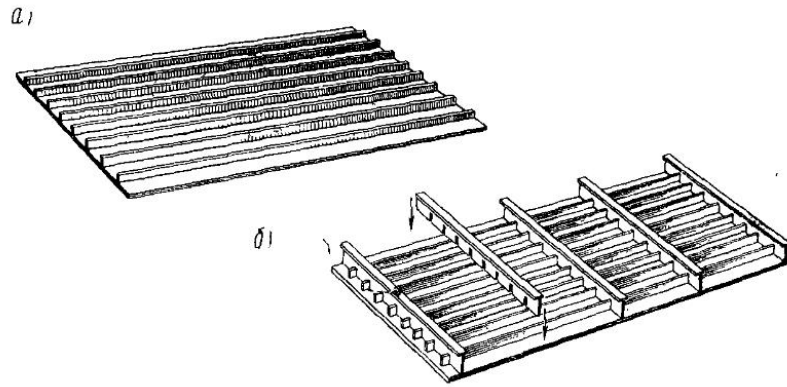


Рис. 20-102. Схема раздельной сборки судового набора

Для сборки секций с погибью используют постели, образуемые набором лекал, закрепленных на жестком основании и воспроизводящих обводы изготовляемой секции (рис. 20-103). Рабо-

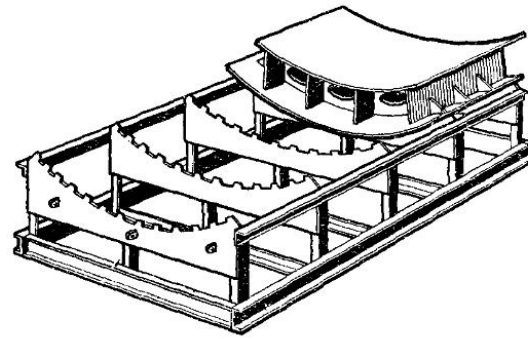


Рис. 20-103. Постель для сборки днищевой секции

чую кромку лекал делают в виде «гребенки» для облегчения обработки; в местах сварных швов предусматривают вырезы. Так как стоимость специальных постелей, обеспечивающих изготовление только определенного типоразмера секции, велика, широкое распространение получили разборные и универсальные

постели. Разборные постели для секций разных размеров и форм собирают из типовых элементов.

Специально для секции определенного типоразмера изготавливают только опорные лекала.

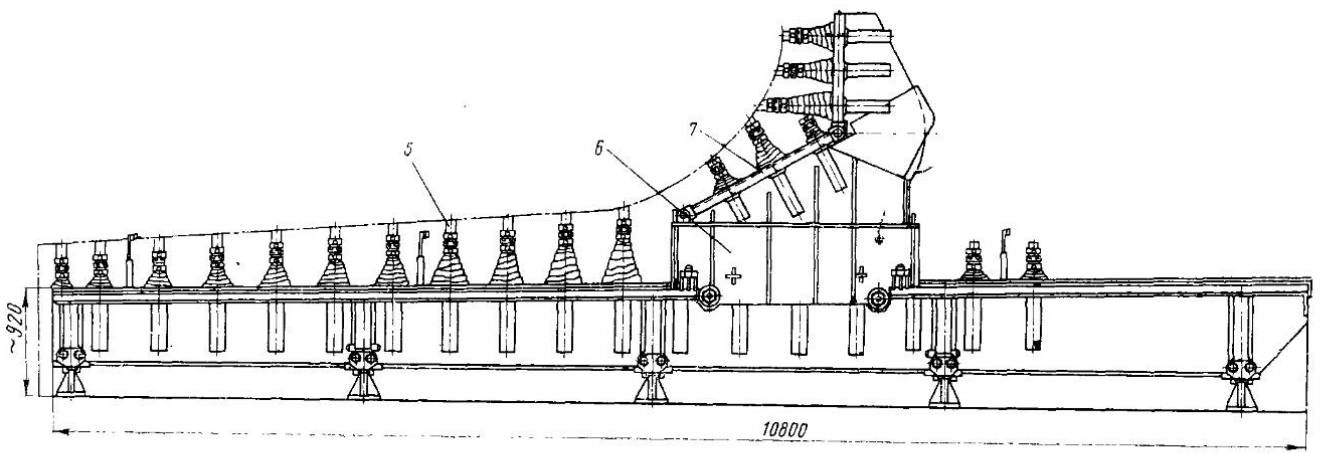
В зависимости от конструкции собираемых секций разборные постели делят на три группы. К первой группе относятся постели для сборки днищевых, палубных и бортовых секций, средней части корпуса, имеющие сравнительно небольшую погибь. Ко второй группе относятся постели для объемных секций оконечностей судов, имеющих обводы с большой кривизной. В третью группу входят постели, предназначенные для сборки палубных секций с малой кривизной, позволяющей изготовлять все секции палубы на одной постели без смены лекал. Настройка лекал по высоте производится в этом случае с помощью телескопических регулируемых стоек.

Пример универсальной постели для сборки и сварки различных по размерам и кривизне днищевых секций показан на рис. 20-104. Постель состоит из рельсовых путей *1*, передвижных лекал *2* и системы их перемещения вдоль оси корпуса *4* с приводом *3*. Предварительная настройка на требуемую кривизну днища производится перестановкой боковых подлекальников *6* и поворотом секций *7* на необходимый угол. После этого по плазовым таблицам осуществляют настройку опор *5*.

Последовательность выполнения сборочно-сварочных операций при изготовлении секций, имеющих кривизну, можно проследить на примере днищевой секции, показанной на рис. 20-105. Листы обшивки собирают с минимальными зазорами, прихватывают друг к другу и крепят к лекалам постели. Сварку стыков выполняют на весу автоматами под флюсом. Затем производят сборку и приварку набора, элементов жесткости, устанавливают и приваривают полотнище второго дна, сваренное отдельно. Для удобства выполнения швов автоматической сваркой под слоем флюса постели иногда снабжают флюсовыми подушками, а также делают их наклоняющимися или поворотными. После завершения сварки секции обшивка освобождается от закреплений, и секция снимается с постели. Если ее сварка производилась без поворота постели, то секцию кантуют, огневой строжкой зачищают корни стыковых швов обшивки и производят их подварку.

Для сборки развитых объемных секций оконечностей корпуса применяют жесткие постели — кондукторы, которые поддерживают собираемую секцию не только снизу, но и с боков по всей высоте. Иногда объемные секции собирают на плоских сборочных стендах на базе одного из плоских элементов секции.

Отдельные плоские и объемные секции перед подачей на общую сборку корпуса часто укрупняют в блок-секции. Их изго-


5
6
7
~920
10800

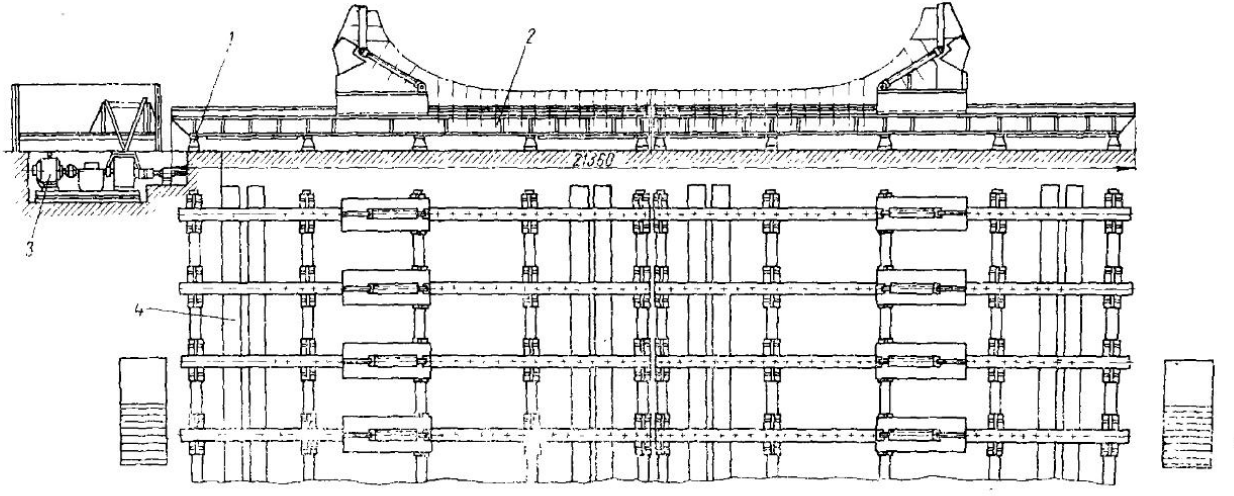


Рис. 20-104. Универсальная постель для сборки и сварки днищевых секций

тавливают либо на постелях-кондукторах, либо на сборочных тележках, которые одновременно используют и для транспортирования собранного блока на стапельное место.

При серийной постройке малых и средних судов общую сборку корпусов выполняют поточно-позиционным методом. С помощью специальных средств передвижения строящиеся суда перемещаются с одной позиции поточной линии на другую, причем на каждой из них выполняются определенные объемы работ за одинаковый промежуток времени с широким применением специальной оснастки. При отсутствии поточных линий применяют поточно - бригадный метод серийной постройки судов, когда каждое судно остается на месте, а специализированные бригады последовательно и ритмично переходят с одного судна на другое, выполняя на каждом из них определенные работы.

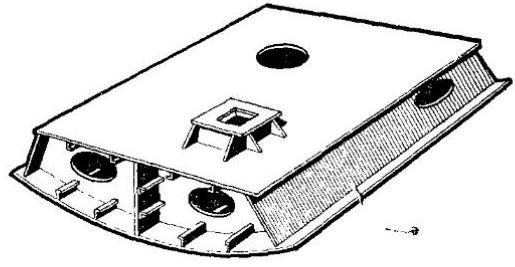


Рис. 20-105. Днищевая объемная секция

Сварочные деформации, возникающие при изготовлении корпуса, в значительной степени определяются схемой сборки. Так, например, если производить сборку «по горизонталям», т. е. собирать сначала днищевые секции по всей длине, затем устанавливать все секции двойного дна и т. д., то при сварке горизонтов, следующих за днищем, концы нижнего горизонта будут подниматься, вызывая общее искривление корпуса. Поэтому целесообразно сборку вести короткими участками или даже целыми блоками от киля до палубы. Сборку из крупногабаритных секций и блоков осуществляют тремя способами:

1. Пирамидальным (рис. 20-106), при котором корпус последовательно формируется на стапеле из секций. Сначала устанавливают и сваривают первую, вторую и третью днищевые секции, затем следующие смежные секции, образующие пирамиду. При сравнительно небольшой длине эта первая пирамида уже имеет достаточно жесткое сечение, что снижает общие деформации корпуса. Работы по длине судна сначала ограничиваются небольшим районом, а в дальнейшем продвижение сварки идет уступами в нос и корму.

2. Островным, при котором на стапеле установка и сварка секций ведется одновременно в нескольких районах, называемых островами, причем каждый «остров» собирается пирамидальным способом (рис. 20-107). Этот способ позволяет вести работы

широким фронтом; его используют при сборке наиболее крупных судов.

3. Блочным, позволяющим производить формирование корпуса из отдельных частей, в которых установлены механизмы, трубопроводы, оборудование и т. п. (рис. 20-108).

Изготовленные блоки на специальных тележках подаются на стапельное место и центрируются с помощью гидравлических

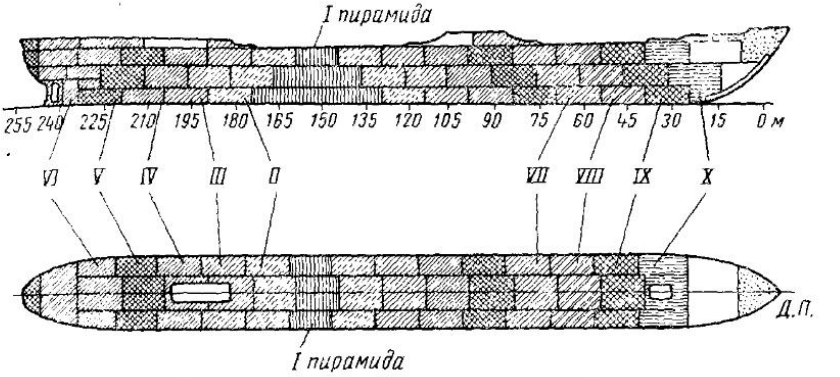


Рис. 20-106. Пирамидальный способ сборки судна

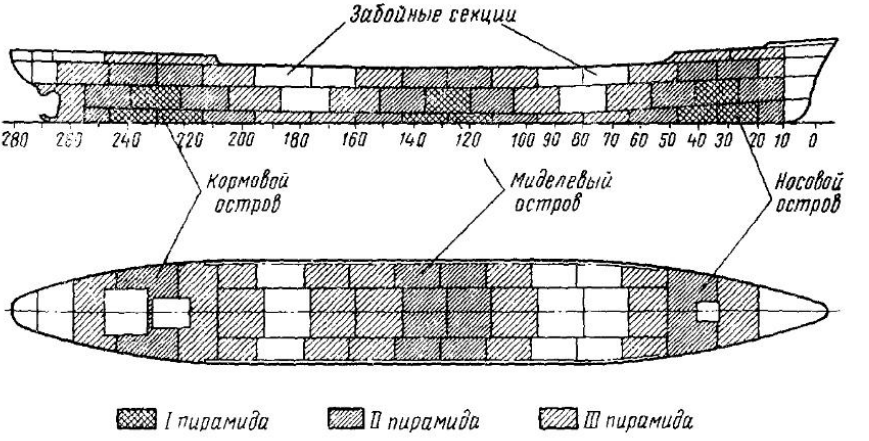


Рис. 20-107. Островной способ сборки судна

домкратов. По сравнению с другими способами сборки, блочный способ обеспечивает наименьшие деформации. Его используют в основном при серийной постройке судов среднего размера, однако практика показывает возможность и целесообразность блочной постройки и больших судов.

Сварку стыка начинают после окончательной сдачи сборочных работ по всему стыку. Вертикальные швы целесообразно сваривать электрошлаковой сваркой. При ручной сварке стыка одновременно несколько пар сварщиков I, II, III, IV, V выполняют симметрично расположенные участки швов *1 — I*, *2 — I*,

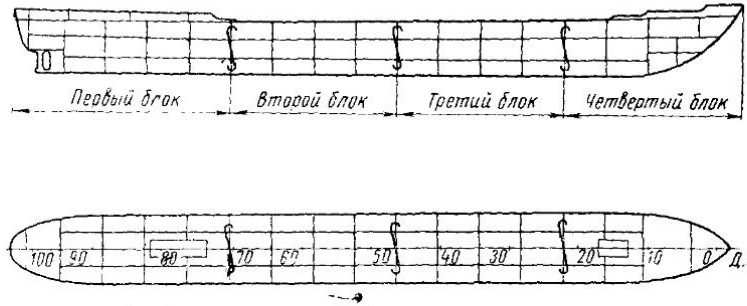


Рис. 20-108. Блочный способ сборки корпуса судна на стапеле

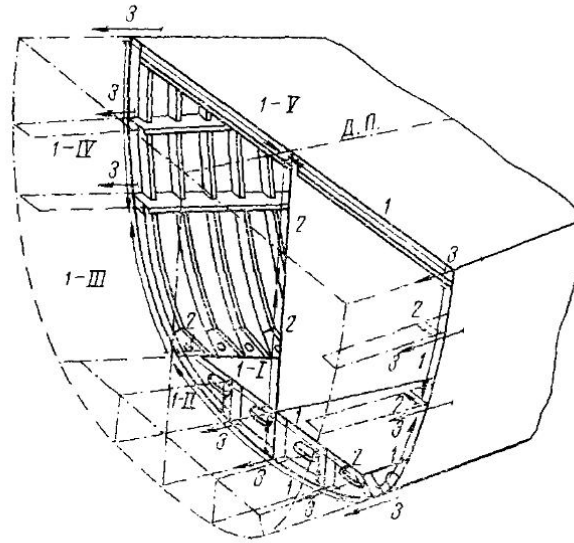


Рис. 20-109. Схема порядка сварки межсекционного стыка блоков

1 — II, *2 — II* и т. д. (рис. 20-109). Последовательность операций обычно следующая: а) заваривают монтажный стык *1* по всему периметру с внутренней стороны; б) после зачистки корня шва заполняют разделку с наружной стороны корпуса; в) сваривают стыки *2* продольного и поперечного набора, выполняют привар-

ку *3* набора к обшивке. Правка местных деформаций как при изготовлении секций, так и на стапеле, осуществляется нагревом газовой горелкой. На стапеле правка ребристости и волнистости производится после установки и закрепления секции в жестком контуре. Местные угловые деформации полотнищ толщиной от 4 до 10 *мм* правятся нагревом обшивки над каждым ребром жесткости со стороны, противоположной приваренному набору. Правка полотнищ толщиной 3 *мм* и менее производится нагревом полос между ребрами жесткости на расстоянии 100 *мм* от них.

ГЛАВА XXI

СВАРНЫЕ ДЕТАЛИ МАШИН (РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ)

§ 1. ТИПЫ СВАРНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Детали машин сваривают из заготовок, получаемых самыми различными способами.

Конструкций, свариваемых из проката, весьма много. К ним относятся рамы (рис. 21-1), станины, барабаны, редукторы, зубчатые колеса (рис. 21-2), штанги с проушинами (рис. 21-3), тяги и другие машиностроительные детали (рис. 21-4).

На рис. 21-5 приведены сварные конструкции подшипниковых опор разных систем. Все они выполнены из листового проката с усилением корпусов приваркой ребер жесткости. Замена литых деталей машин сварными позволила получить экономию металла до 50%.

Примерами конструкций, изготовленных из поковок, служат различные валы (рис. 21-6). Применение составных поковок упрощает изготовление деталей машин, по сравнению с целыми, нередко уменьшает объем механической обработки и способствует удешевлению производства.

При производстве сварных конструкций рекомендуется применять листовой прокат, фасонные профили, в особенности тонкостенные, гнутые, прессованные, штампованные заготовки, обеспечивающие возможность применения легких сварных изделий повышенной жесткости и устойчивости.

Ряд примеров штампо-сварных изделий можно найти в авиационных конструкциях, автостроении, строительной промышленности и других отраслях. Область применения штампо-сварных конструкций непрерывно расширяется. Сварку литых деталей применяют для упрощения технологического процесса литья.

Вес сварных стальных конструкций часто бывает в 2 раза меньше, чем чугунных при одинаковых прочности и жесткости. Таким образом, экономичность замены чугунных отливок сварными стальными конструкциями очевидна.

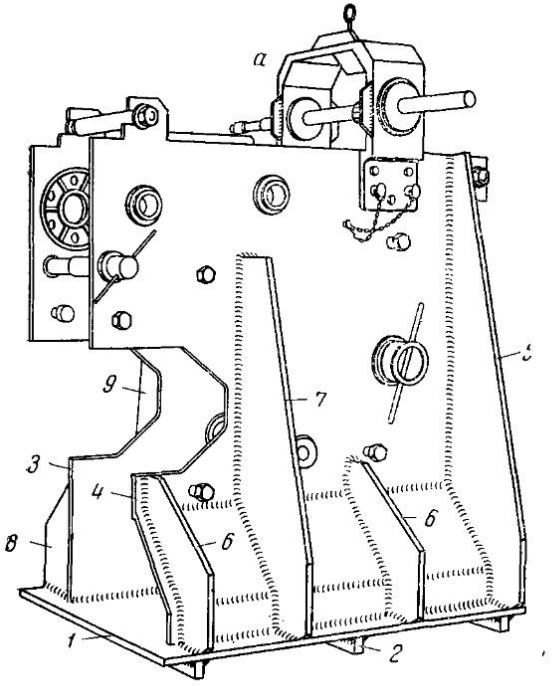


Рис. 21-1. Сварная рама механических ножниц

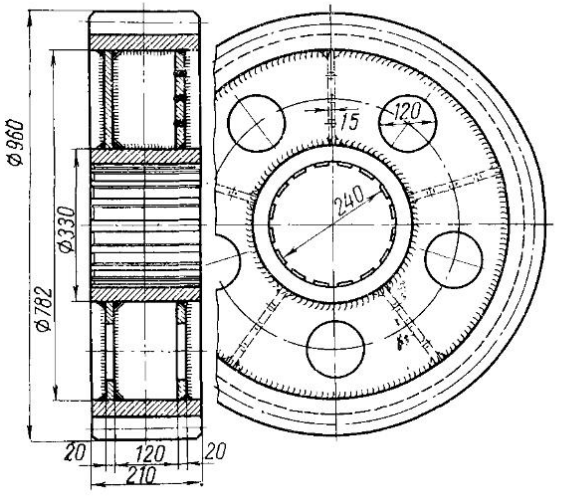


Рис. 21-2. Двустепчатое сварное зубчатое колесо

В настоящее время в машиностроении переводят на сварные изделия металлургическое (в частности, трубопрокатное), крановое и другое оборудование, заменяют чугунные станины электродвигателей, металлорежущих и других видов станков, редукторов и др.

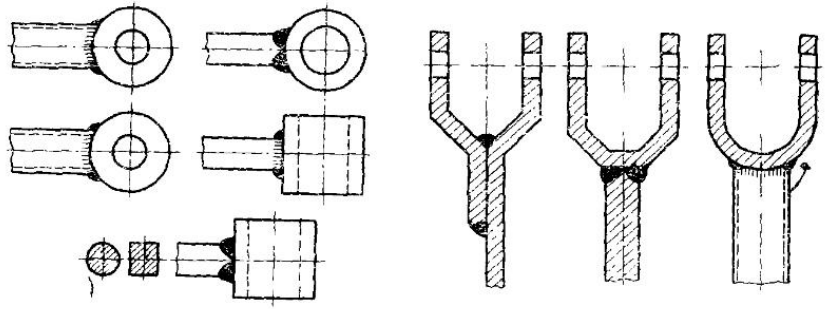


Рис. 21-3. Штанги с проушинами

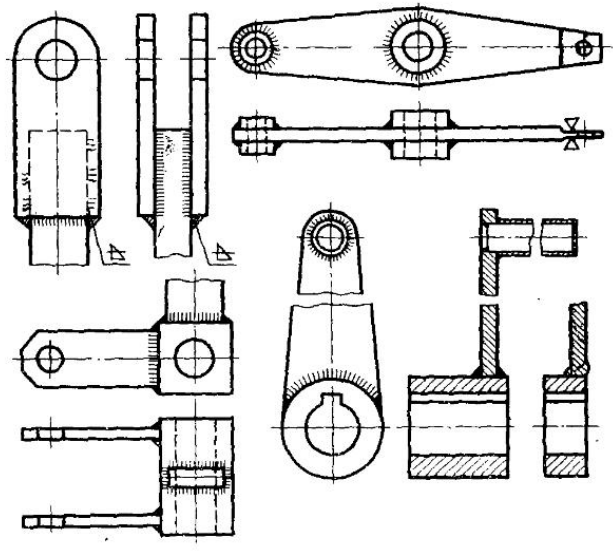


Рис. 21-4. Сварные тяги

План развития народного хозяйства требует создания новых конструкций тяжелого машиностроения (турбин, котлов, металлургического и станочного оборудования и др.), изготовление которых литьем, ковкой и штамповкой представляет большие, иногда непреодолимые трудности. Применение электрошлаковой

сварки открыло путь к созданию комбинированных сварных изделий из отливок, поковок и проката экономичных по весу, с минимальными припусками на механическую обработку,

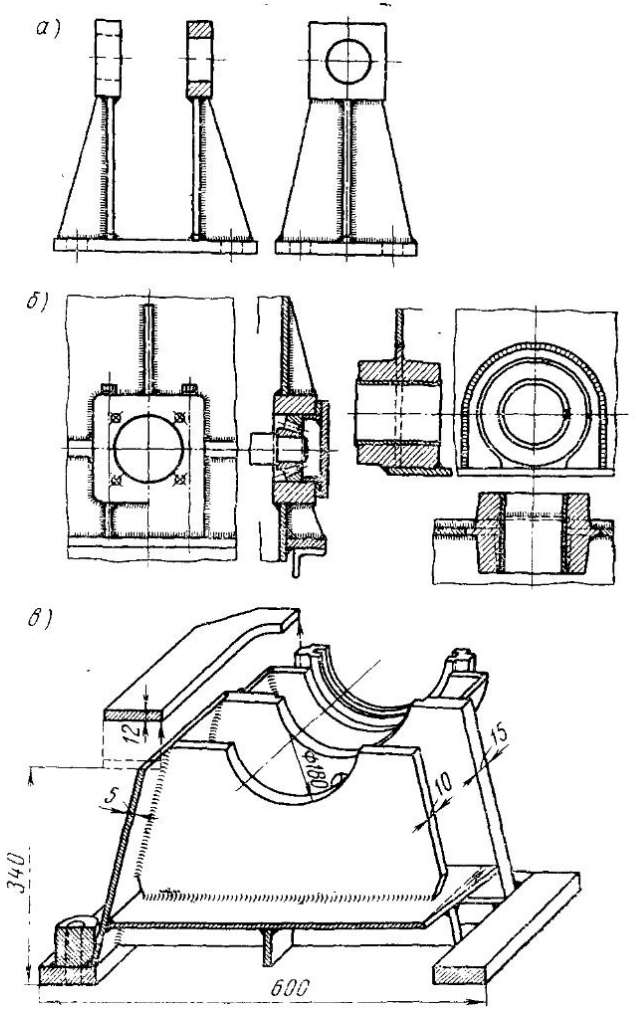


Рис. 21-5. Сварные подшипниковые опоры

а главное, позволяющих изготовлять их на менее мощном литейном и кузнечном оборудовании (рис. 21-7).

Разработана классификация толстостенных изделий, в которых особенно рекомендуется электрошлаковая сварка.

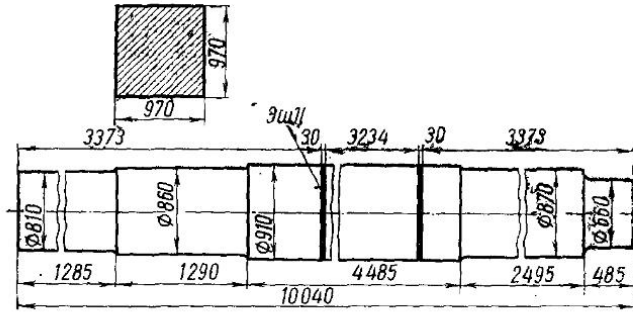


Рис. 21-6. Сварной вал шахтной подъемной машины

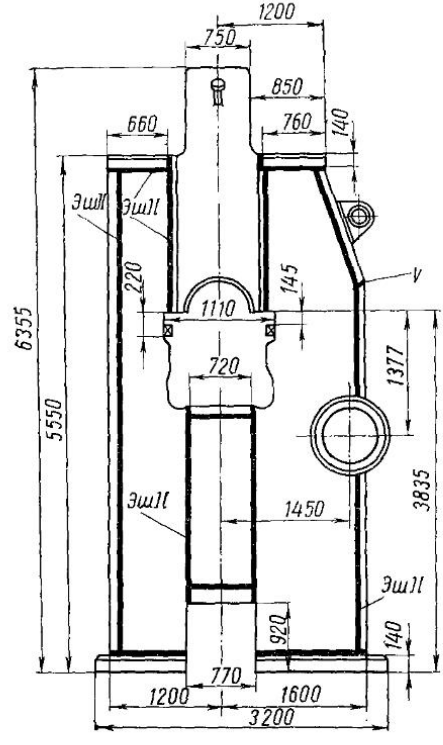


Рис. 21-7. Верхняя сварная станина ковочно-штамповочного пресса

При проектировании деталей машин следует учитывать следующие обстоятельства:

1. Диапазон применяемых марок сталей широк и не ограничивается малоуглеродистыми и низколегированными конструкционными сталями. Нередко применяют стали в термически обработанном состоянии, высоколегированные и т. п. К качеству сварки предъявляются высокие требования.

2. В деталях машин весьма часто рабочие размеры элементов определяются условиями не прочности, а жесткости. Поэтому при переводе машиностроительных конструкций с литья на сварку нередко рабочие напряжения принимаются значительно ниже допускаемых.

3. В деталях машин большое значение имеет точность изготовления. Остаточные напряжения в сварных конструкциях, находящихся в эксплуатации, с течением времени меняют свою величину. Вследствие этого в конструкции появляются деформации. Для устранения этого явления сварные изделия, изготовляемые и обрабатываемые по высшим классам точности, необходимо после сварки подвергать термической обработке (отпуску в нагревательных печах). Механическую обработку сварных деталей машин следует, как правило, производить после отпуска, однако очень часто их обрабатывают, не производя вовсе отпуска. Только при тщательной отработке технологии сварки можно допускать «горячий монтаж», т. е. детали предварительно механически обрабатывать, а затем собирать и сваривать между собой.

4. В зонах сварных соединений некоторых низколегированных сталей имеет место процесс замедленного распада аустенитной структуры, вызывающий деформирование конструкции в течение некоторого времени. Процесс деформирования постепенно затухает. Деформирование в функции времени сварных конструкций из малоуглеродистой и аустенитной стали не происходит.

В изделиях из сталей других марок деформирование продолжается в течение более или менее продолжительного времени, а потом прекращается вовсе. Деформирование соединения меняет размеры конструкции.

Существуют разные мероприятия для устранения этого вредного явления. Одно из них — применение рациональной термической обработки изделия после сварки. Снятие остаточных напряжений полезно, так как при этом не будут возникать пластические деформации при суммировании напряжений и будет ускоряться процесс стабилизации структур.

5. Детали машин часто имеют небольшие размеры, но выпускаются в значительном количестве. Поэтому следует рекомендовать высокопроизводительную сварку: контактную, автоматическую под слоем флюса, в среде углекислого газа и др.

Помимо процессов сварки и пайки, в деталях машин большое значение приобретают процессы наплавки. Наплавка применяется не только для восстановления изношенных поверхностей конструкций при их ремонте, но и с целью придания их поверхностям заданных свойств. Так производится наплавка быстрорежущей стали на поделочную с целью получения недорогих износостойких инструментов; наплавка твердых сплавов на трущиеся поверхности в машинах и механизмах. При проектировании процессов наплавки следует учитывать применение наиболее распространенных в промышленности способов (под слоем флюса, специальными электродами), а также новых способов, например взрыва.

Применяют также поверхностную закалку кислородно-ацетиленовым пламенем и ТВЧ. Этот процесс несколько труден, так как требует тщательной технологической отработки. Тем не менее, закалка находит разностороннее применение на машиностроительных заводах при обработке шестерен, бандажей, крановых бегунов и т. п.

Детали машин часто воспринимают действие динамических нагрузок. Это требует проектирования конструкций с возможным устранением концентраторов напряжений с учетом динамического эффекта. Его учитывают введением динамического коэффициента η. Расчетное усилие при этом равно

$$R = P_{\text{пост}} + P_{\text{пол}}\eta, \qquad (21.1)$$

где $P_{\text{пост}}$ — усилие от постоянных нагрузок;
$P_{\text{пол}}$ — усилие от полезных нагрузок.

Значения η принимаются в зависимости от вида машины и характера ее работы:

$\eta = 1 \div 1{,}1$ — в электромашинах, шлифовальных станках, ротационных компрессорных турбинах;

$\eta = 1{,}2 \div 1{,}5$ — в двигателях внутреннего сгорания поршневых насосах и компрессорах;

$\eta = 1{,}5 \div 2{,}0$ — в волочильных станках, рычажных прессах, пильных рамах;

$\eta = 2{,}0 \div 3{,}0$ — в прокатных станах, камнеломных машинах.

Помимо увеличения заданных значений статических усилий, при проектировании деталей машин производится снижение допускаемых напряжений с учетом вибрационного действия на деталь. Это снижение допускаемых напряжений в основном металле производится с учетом комплекса факторов, рассматриваемых в специальных курсах применительно к каждой отрасли техники.

Допускаемые напряжения в сварных соединениях деталей машин снижаются относительно допускаемых напряжений основного металла путем умножения $[\sigma]_р$ на коэффициент γ, вычис-

ляемый в зависимости от эффективного коэффициента концентрации сварного соединения $K_э$ (см. § 7, гл. X).

Таким образом, величина расчетного сечения шва при растяжении элементов

$$F_{тр} = \frac{P_{пост} + \eta P_{пол}}{[\sigma']_р \gamma}. \qquad (21.2)$$

Аналогичным образом

$$W_{тр} = \frac{M_{пост} + \eta M_{пол}}{[\sigma']_р \gamma}, \qquad (21.2')$$

где $[\sigma']_р$ — допускаемое напряжение в шве при растяжении;

γ — коэффициент, учитывающий вибрационный характер нагрузок.

В деталях машин может быть полезным применение пайки, например, в телескопических соединениях трубчатых элементов разных диаметров, в элементах, соединяемых внахлестку и втавр, при сложных геометрических формах (в сотовых конструкциях, рис. 4-44, *е*) и др., при которых наложение сварных швов оказалось бы затруднительным.

§ 2. БАРАБАНЫ

Барабаны используют в шаровых мельницах, в центрифугах, но особенно часто их применяют в грузоподъемных машинах и шахтных подъемниках. Размеры барабанов различны. Диаметры их колеблются в широких пределах — от нескольких десятков миллиметров до нескольких метров. Длина барабана зависит от его назначения. Толщина листов, образующих барабан, может достигать 75 *мм* и более.

В большинстве случаев барабан представляет собой сварную конструкцию, изготовленную из листов. Однако в некоторых изделиях основой барабана служит каркас, сконструированный из профильного материала. Каркас представляет собой пространственную жесткую систему, к которой приваривают барабанную обшивку. Такие конструкции встречаются сравнительно редко и главным образом в крупных шахтных подъемниках.

Барабаны соединяют с торцовыми стенками (днищами). Последние представляют собой плоские круглые листы, к которым приварены цапфы. В одних конструкциях цапфы барабанов насажены на валы, не имеющие разрывов (рис. 21-8, *а*), в других — на валы с разрывом (рис. 21-8, *б*). Для барабанов малых диаметров используют трубы или отливки, для средних и больших диаметров корпуса барабанов вальцуют из одного или нескольких листов.

Рассмотрим схему конструкции барабана шахтного подъемника. Для удобства навивки каната на поверхности барабана

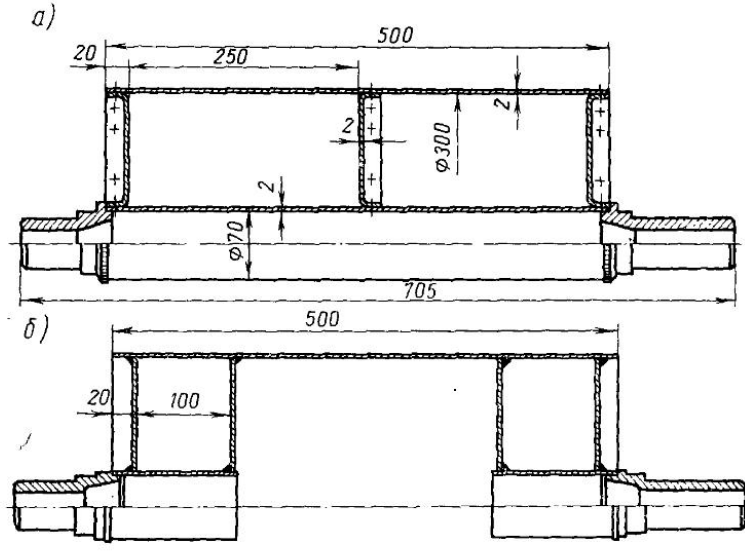


Рис. 21-8. Конструкции сварных барабанов

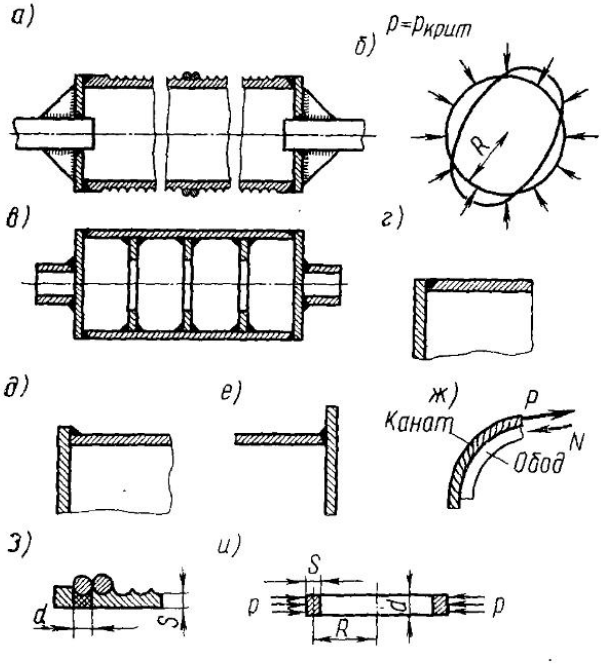


Рис. 21-9. К расчету сварных барабанов: *а*) общий вид; *б*) при потере устойчивости *в*) усиление кольцевыми ребрами жесткости; *г, д, е*) соединения цилиндрической части с торцевой стенкой; *ж*) к определению усилий в барабане от натяжения троса; *з*) к определению рабочей толщины стенки; *и*) устойчивость кольца от *P*

предусматривают канавки, соответствующие диаметру этого каната (рис. 21-9, *а*). Толщина листов барабана должна быть значительной, чтобы канавки не могли ослабить сечение барабана. Канат вызывает в барабане сжатие. Если напряжения сжатия превзойдут величину, которая называется критической, то оболочка потеряет устойчивую форму равновесия и выпучится (рис. 21-9, *б*).

Во избежание потери устойчивости повышают жесткость оболочки, для этого приваривают кольцевые элементы жесткости: полосы, швеллеры, приваренные на ребро (рис. 21-9, *в*), различные штампованные профили. Все соединения листов должны производиться встык продольными и поперечными швами на автоматах под слоем флюса.

Соединения барабана с торцовой стенкой весьма ответственны, так как передают рабочие усилия значительной величины. Наиболее рациональным является соединение барабана со стенкой, приведенное на рис. 21-9, *г*, допускается соединение угловыми швами, показанное на рис. 21-9, *д* и с подготовкой кромок, приведенное на рис. 21-9, *е*.

Расчет прочности барабана производят на сжатие, изгиб и кручение.

Рассмотрим элемент обода под канатом (рис. 21-9, *ж*). Усилие в ободе N уравновешивает силу P, приложенную к канату. Поэтому напряжение сжатия в ободе равно

$$\sigma = \frac{P}{ds}, \tag{21.3}$$

где d — ширина обода, равная диаметру каната;

s — толщина обода.

Рассмотрим, в какой степени сжимающие напряжения могут быть опасны для обода с точки зрения потери устойчивости. Допустим, что труба, не имеющая торцовых стенок, сжимается нагрузкой, равномерно распределенной по ее окружности (рис. 21-9, *и*). Из теории упругости известно, что потеря устойчивости наступает при нагрузке

$$p_{кр} = \frac{3EJ}{R^3}, \tag{21.4}$$

где E — модуль упругости;

J — момент инерции сечения стенки трубы относительно собственной оси;

R — радиус трубы.

Если принять длину трубы, равной d, а толщину стенки s (рис. 21-9, *з*), то

$$J = \frac{ds^3}{12}.$$

Таким образом, нагрузка определится формулой

$$p_{кр} = \frac{Ed}{4}\left(\frac{s}{R}\right)^3. \qquad (21.5)$$

Установим зависимость между P и p. В § 1 гл. XIX показано, что в цилиндрическом теле, нагруженном по поверхности нагрузкой p, образуется усилие

$$N = P = pR. \qquad (21.6)$$

Подставим вместо p его значение из формулы (21.5), тогда получим

$$P_{кр} = \frac{EdR}{4}\left(\frac{s}{R}\right)^3. \qquad (21.7)$$

Если принять коэффициент запаса на устойчивость, равным 2, то допускаемая сила по устойчивости барабана выразится формулой

$$P_{доп} = \frac{EdR}{8}\left(\frac{s}{R}\right)^3. \qquad (21.8)$$

Напряжение в барабане, допустимое с учетом устойчивости, составляет

$$\sigma_{расч} < 0{,}5\ [\sigma]_{кр}. \qquad (21.9)$$

Торцовые стенки повышают устойчивость барабана, по сравнению с ее допустимым значением $P_{доп}$, полученным по формуле (21.8). Если $P_{расч} > 0{,}5P_{кр}$, то барабан следует усилить постановкой кольцевых элементов жесткости.

Пример расчета 1. Требуется из условия устойчивости определить необходимую толщину листов барабана, у которого радиус $R=30$ *см*, $d=2$ *см*, $P=2000$ *кГ*, $E=2\cdot10^6$ *кГ/см*^{2} (рис. 21-10).

По формуле (21.8) находим

$$\frac{R}{s} = \sqrt[3]{\frac{EdR}{8P}} = \sqrt[3]{\frac{2\cdot10^6\cdot2\cdot30}{8\cdot2000}} = 19{,}6;$$

откуда

$$s = \frac{30}{19{,}6} = 1{,}6\ см = 16\ мм.$$

Напряжение сжатия в оболочке определяется по формуле (21.3)

$$\sigma = \frac{P}{ds} = \frac{2000}{2\cdot1{,}6} = 625\ кГ/см^2.$$

Если углубление канавки равно 10 *мм*, то полная толщина листа барабана равна 16+10=26 *мм*.

Кроме проверки на устойчивость, оболочка должна быть проверена также на прочность в зависимости от величин изгибающего и крутящего моментов.

Наибольший изгибающий момент имеет место в середине пролета

$$M = \frac{Pl}{4},$$

где l — расстояние между опорами барабана.

Напряжение от изгиба равно

$$\sigma = \frac{M}{W}.$$

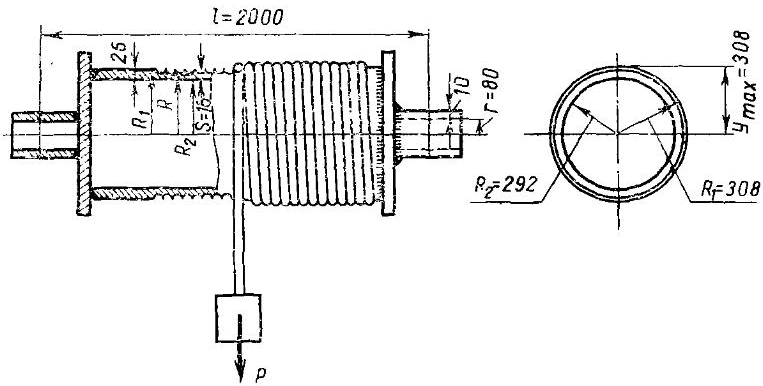


Рис. 21-10. К примеру расчета прочности сварного барабана

Момент сопротивления барабана находится так же, как в кольцевом сечении

$$W = \frac{J}{R_1},$$

где R_1 — внешний радиус.

Величина крутящего момента зависит от конструкции привода. Если момент, вращающий вал, передается на него с одной стороны, то

$$M_{кр} = PR.$$

Напряжение от кручения равно

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_{кр}},$$

где $W_{кр}$ — полярный момент сопротивления.

В большинстве случаев напряжения от изгиба и кручения в барабанах незначительны по сравнению с напряжениями сжатия.

Пример расчета 2. Допустим, что длина барабана, рассмотренного в предыдущем примере, $l=2000$ *мм*.

Определим момент, вызванный в барабане изгибом

$$M = \frac{Pl}{4} = \frac{2000 \cdot 200}{4} = 100\,000 \ кГ \cdot см.$$

Момент кручения при двигателе, находящемся с одной стороны вала, составит

$$M_{кр} = PR = 2000 \cdot 30 = 60\,000 \ кГ \cdot см.$$

Осевой момент инерции кольца равен

$$J = \frac{\pi}{4} (R_1^4 - R_2^4).$$

Принимаем для упрощения расчета $R_1 = R_2 + s$.

Раскладывая полученное выражение для R_1 по биному Ньютона, получим

$$J = \frac{\pi}{4} (4 \cdot 29{,}2^3 \cdot 1{,}6 + 6 \cdot 29{,}2^2 \cdot 1{,}6^2 + 4 \cdot 29{,}2 \cdot 1{,}6^3 + 1{,}6^4) = 135\,740 \ см^4.$$

Напряжение от изгиба равно

$$\sigma = \frac{100\,000}{135\,740} \cdot 30{,}8 = 23 \ кГ/см^2.$$

Полярный момент инерции равен удвоенному осевому моменту — 271 480 $см^4$. Напряжение от кручения составляет

$$\tau = \frac{600\,000}{271\,480} \cdot 30{,}8 = 67 \ кГ/см^2.$$

Напряжения ничтожно малы.

Допустим, что внутренний радиус цапфы $r=60$ *мм* и толщина ее $s=10$ *мм*.

Полярный момент инерции поперечного сечения цапфы равен

$$\tau = \frac{\pi}{2} (4 \cdot 8^3 \cdot 1 + 6 \cdot 8^2 \cdot 1^2 + 4 \cdot 8 \cdot 1^3 + 1^4) = 3864 \ см^4.$$

Напряжение от кручения в цапфе и в шве, соединяющем цапфу с торцовой стенкой, составит

$$\tau = \frac{60\,000}{3864}\ (8 + 1) = 140\ кГ/см^2,$$

что вполне допустимо.

В крупногабаритных барабанах успешно применяют соединения, свариваемые электрошлаковой сваркой. На рис. 21-11 изо-

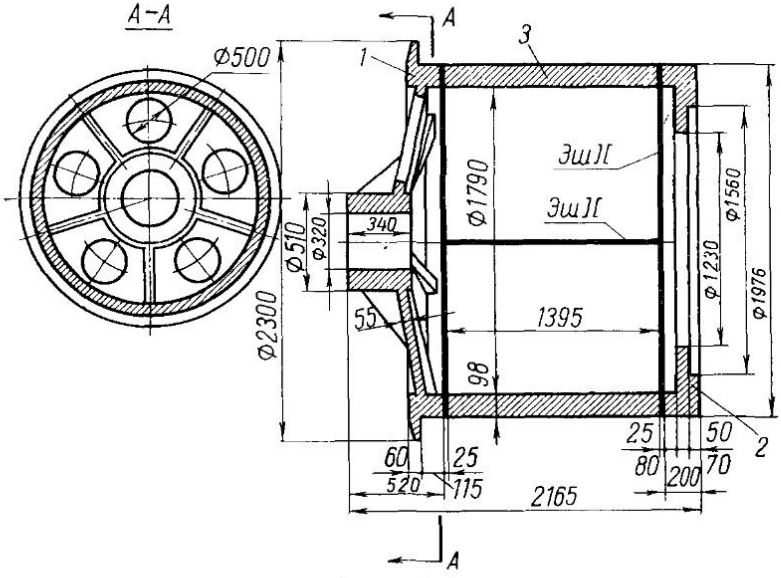


Рис. 21-11. Сварной барабан лебедки шагающего экскаватора ЭШ-25-100

бражена сварная конструкция барабана лебедки шагающего экскаватора ЭШ-25-100. Толщина его стенок 98 *мм*, наружный диаметр 1976 *мм*. Ступица барабана *1* и фланец *2* представляют собой отливки из стали 25Л. Полуобечайки *3* изготовлены из стали 22Г. Соединения ЭШ свариваются электрошлаковой сваркой. Отливки *1* и *2* перед механической обработкой подвергаются термической обработке. После выполнения сварочных работ весь барабан снова подвергается термической обработке. Его чистый вес 10,1 *Т*.

§ 3. КОРПУСА РЕДУКТОРОВ

Сварные корпуса редукторов представляют собой жесткую коробчатую конструкцию. В сварном исполнении такие конструкции получаются значительно легче литых, так как стенки могут

быть более тонкими с постановкой элементов жесткости, к показано на рис. 21-12.

Сопоставление весов литых и сварных редукторов приведено в табл. 21.1. При индивидуальном и мелкосерийном произво

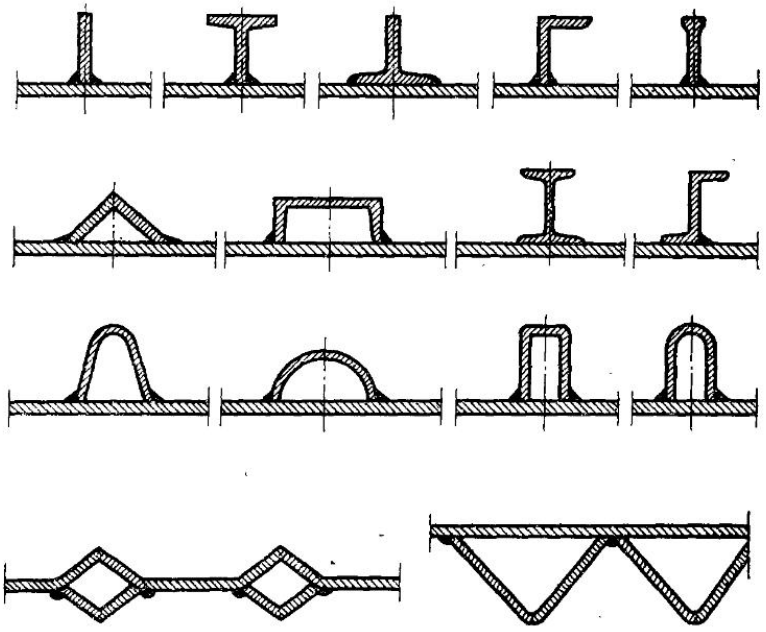


Рис. 21-12. Усиление вертикальных стенок редуктора

стве сварные корпуса редукторов оказываются экономичнее литых.

Таблица 21.1

Вес сварных и литых корпусов редукторов

Деталь редуктора	Литые, *кГ*	Сварные, *кГ*
Корпус	50,3	27,8
Корпусная крышка	22,2	11,2
Всего	72,5	39,0

Корпуса редукторов требуют точного изготовления, поэтому после сварки их подвергают отпуску в термической печи. Меха-

ническая обработка производится после отпуска. В СССР имеются сварные редукторы, передающие весьма высокие мощности (свыше 700 *квт*). Эти редукторы применяют на металлургических заводах в прокатных станах. Сварные редукторы изготовляют из прокатных элементов, гнутых и штампованных профилей.

Пример расчета. Требуется определить напряжение в корпусе двухступенчатого редуктора мощностью $N=147$ *квт* при $n_1=540$ *об/мин* и $n_2=30$ *об/мин*. Общий вид редуктора и схе-

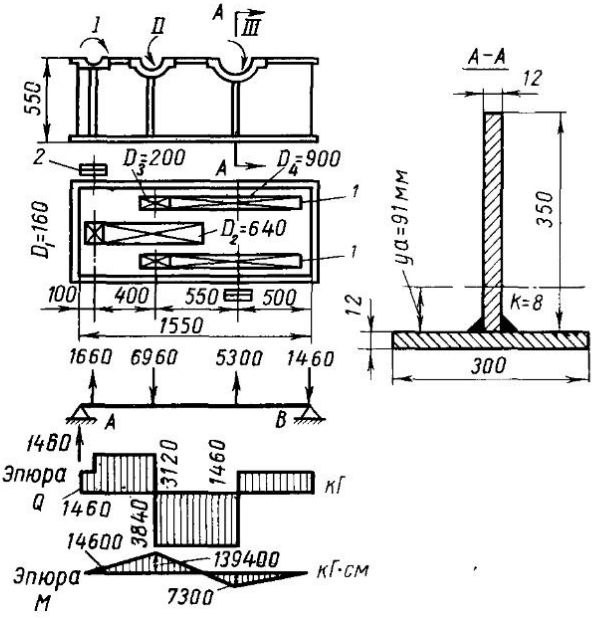


Рис. 21-13. К примеру расчета рамы корпуса двухступенчатого редуктора

ма расположения шестерен приведены на рис. 21-13. Так как шестерни расположены симметрично, то обе стенки редуктора испытывают одинаковую внешнюю нагрузку.

Давление на зуб в первой паре шестерен при $M_1=\frac{974\,N}{n}=$ $=97\,400\ \frac{N}{n}$ *кГ · см*, где N — мощность в *квт*, равно

$$T_1=\frac{M_1}{r_1}=\frac{97400\cdot 147}{n_1 r_1}=\frac{97\,400\cdot 147}{540\cdot 8}=3320\ кГ;$$

$$r_1=\frac{D_1}{2}=8\ см.$$

Давление на зуб шестерни, находящейся на валу, при заданном вращении направлено вверх.

Давление на каждый подшипник вала равно

$$R_1 = \frac{T_1}{2} = \frac{3320}{2} = 1660 \text{ кГ}.$$

Давление на зуб большой шестерни на валу II равно 3320 кГ и направлено вниз. Давление на зуб во второй паре шестерен при вращении вала II направлено также вниз. В этом случае

$$n_2 = \frac{540}{4} = 135; \text{ об/мин};$$

поэтому при радиусе $r_3 = 10$ см

$$T_2 = \frac{97\,400 \cdot 147}{2 \cdot 135 \cdot 10} = 5300 \text{ кГ}.$$

Давление на подшипник вала II составляет

$$R_2 = 1660 + 5300 = 6960 \text{ кГ}.$$

Давление на подшипник вала $III - R_3$ направлено вверх и равно 5300 кГ. От указанных сил R_1, R_2, R_3 построены эпюры Q и M по длине корпуса, считая, что редуктор опирается в точках A и B. Расчетный момент равен 139 400 кГ·см, расчетная сила — $Q = 3840$ кГ.

Поперечное сечение $A—A$ изгибаемого элемента показано на рис. 21-13 заштрихованным. Определяем его центр тяжести

$$y_a = \frac{35 \cdot 1{,}2 \cdot 17{,}5 - 30 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}6}{35 \cdot 1{,}2 + 30 \cdot 1{,}2} = 9{,}1 \text{ см}.$$

Момент инерции сечения заштрихованной площади равен

$$J = \frac{35^3 \cdot 1{,}2}{12} + 35 \cdot 1{,}2 \ (17{,}5 - 9{,}1)^2 +$$

$$+ \frac{30 \cdot 1{,}2^3}{12} + 30 \cdot 1{,}2 \ (9{,}1 + 0{,}6)^2 = 10642 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления сечения составляет

$$W = \frac{10642}{35 - 9{,}1} = 339 \text{ см}^3;$$

$$\sigma = \frac{139400}{339} = 411 \text{ кГ/см}^2.$$

Статический момент площади основания относительно центра тяжести сечения равен

$$S = 30 \cdot 1{,}2 \ (9{,}1 + 0{,}6) = 349{,}2 \text{ см}^2.$$

Касательные напряжения в швах

$$\tau = \frac{3840 \cdot 349{,}2}{10\,642 \cdot 2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}8} = 114 \ кГ/см^2.$$

§ 4. ШЕСТЕРНИ И ШКИВЫ

Сварные шестерни, шкивы и маховики по оформлению конструкции имеют много общего. Во всех указанных объектах основными их частями являются обод, ступица и соединительные

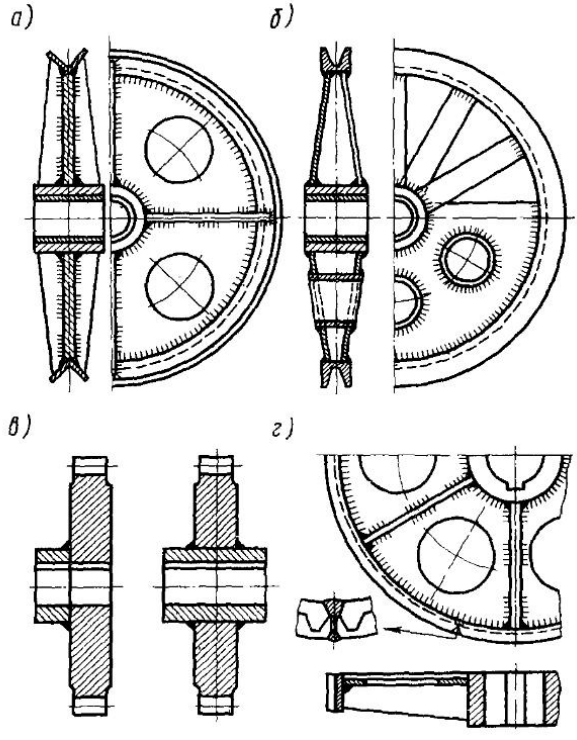


Рис. 21-14. Сварные шестерни и шкивы

элементы, связывающие обод со ступицей. Соединительными элементами служат спицы или сплошные центры. Рассмотрим конструкции сварных шестерен.

На рис. 21-14, *а* приведен пример легкого шкива с центром и ободом из уголка, на рис. 21-14, *б* — шкива с ободом из швеллера со спицами из полосовой стали, на рис. 21-14, *в* — зубча-

тое колесо со сплошным центром, а на рис. 21-14, *г* — зубчатого колеса с ободом, сваренным встык. Внутренний диаметр ступицы обычно соответствует диаметру вала. В качестве спиц могут быть использованы не только трубчатые элементы, но и тавры, двутавры и различные штампованные профили. Ободы шестерен большого размера прежде изготовлялись литыми или коваными, в настоящее время их в большинстве случаев вальцуют из толстых листов и сваривают встык. Центр и ребра изготовляют из малоуглеродистой стали. Для ободов применяют повышенные сорта кованой и вальцованной стали, например хромансиль, а также углеродистые стали 35, 45 и т. п.

Швы, приваривающие центр к ступице и к ободу, целесообразнее выполнять с подготовкой кромок, как показано на рис. 21-15, *а*. При этом концентрация напряжений в соединениях

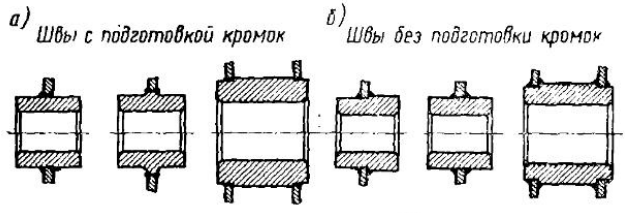


Рис. 21-15. Сварные соединения дисков со ступицами:
а) с подготовкой кромок; *б)* без подготовки кромок

оказывается меньше, а следовательно, прочность при переменных нагрузках больше, чем в конструкции с угловыми швами (рис. 21-15, *б*). При значительном объеме производства эти швы лучше сваривать на автоматах под слоем флюса. При этом благодаря проплавлению отпадает необходимость в подготовке кромок.

Центр представляет собой весьма ответственную часть конструкции шестерни. При недостаточной его жесткости во время эксплуатации возникают вибрации, которые могут расстроить зубчатые зацепления. Поэтому центры иногда конструируют двустенчатыми, как, например, на рис. 21-2. Между стенками полезно ставить диафрагмы жесткости.

Жесткость двустенчатой шестерни значительно выше, чем одностенчатой.

С целью уменьшить вес шестерни иногда конструируют без ступицы и насаживают непосредственно на вал. После сварки шестерню подвергают термической обработке (отпуску) в термической печи для снятия остаточных напряжений. После отпуска производят механическую обработку и нарезку зубьев.

Подобным же образом конструктивно оформляются шкивы и маховики. Шкивы и маховики часто не требуют столь большой

точности изготовления и сохранения размеров, как шестерни. Поэтому, как правило, после сварки эти конструкции не подвергают отпуску.

Преимущества сварных шестерен перед литыми весьма значительны: достигается экономия металла, которая нередко составляет 30÷40%; значительно уменьшается объем механической обработки, которая в литых деталях значительна; при сварке получаются конструкции с высокими однородными механическими свойствами; более рационально используется материал высокого качества, чем при литье (например, применяют его только в ободах, где необходима высокая прочность, и не используют

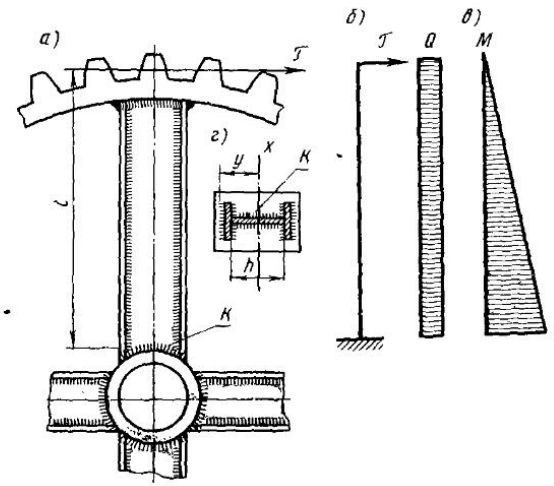


Рис. 21-16. К расчету сварных соединений шестерен со спицами:
а) шестерня; б, в) эпюры Q и M по длине спиц; г) соединение спицы со ступицей

в центрах, где механические свойства малоуглеродистой стали вполне достаточны).

Расчет прочности сварной шестерни производят на касательное усилие, приложенное к зубу зацепления. Усилие T передается на обод, а с обода на ступицу (или на вал) через спицы или центр. Если число спиц менее четырех, то считают, что усилие T воспринимается полностью одной спицей. Таким образом, в спице возникает поперечная сила $Q=T$ и изгибающий момент $M=Tl$ (рис. 21-16, *а—в*).

Напряжение от изгиба в спице определяется по формуле

$$\sigma = \frac{M}{J} y_{max}, \qquad (21.10)$$

где J — момент инерции поперечного сечения спицы относительно оси x;

y_{max} — указан на рис. 21-17, *г*.

Следует определить касательные напряжения в швах спицы, соединяющих ее пояс со стенкой. Если швы угловые с катетом κ, то напряжения в них от поперечной силы равны

$$\tau = \frac{QS}{J \cdot 2 \cdot 0{,}7\kappa}, \qquad (21.11$$

где S — статический момент полки относительно центра тяжести.

Касательные напряжения τ, определяемые по формуле (21.11), обычно незначительны по величине. В месте соединения спицы со ступицей следует определить напряжение в угловых швах от момента

$$\tau = \frac{M}{J_c}(y_{max} + \kappa); \qquad (21.12)$$

где J_c — момент инерции периметра шва относительно вертикальной оси.

Напряжение от поперечной силы проверяется только с учетом швов, приваривающих стенку профиля

$$\tau_Q = \frac{Q}{F_c}. \qquad (21.13)$$

Напряжения в соединениях спиц со ступицей от Q обычно бывают малы. Прочность в основном определяется напряжением от момента. Если число спиц $n > 4$, то

$$M = \frac{4Tl}{n}; \quad Q = \frac{4T}{n}. \qquad (21.14)$$

В конструкциях сварных шестерен (рис. 21-17, *а*) с центрами вместо спиц наиболее нагружеиными являются швы, соединяющие центр со ступицей. Они воспринимают усилие T и крутящий момент, равный

$$M = TR.$$

Напряжение в соединении ступицы с центром определяется в предположении, что касательные напряжения распределены равномерно по длине шва; на участке длиной, равной единице, усилие в шве с подготовкой кромок (рис. 21-17, *б*) создает момент

$$m = 1 \cdot s\tau r.$$

Полный момент будет равен

$$M = m\,2\pi r = 2\pi r^2 s\tau.$$

Напряжение в шве с подготовкой кромок

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 s}. \qquad (21.15)$$

Напряжения в угловых швах (рис. 21-17, *в*) с катетом $к$ составят

$$\tau = \frac{M}{4\pi r^2 0{,}7\ к}. \qquad (21.16)$$

Пример расчета. Касательное усилие на зубе $T = 10\,000$ *кГ* (см. рис. 21-17, *а*), радиус шестерни $R = 375$ *мм*, ра-

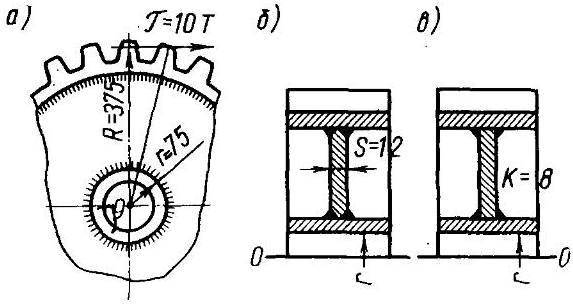


Рис. 21-17. К расчету сварных соединений шестерен со сплошным центром:

а) шестерня; *б*) соединения центра со ступицей и ободом с подготовкой кромок; *в*) то же без подготовки кромок

диус ступицы $r = 75$ *мм*. Определить напряжения в соединении центра ($s = 12$ *мм*) со ступицей. Момент

$$M = TR = 10000 \cdot 37{,}5 = 375000\ кГ \cdot см.$$

В швах, соединяющих центр со ступицей, сваренных с подготовкой кромок (рис. 21-17, *б*), касательные напряжения определяются по формуле (21.15)

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 s} = \frac{375\,000}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 7{,}5^2 \cdot 1{,}2} = 880\ кГ/см^2.$$

В швах, соединяющих центр со ступицей, сваренных без подготовки кромок угловыми швами с катетом $к = 8$ *мм* (рис. 21-17, *в*), касательные напряжения определяются по формуле (21.16)

$$\tau = \frac{M}{4\pi r^2 0{,}7\ к} = \frac{375\,000}{4 \cdot 0{,}7 \cdot 3{,}14 \cdot 7{,}5^2 \cdot 0{,}8} = 950\ кГ/см^2.$$

ГЛАВА XXII

СВАРНЫЕ ДЕТАЛИ МАШИН (ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ)

§ 1. ДЕТАЛИ ТЯЖЕЛОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

В тяжелых машинах габариты, вес и сечения деталей часто оказываются настолько велики, что получение заготовок требуемого размера и формы с помощью ковки или литья вызывает большие трудности. Преодоление этих трудностей обеспечивается

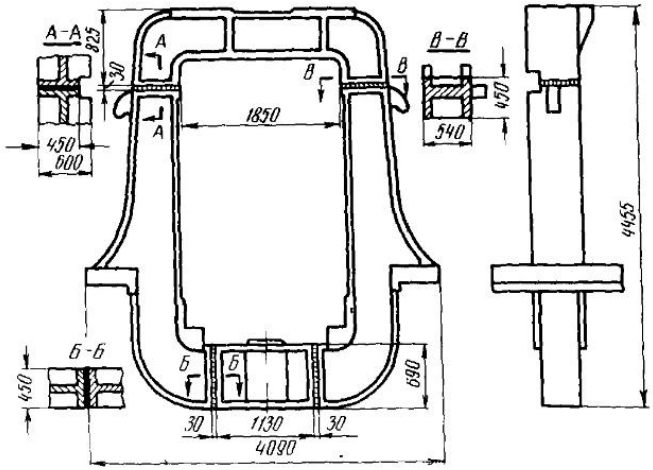


Рис. 22-1. Рама вертикальной клети

расчленением крупной сложной детали на более простые по форме элементы меньшего веса с последующим соединением сваркой. При этом технологичность составной детали во многом определяется выбором расположения и конструктивного оформления стыков между отдельными элементами. Поэтому вопросы

расчленения крупной детали необходимо решать с учетом как методов получения заготовок отдельных элементов, так и приемов их сборки, сварки и последующей механической и термической обработки.

Для машиностроения наиболее характерными деталями являются рамы, станины, валы и колеса. Рассмотрим примеры их изготовления применительно к машинам тяжелого и энергетического оборудования в условиях индивидуального или мелкосерийного производства.

На рис. 22-1 показана рама вертикальной клети прокатного стана, составленная из четырех литых заготовок стали 35Л. Места стыков выбраны из условия симметрии сварочных деформаций и относительной простоты формы каждого элемента. Сложное очертание двутаврового сечения в месте стыка заменено сплошным (разрезы *А—А*, *Б—Б*) в целях удобства выполнения его электрошлаковой сваркой пластинчатыми электродами. Несмотря на заметное увеличение количества наплавленного металла, такое конструктивное оформление стыка оказывается более технологичным, чем выполнение номинального сечения многослойной сваркой. Это наглядно подтверждается данными диаграммы рис. 22-2, сопоставляющей стоимость выполнения 1 *м* длины стыкового шва металла большой толщины различными методами.

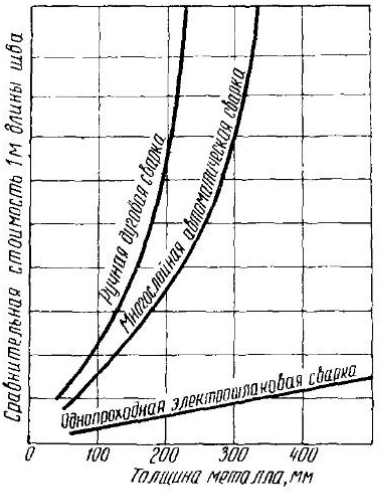


Рис. 22-2. Диаграмма стоимости 1 *м* длины шва

На рис. 22-3 показана другая рама, подготовленная к электрошлаковой сварке плавящимся мундштуком. Можно видеть, что сборка под сварку выполняется в горизонтальном положении с помощью скоб, стыки свариваются попарно.

Станины тяжелых прессов изготовляют с помощью сварки сравнительно недавно, и поэтому опыт их конструирования еще не велик. Вначале наблюдалось стремление в сварном исполнении повторять формы литых конструкций. Характерным для этого случая является пример, приведенный на рис. 22-4, где рассматриваются четыре варианта конструкции поперечины пресса усилием 4500 *Т*. Последний вариант (рис. 22-4, *г*), который наиболее отличается от первоначальной литой конструкции, является наиболее легким и технологичным.

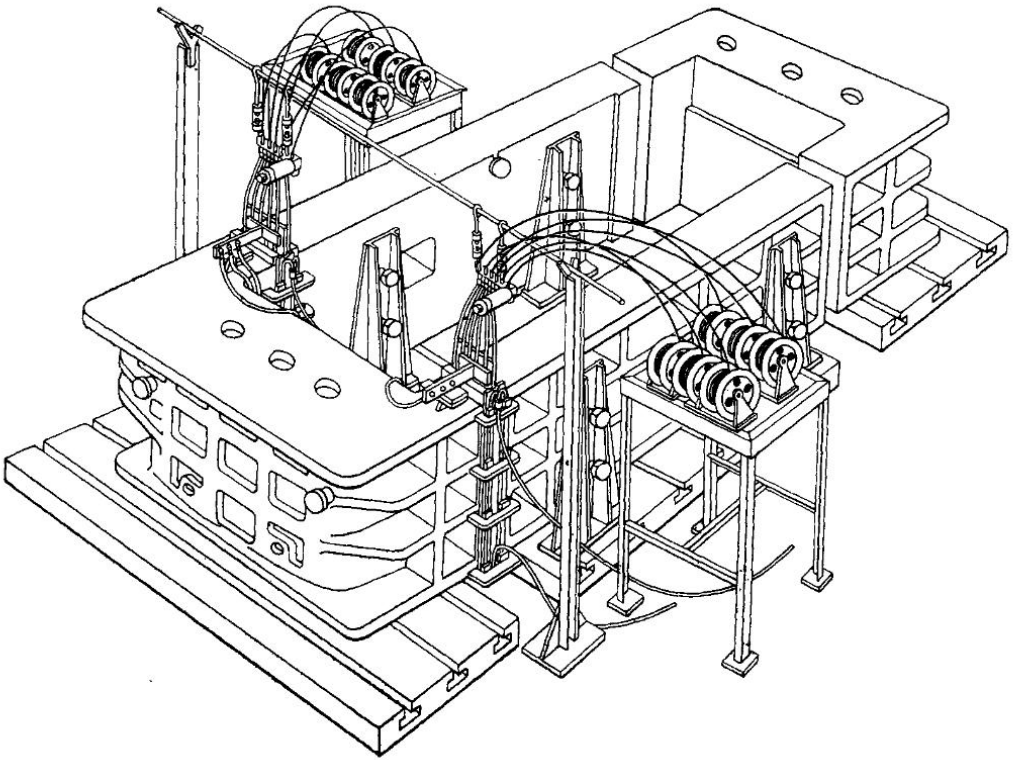


Рис. 22-3. Рама щековой дробилки, собранная под электрошлаковую сварку плавящимся мундштуком

В СССР сварные соединения станин тяжелых прессов обычно выполняют с полным проплавлением присоединяемого элемента (рис. 22-5, *а*). В ГДР, на заводе «Пельс», выпускающем сварные станины прессов средней мощности с 1929 г., ограничиваются минимальными размерами швов (рис. 22-5, *б*), однако при этом производится плотная подгонка мест сопряжений листов и постановка разгрузочных заплечиков, штифтов, шипов и пазов. Дополнительные затраты на подгоночные работы компенсируются снижением трудоемкости сварочных работ. Кроме того, малый объем наплавленного металла позволяет в этом случае обходиться без последующей термообработки конструкций.

На рис. 21-7 показана сварная станина пресса усилием 4000 *Т*, выполненная из толстолистового проката, массивной литой траверсы и кованой трубы. Сварные соединения — стыковые, тавровые и угловые; большинство из них выполняются электрошлаковой сваркой. Последнее обстоятельство определяет некоторые особенности конструкции и последовательность выполнения сборочно-сварочных операций. Угловые и тавровые соединения элементов собираются при помощи косынок и диафрагм, стыковые — при помощи скоб. В местах, недоступных для постановки формующих медных охлаждаемых подкладок, применяют остающиеся стальные пластины. Последовательность выполнения сборочно-сварочных операций выбирается так, чтобы концы каждого из электрошлаковых швов можно было вывести за пределы тела детали. Поэтому общей сборке сложной детали обычно предшествует сборка и сварка относительно простых узлов. При этом, для уменьшения угловых сварочных деформаций, желательно, чтобы каждый собранный под сварку узел имел замкнутое сечение. Применительно к станине пресса усилием 4000 *Т* (рис. 21-7) последовательность и содержание основных сборочно-сварочных операций показана на рис. 22-6. Первым узлом является тумба *1*. Сначала в замкнутое сечение собирают ее боковые стенки, и электрошлаковые швы (1) и (2) выполняют с полным проплавлением привариваемого элемента (рис. 22-6, *а*). Затем устанавливают горизонтальные листы тумбы и выполняют первые пары швов (3) и (4) (рис. 22-6, *б*). Участки первых пар швов, препятствующие установке карманов и выводу усадочных раковин вторых пар швов, удаляются из зазора огневой резкой. Готовая тумба входит в сборку второго, более крупного узла — стойку (рис. 22-6, *в*). Замкнутое сечение образуется присоединением элементов полустоек: *2* и *3*; швы (5), (6), (7) и (8) выполняются электрошлаковой сваркой. Формирование корпуса станины завершается сборкой стоек с траверсой *4* и сваркой электрошлаковых швов (9), (10), (11) и (12) (рис. 22-6, *г*). Затем в полустойках *3* огневой резкой вырезают пазы под трубу *5*. Следует заметить, что образование пазов резкой не плоских заготовок, а уже сваренного узла с удалением части шва, является приемом,

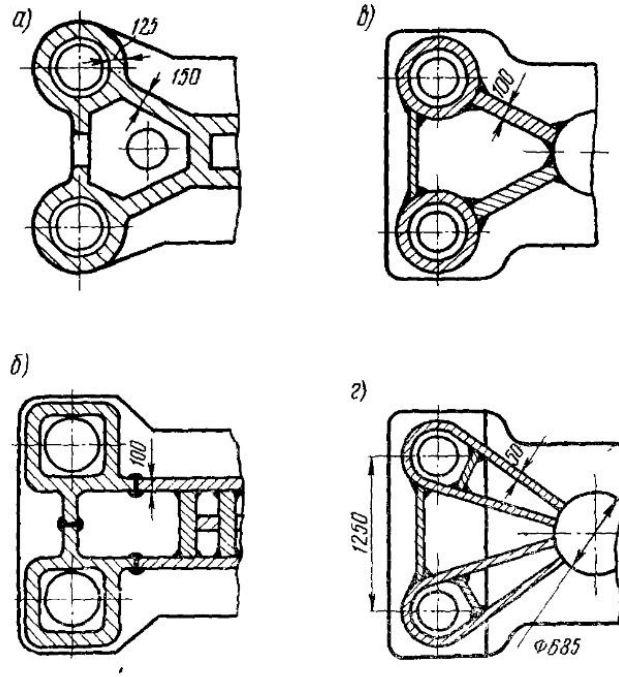


Рис. 22-4. Различные конструктивные решения изготовления поперечин пресса усилием 4500 *Т*:

а) литая поперечина; *б)* сварно-литая поперечина; *в)* сварная с радиальными ребрами; *г)* сварная с изогнутыми секциями

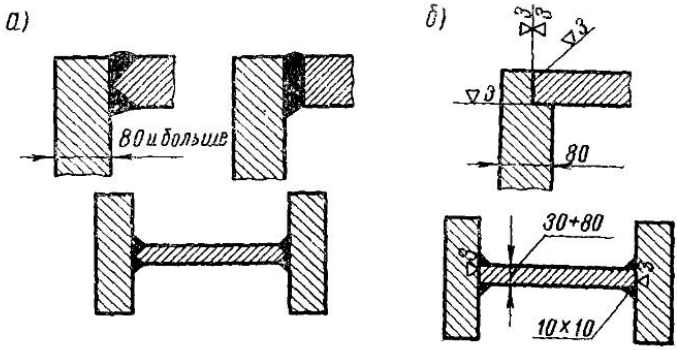


Рис. 22-5. Сварные соединения станин прессов, выполненных из толстолистового проката:

а) тяжелых прессов в СССР; *б)* прессов на заводе «Пельс» (ГДР)

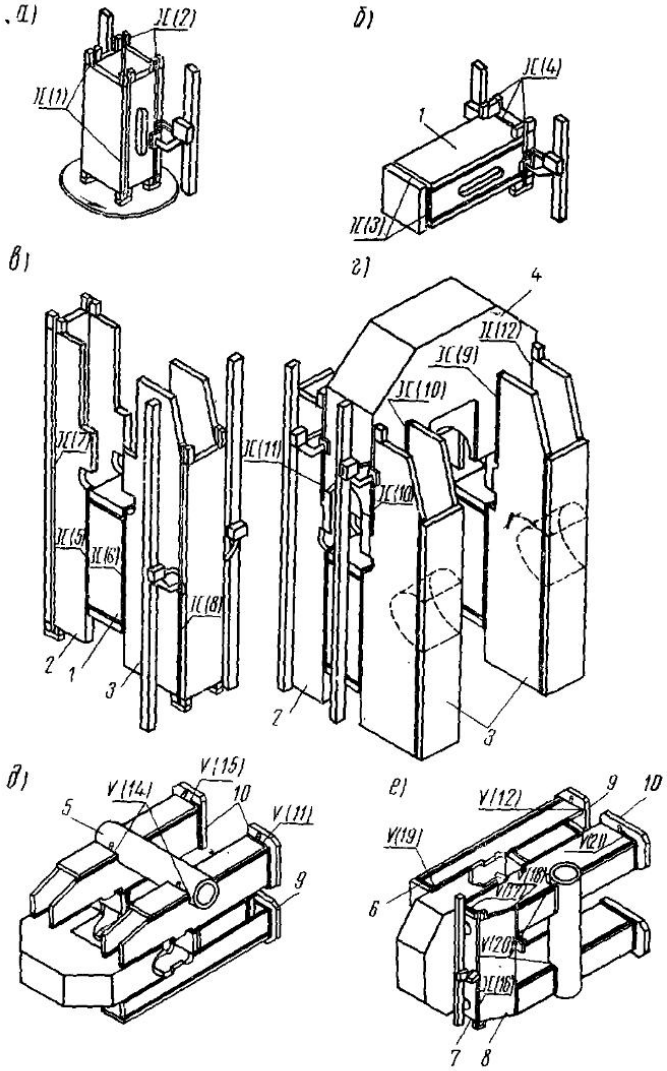


Рис. 22-6. Последовательность сборочно-сварочных операций при изготовлении станины пресса усилием 4000 *Т*

характерным для конструкций, выполняемых электрошлаковой сваркой. Целесообразность такого приема объясняется трудоемкостью подготовки и зачистки стыков в местах начала и конца каждого электрошлакового шва. В этом случае выполнить длинный непрерывный шов с последующим удалением его части резкой оказывается выгоднее, чем выполнять два более коротких шва. Завершение сборки и сварки станины требует ряда кантовочных операций. Так, установка трубы *5* и лап *9* и *10* и сварка полуавтоматом под флюсом многослойных швов (14) и (15) производится, как показано на рис. 22-6, *д*, а установка крышек *6*, *7* и *8* и выполнение электрошлаковых швов (16) и многослойных швов (17), (18), (19), (20), (21) и (22) — на рис. 22-6, *е*.

При изготовлении деталей тяжелых машин завершающими операциями являются термическая и механическая обработка

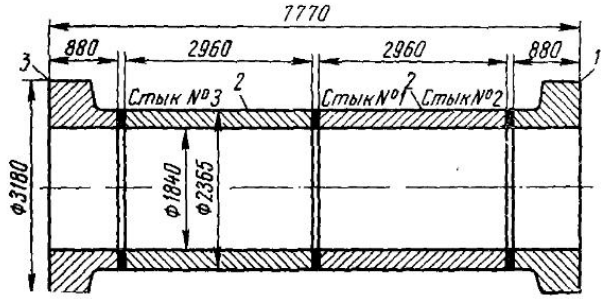


Рис. 22-7. Схема вала турбины Красноярской ГЭС

после сварки. Рамы и станины с толщиной свариваемых элементов более 100 *мм*, как правило, подлежат термообработке. При этом для деталей, эксплуатирующихся в условиях нормальных температур и изготовленных из сталей, сохраняющих высокие пластические свойства в зоне термического влияния, можно ограничиться проведением высокого отпуска. При более жестких условиях сварную деталь для улучшения свойств сварных соединений обычно перед высоким отпуском подвергают нормализации.

Точность размеров станин и рам в основном обеспечивается путем последующей механической обработки.

Характерными примерами сварных валов большого размера могут служить валы мощных турбин. Конструкция валов гидравлических турбин проста, это массивная труба с одним или двумя фланцами. Заготовки обечаек обычно получают ковкой, заготовки фланцев — также ковкой или иногда в виде стальных отливок. Так, валы Красноярской ГЭС (рис. 22-7) выполнены из

кованых заготовок Ст. 25ГС. На сборку среднего стыка обечайки *2* поступали после черновой механической обработки с припуском 20 *мм* на сторону. Сборка стыка под электрошлаковую сварку выполнялась с переменным зазором: 33 *мм* под карманом для наведения сварочной ванны и 38 *мм* в плоскости, повернутой на 90° от кармана в направлении вращения. Приемы сборки и сварки кольцевых стыков электрошлаковой сваркой были рассмотрены выше применительно к изготовлению толстостенных сосудов. После выполнения среднего стыка (рис. 22-7), сваренные обечайки проходили высокий отпуск и подвергались промежуточной механической обработке. Затем выполнялись сборка и сварка стыков с фланцами *1* и *3*. Чистовую механическую обработку, обеспечивающую точность размеров готового вала, производили после нормализации и высокого отпуска.

Отличительной особенностью выполнения кольцевых стыков весьма большого сечения является трудность обеспечения непрерывности процесса сварки от начала до заварки замка. Такая непрерывность необходима как из соображений качественного выполнения шва (при нарушении процесса неизбежно возникновение несплавления кромок и возможно образование трещин), так и соблюдения величины и направления ожидаемой сварочной деформации излома осей стыкуемых деталей. Так как время сварки может составлять десятки часов, то возникает опасность отказа аппаратуры и прежде всего выхода из строя мундштуков, направляющих электродную проволоку в сварочную ванну. Сменить мундштуки без остановки процесса сварки невозможно, а остановить процесс недопустимо. Поэтому для сварки кольцевых швов большого сечения используют специальную установку (рис. 22-8) с двумя дублирующими сварочными головками. При выходе работающей головки из строя, ее место тотчас занимает вторая головка и процесс сварки прерывается лишь на весьма непродолжительное время.

Валы газовых и паровых турбин изготовляют из жаропрочных сталей, что затрудняет получение заготовок большого размера с помощью литья и ковки. Поэтому крупные валы сваривают из поковок относительно небольшого размера и простой формы. Так, на рис. 22-9 показан ротор газовой турбины, составленный из отдельных дисков и концевых частей. При разработке конструкции и технологии изготовления подобных изделий основными требованиями являются жесткое ограничение величины сварочных деформаций искривления продольной оси ротора и получение надежного проплавления швов при их односторонней сварке. Необходимость соблюдения жесткого допуска на искривление продольной оси ротора от сварки вызывается наличием внутренних замкнутых полостей, смещение которых относительно оси вращения вызывает неуравновешенность. При работе на высоких числах оборотов такая неуравновешенность совер-

шенно недопустима, а ее устранение ограничено недоступностью внутренних полостей для механической обработки. Поэтому необходима точная сборка и прецизионная технология сварки.

Кованые заготовки дисков после механической обработки центрируются относительно друг друга направляющими пояскаами, требуемая величина зазора в разделке обеспечивается постановкой проставок. Собранные элементы плотно стягиваются

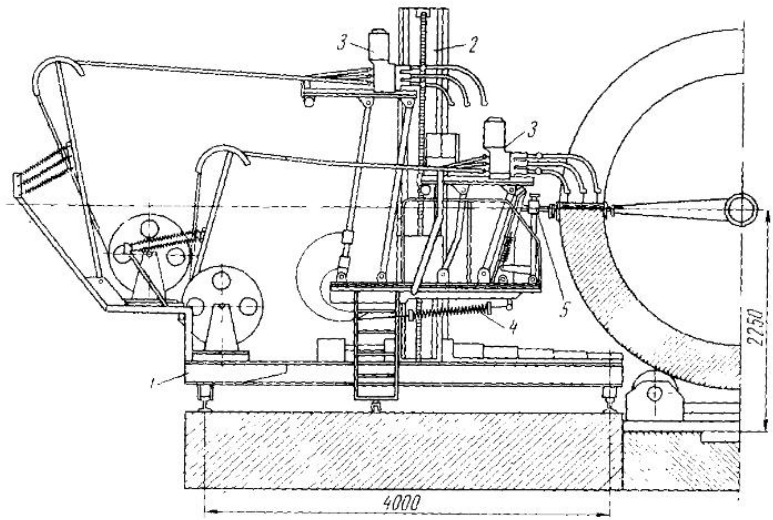


Рис. 22-8. Установка с дублирующими головками для электрошлаковой сварки кольцевых швов:

1 — тележка, *2* — колонна; *3* — сварочные головки; *4* — механизм переброса головок; *5* — подвеска крепления ползуна

между собой тягами *1* (рис. 22-9) с компенсирующими усадку пружинами *2*, и в вертикальном положении ротор подается на сварку.

Однопроходная сварка не может обеспечить симметрии сварочных деформаций из-за неравномерности поперечной усадки по периметру кольцевого шва, поэтому сварку выполняют во много слоев. Полный провар в корне шва достигается специальной конструкцией разделки или применением остающихся кольцевых подкладок.

Оригинальную конструкцию стыка применяют в ЧССР (рис. 22-10). Посадочная ступенька и упорное кольцо из малоуглеродистой стали толщиной 2 *мм* обеспечивают высокую точность сборки ротора и необходимую податливость стыка при сварке. Это весьма важно с позиции предупреждения образования трещин в соединении. Притупление разделки выбрано из

условия получения полного провара корня шва. Специальные наклонные каналы уменьшают жесткость кромок при выполнении корневого слоя и тем самым предотвращают образование в нем трещин, а также обеспечивают лучшие условия для ультразвукового контроля сварного соединения.

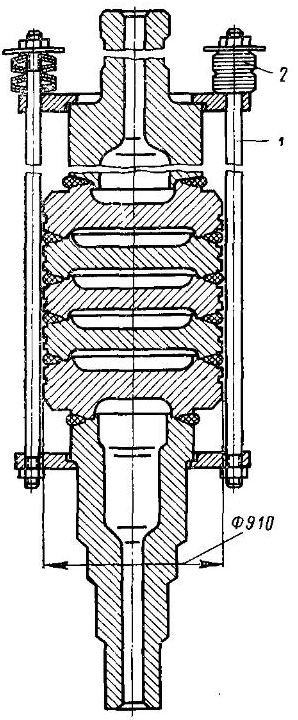


Рис. 22-9. Сварной ротор газовой турбины

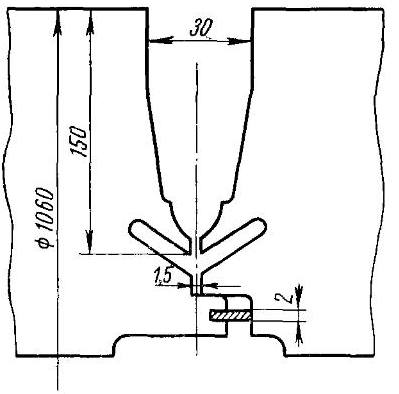


Рис. 22-10. Конструкция стыка кольцевого соединения вала ротора турбины

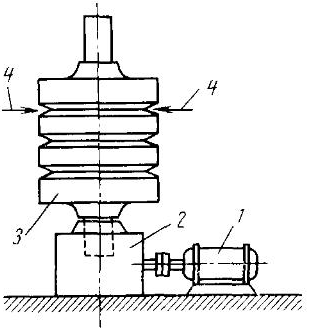


Рис. 2-11. Схема сварки ротора газовой турбины

Первые слои швов выполняют при вращении ротора *3* от мотора *1* через редуктор *2*. Вертикальное расположение оси ротора *3* имсет цель исключить влияние силы тяжести (рис. 22-11). Для обеспечения симметрии сварочных деформаций каждый корневой шов выполняют одновременно двумя диаметрально расположенными сварочными головками *4* вольфрамовым электродом в аргоне. Затем в этом же положении ряд слоев

укладывают плавящимся электродом в среде CO_2. После заполнения той части разделки, которая необходима для обеспечения определенной жесткости ротора, он переносится в центровой вращатель с горизонтальным расположением оси, и основная часть

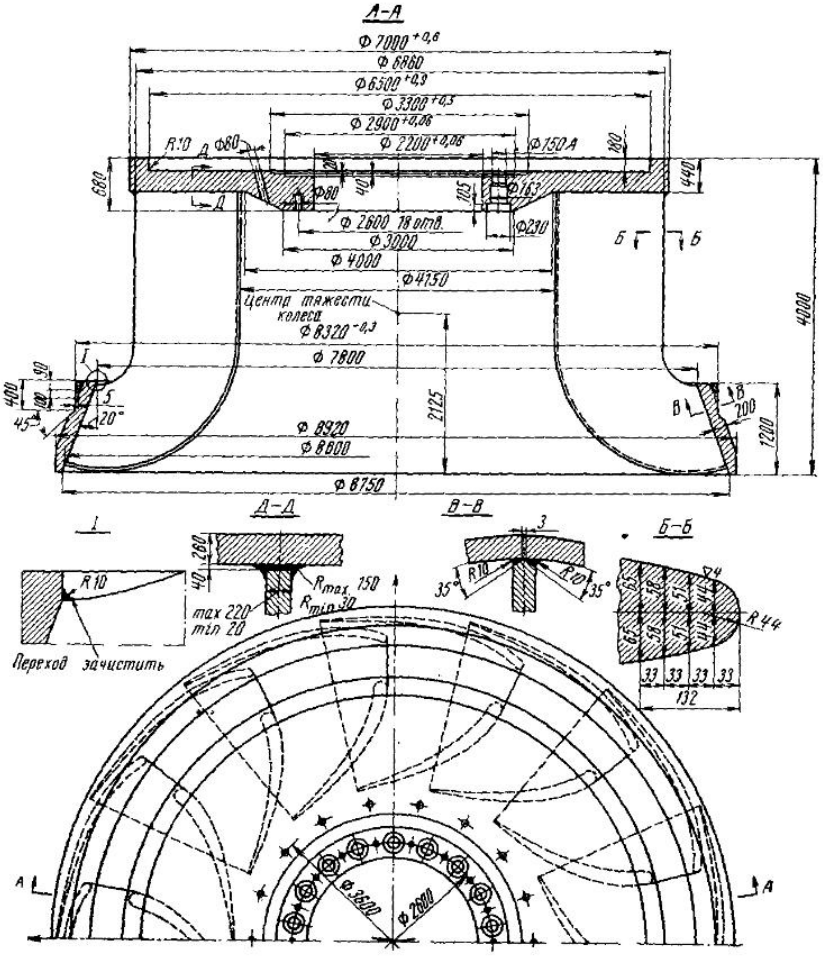


Рис. 22-12. Чертеж рабочего колеса турбины Красноярской ГЭС

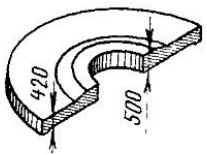
разделки заполняется многослойной сваркой под флюсом в нижнем положении. Такая технология позволяет предотвратить искривление настолько, что биение сваренного вала не превышает 0,5 *мм* на длине 5 *м*.

Сварные колеса в тяжелом и энергетическом машиностроении достаточно разнообразны. Среди них рабочие колеса мощных гидротурбин выделяются как размерами, так и сложностью процесса изготовления. Так, например, рабочее колесо турбины Красноярской ГЭС (рис. 22-12) имеет диаметр свыше 8 *м*, что намного превышает габарит подвижного состава железных дорог. Поэтому возможность его изготовления целиком в условиях Ленинградского металлического завода, без расчленения на монтажные блоки, была обеспечена только благодаря наличию водного пути от места расположения завода-изготовителя до места монтажа.

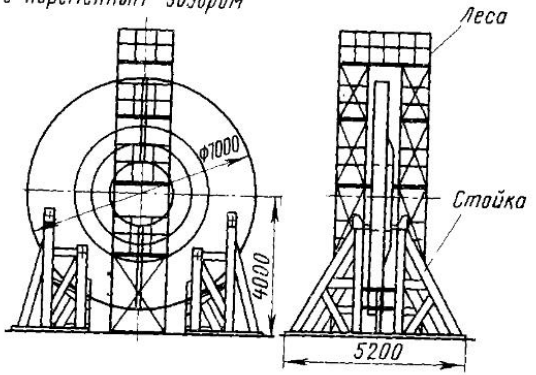
Рабочее колесо состоит из верхнего и нижнего ободов и лопастей. Последовательность и содержание основных этапов процесса его изготовления показаны на рис. 22-13. Верхний обод выполнен из двух литых заготовок стали 20ГС-Л с максимальной толщиной 500 *мм*. Отливки проходили предварительную механическую обработку по всем поверхностям, за исключением поверхности по наружному диаметру. Затем заготовки собирали в кольцо и устанавливали в вертикальное положение под электрошлаковую сварку, причем для компенсации неравномерности поперечной усадки по длине шва зазор в нижней части стыка задавали в пределах 25—27 *мм*, а в верхней 50—54 *мм*. После сварки верхний обод подвергался высокому отпуску и поступал на механическую обработку, где внутренняя поверхность обода, примыкающая к лопастям, обрабатывалась окончательно, а остальные поверхности с припуском. Лопасти рабочего колеса выполнялись кокильной отливкой из стали 20ГС-Л. Требуемая точность формы обеспечивалась рубочными и наплавочными работами с проверкой по пространственному шаблону и последующей шлифовкой. Для повышения стойкости против кавитационного износа часть выпуклой поверхности лопастей подвергалась наплавке ленточным электродом безникелевой стали 30Х10Г10 под флюсом. После шлифовки наплавленной поверхности и механической обработки торца, примыкающего к верхнему ободу, лопасти поступают на сборку.

Сборка начинается с разметки гладкой внутренней поверхности верхнего обода под установку лопастей по шагу и профилю. Отказ от использования приливов-пеньков (рис. 22-13, *б*), которые в известной степени задавали положение лопастей, позволяет повысить точность их размещения и облегчить обработку поверхности обода. Четырнадцать лопастей последовательно устанавливали на верхний обод с соблюдением зазора в стыке: снизу 37 и вверху 47 *мм*, и закрепляли с помощью приварки скоб и технологических жесткостей (рис. 22-13, *в*). Затем на верхнем ободе закреплялась ось с цапфами и с ее помощью собранный узел устанавливали на стойках специального кантователя (рис. 22-13, *г*). Этим обеспечивалась возможность поворота узла

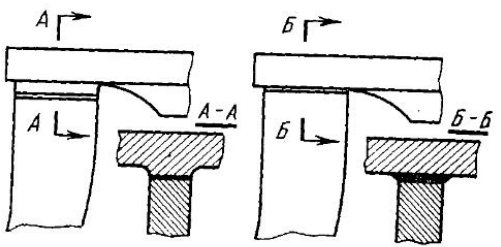
а) Половина верхнего обода - 2 шт.
Отливка из стали 20ГС
Нормализована
Поверхность стыка фрезерована



Примечание : стык собирать с переменным зазором

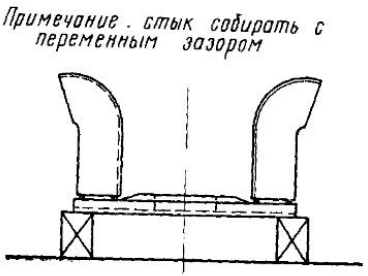


б)

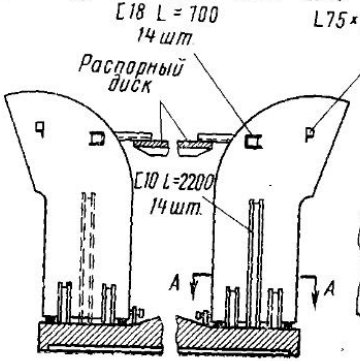


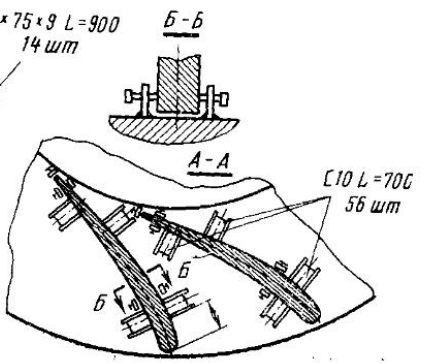
в)

Примечание . жесткости приварить по периметру прилегания швом Δ 10



Примечание . стык собирать с переменным зазором





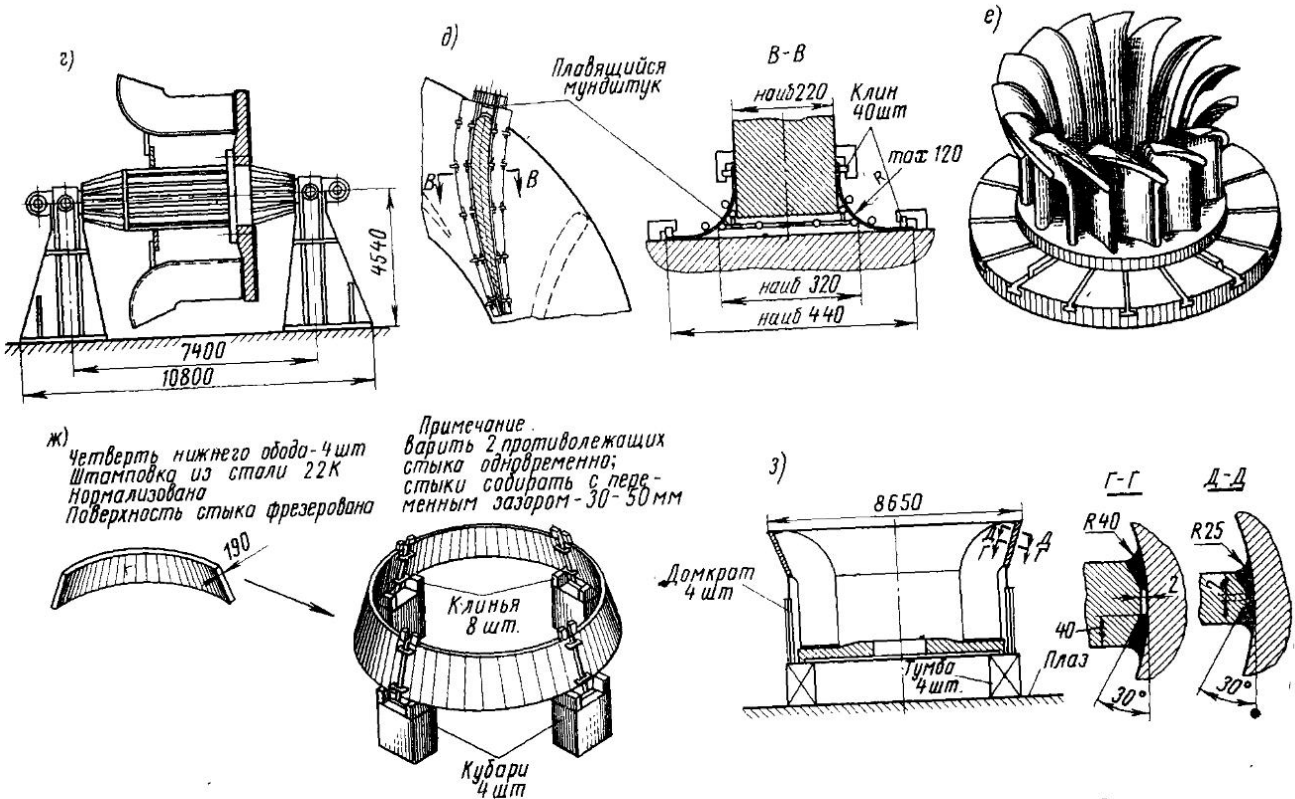


Рис. 22-13. Технология изготовления рабочего колеса турбины Красноярской ГЭС

в положение, удобное для выполнения каждого стыка электрошлаковой сваркой плавящимся мундштуком. Плавный переход от тела лопасти к телу верхнего обода задавали соответствующей формой медных подкладок, охлаждаемых водой, их крепление с помощью клиньев показано на рис. 22-13, *д*. После сварки и промежуточного высокого отпуска производили обработку торцов лопастей под сопряжение с нижним ободом на карусельном станке (рис. 22-13, *е*) и подготовку кромок под К-образную разделку.

Нижний обод собирали из четырех штампованных заготовок стали 22К толщиной 190 *мм*, как показано на рис. 22-13, *ж*. После попарного выполнения стыков электрошлаковой сваркой и высокого отпуска обод подвергали механической обработке с оставлением припуска 15 *мм* по внешнему диаметру на чистовую обработку. Общую сборку колеса производили, как показано на рис. 22-13, *з*. При помощи гидравлических домкратов нижний обод поднимали и вводили в сопряжение с кромками лопастей. Сварка производилась одновременно 2—4 сварщиками диаметрально противоположных стыков полуавтоматами в среде CO_2. Сваренное колесо проходило полный цикл термообработки: нормализацию и высокий отпуск, после чего выполнялась окончательная механическая обработка.

Применительно к изготовлению радиально-осевых колес крупных гидротурбин возможны и другие конструктивно-технологические решения, отличающиеся от только что рассмотренного выше. Так, рабочее колесо Плявиньской ГЭС выполнялось из двух частей, исходя из необходимости перевозки по железной дороге, причем заводская сварка осуществлялась преимущественно вручную обмазанным электродом. Такая технология изготовления представлена на рис. 22-14.

Все элементы этого колеса выполнялись литьем из стали 20ГС-Л. Нижний и верхний ободы отливались из двух частей и до поступления на общую сборку проходили нормализацию и фрезеровку плоскостей разъема, а после спаривания подвергались предварительной обточке, с чистовой обработкой внутренних поверхностей, сопрягаемых с лопастями. После разметки этих поверхностей и огневой вырезки пазов под лопасти ободы разбирались на две половины для передачи на общую сборку. Отливки лопастей после отжига подвергали механической обработке для обеспечения требуемой геометрической формы и состояния поверхности. Кроме того, их торцы подрезали огневой резкой и подрубали так, чтобы при сборке под сварку они входили в соответствующие пазы верхнего и нижнего ободов. Так как рабочее колесо изготовлялось из двух половин, то две лопасти, попадающие в плоскость разъема, делались разрезными и впоследствии сваривались при монтаже.

Для совпадения плоскостей разъема обеих половин колеса необходимы точная сборка каждой из половин и предотвращение искажений этой плоскости при сварке и термообработке. Обеспечение этого достигалось приваркой половин ободов по плоскости разъема к плоскости достаточно жесткой технологической плиты (рис. 22-14, *б*). Затем в пазы ободов заводили хвостовики лопастей и прихватывали, разрезные лопасти, кроме того, прихватывали к плите по плоскости разъема. Сборка завершалась установкой дополнительных технологических элементов жесткости (рис. 22-14, *в*).

Приварка лопастей к ободам производилась способом «поперечной горки» электродами типа Э50А путем заполнения разделки в пазах с последующей зачисткой корня шва и выведением галтельных переходов (рис. 22-14, *г*). Для предотвращения образования трещин применяли предварительный, сопутствующий и заключительный подогрев многопламенными газовыми горелками до температуры 120—200° С. При выполнении сварных соединений полуколесо вместе с технологической плитой кантовали в три различных пространственных положения.

Освобождение сваренного полуколеса от связей с жесткой плитой производили только после завершения сварки и прохождения высокого отпуска для снятия остаточных сварочных напряжений. Затем выпуклые части лопастей каждого полуколеса подвергали облицовке полосами кавитационно стойкой стали 1Х18Н9Т размером 500×50×3 *мм*. Эти полосы приваривали к лопастям полуавтоматами в среде CO_2, швы зачищали заподлицо с поверхностью облицовки (рис. 22-14, *д*). Заводское изготовление завершалось окончательной механической обработкой колеса, временно собранного из двух половин (рис. 22-14, *е*).

На место монтажа колеса доставлялись по железной дороге в разобранном виде. Конструкцией колеса предусмотрено соединение стыков верхнего обода на болтах, а нижнего — с помощью сварки. Такое решение определяется, с одной стороны, невозможностью осуществить болтовое соединение нижнего обода из-за жесткого ограничения габаритов стыка, а с другой стороны — стремлением избежать искажений окончательно обработанной поверхности верхнего обода, которой он присоединяется к фланцу вала гидротурбин. Стыки нижнего обода сваривались ручной сваркой способом «поперечной горки» одновременно четырьмя сварщиками попарно «дуга в дугу». Подогрев до температуры 120—200° С производили с помощью индукторов (рис. 22-14, *ж*). Эти же индукторы использовали для высокого отпуска стыков обода после сварки. Стыки разъемных лопастей сваривали многослойной сваркой вручную без подогрева (рис. 22-14, *з*).

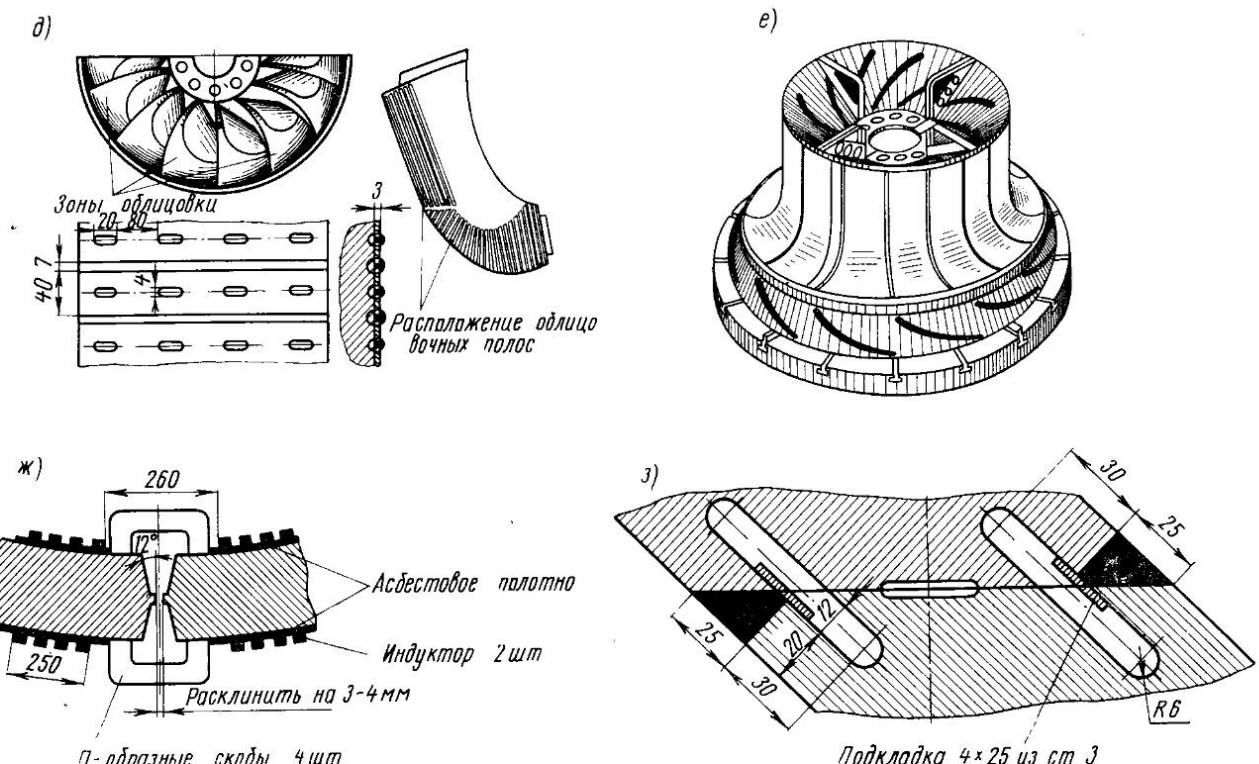
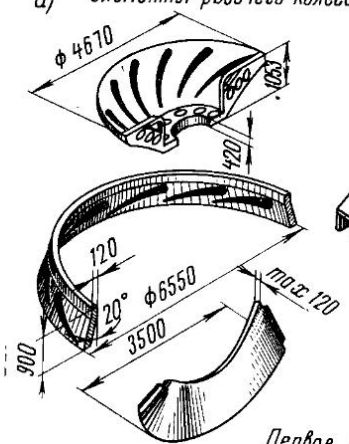
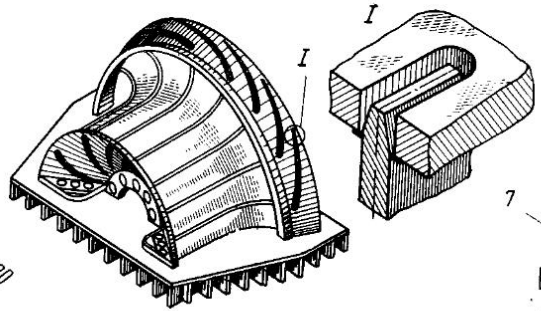


Рис. 22-14. Технология изготовления рабочего колеса турбины Плявиньской ГЭС

а) Элементы рабочего колеса

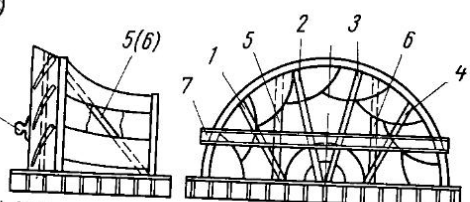


б)



в)

1-6 - жесткости из труб ф133×12
7 - подкрановый рельс

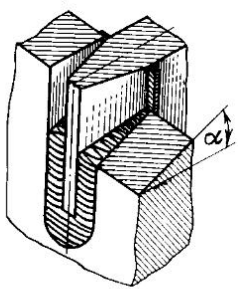


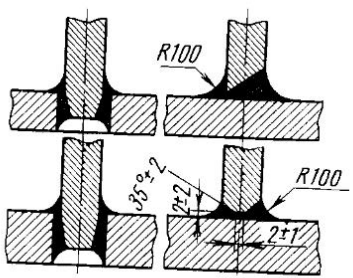
Примечание: жесткости приварить по периметру прилегания швом Δ16

Первое рабочее положение
Горелки подогрева



г)





§ 2. ДЕТАЛИ ОБЩЕГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Большинство деталей машиностроения можно выполнить сварными из отдельных заготовок более простой формы. Применительно к индивидуальному производству деталей тяжелых машин такой подход, как правило, оправдывается. Однако для деталей, выпускаемых в условиях серийного, а тем более массового производства, целесообразность изготовления детали

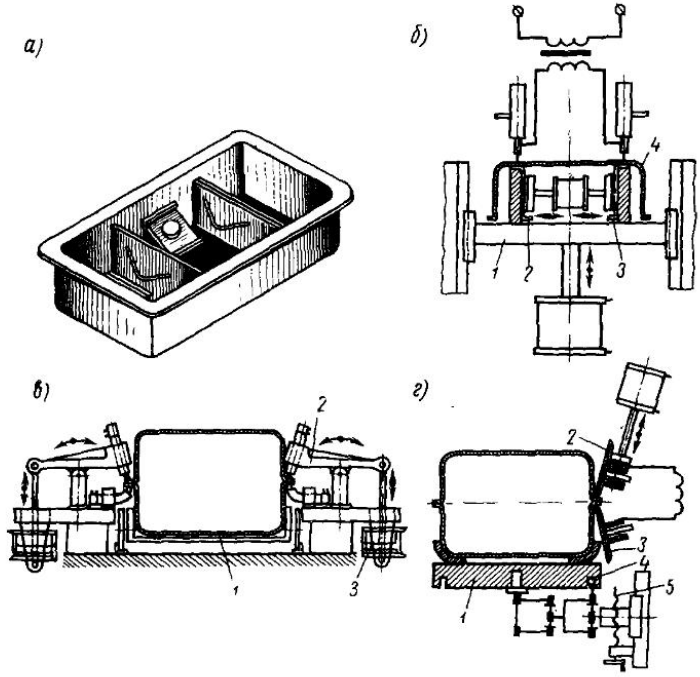


Рис. 22-15. Бензиновый бак и схема машин для его сварки

составной с помощью сварки не является бесспорной. Эта целесообразность существенно зависит от технологичности ее конструкции, т. е. от характера расчленения детали, метода получения заготовок, их обработки, удобства выполнения и трудоемкости сборочно-сварочных операций, возможности механизации процесса изготовления, величины искажений размеров и формы от сварки, необходимости и характера последующей термической и механической обработки и т. п. Так, например, в условиях серийного и массового производства широко применяют сварку заготовок, штампованных из листа. Технологич-

ность таких штампосварных деталей достигается относительно высокой точностью размеров и формы штамповок, позволяющей исключить предварительную механическую обработку, удобством сборки и сварки тонких листов не только встык, но и внахлестку и по отбортовке, а также возможностью получения весьма жестких деталей малого веса. Характерным примером штампосварной детали может служить бензиновый бак автомобиля, свариваемый из двух штампованных половиц с перегородками для уменьшения гидравлических ударов (рис. 22-15, *а*). Вначале к половинкам корпуса точечной сваркой приваривают штуцеры, шайбы, перегородки. Эта операция выполняется на специальной многоточечной машине (рис. 22-15, *б*), где перегородки *2* и *3* закрепляются на подъемном столе *1*, а корпус *4* устанавливается сверху. Затем собранный бак устанавливают на тележку *1* другой многоточечной машины (рис. 22-15, *в*) и подают под электроды *2* для прихватки. Роликовая сварка замыкающего герметичного шва по фланцу выполняется при расположении бака на плите *1*, соединенной шарнирно с корпусом машины (рис. 22-15, *г*). При вращении сварочных роликов *2* и *3* плита *1* перемещается в горизонтальной плоскости, и ролики обкатывают изделие по фланцу. Расстояние до края выдерживается за счет пальца *4*, скользящего в пазу плиты *1*. Положение плиты по высоте регулируется винтом *5*. После сварки шва производится припайка горловин.

Примером штампосварной детали, изготовляемой с применением иных методов сварки, является балка заднего моста легкового автомобиля «Москвич» модели 407. Две половины кожуха *1* и *2* (рис. 22-16, *а*) штампуются из листа стали 20 толщиной 3 *мм*, кованые фланцы *3* и *4* подвергаются предварительной механической обработке. Половины кожуха устанавливают в приспособление и закрепляют зажимами, как показано на рис. 22-16, *б*. Эти пневмозажимы *8* установлены на раме *3* (рис. 22-16, *в*), которая может поворачиваться в подшипниках тележки *12*. Медные оправки *5* и *13* вводятся внутрь собранного кожуха пневмоцилиндрами *1* и *2* и поджимаются снизу к стыку пневмоцилиндрами *7*, *9* и *11* (рис. 22-16, *г*). Тележка *12* вместе с собранной деталью перемещается на место сварки пневмоцилиндрами *6* и *10* и сверху с помощью коленчатого рычага пневмоцилиндром опускается коробка, удерживающая флюс (рис. 22-16, *е*). Сварка выполняется двумя сварочными головками под флюсом. Затем рама *3* с закрепленным изделием поворачивается пневматическим устройством *4* (его схема дана на рис. 22-16, *д*), и производится сварка двух швов с противоположной стороны кожуха. После рельефной сварки кольцевого усилителя (рис. 22-16, *ж*) к концам балки заднего моста на стыковой машине приваривают фланцы (рис. 22-17, *а*). Балка устанавливается на машину так, что ее выемка совмещается

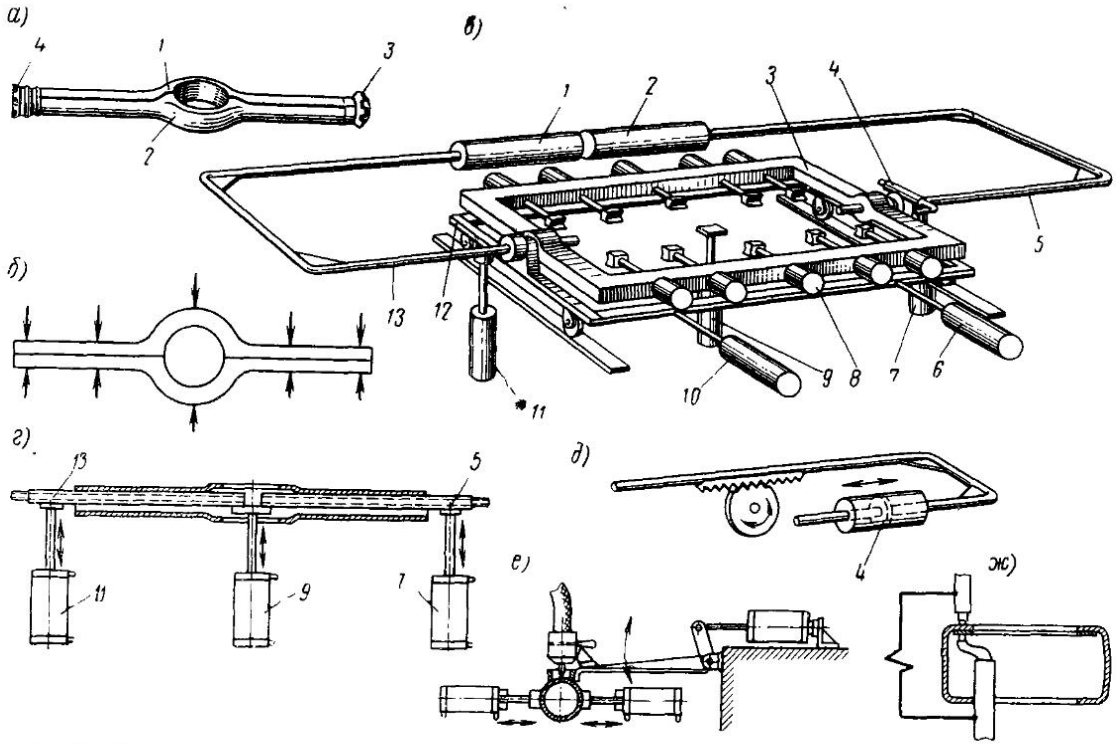


Рис. 22-16. Балка заднего моста автомобиля «Москвич» модели 407 и схема устройств для сварки

с фиксатором *1*, конец балки *2* и фланец *3* закрепляются в медных губках пневмозажимами *4* и *5* и свариваются методом оплавления. Дальнейшей операцией является приварка штампованного колпака (рис. 22-17, *б*). Изделие располагается на вращающемся шпинделе *2* с фиксатором *3*. Колпак *4* устанавлива-

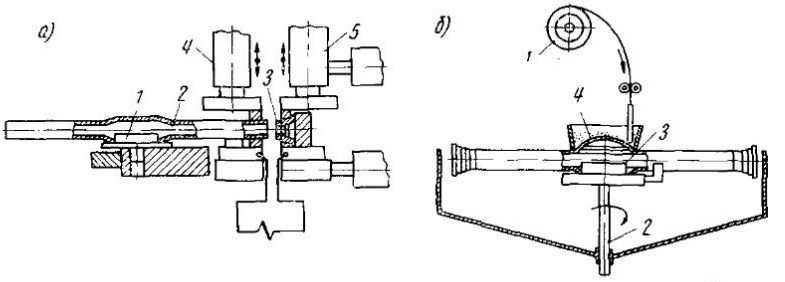


Рис. 22-17. Сварка фланцев и колпака балки заднего моста автомобиля «Москвич» модели 407

ется сверху, закрепляется прижимом и сваривается неподвижной автоматической головкой *1* под флюсом.

Определенные достоинства штампосварных деталей, естественно, не исключают эффективное использование заготовок, получаемых другими технологическими методами. В качестве характерных машиностроительных деталей, подлежащих рассмотрению, как и в предыдущем параграфе, возьмем станины, валы и колеса.

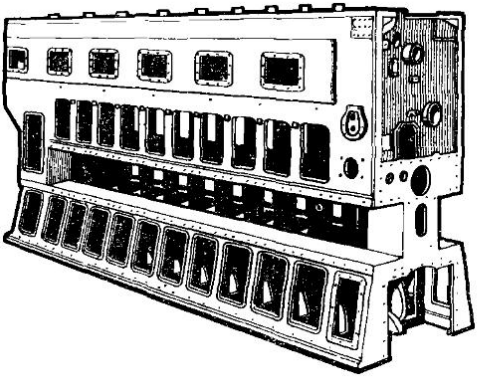


Рис. 22-18. Блок дизеля

На рис. 22-18 и 22-19 показан блок цилиндров тепловозного дизеля, выполненный из листовых элементов, усиленных приварными деталями и соединенных между собой в жесткую пространственную конструкцию. Большое количество элементов, составляющих блок, делает целесообразным предварительное укрупнение их в подузлы. Этим обеспечивается доступность и удобство выполнения отдельных сварных соединений. Однако для сложной пространственной конструкции чередование сборочных и сварочных операций может привести

к неблагоприятному суммированию погрешностей и росту отклонений размеров и формы детали. В условиях серийного производства это крайне нежелательно, так как требует увеличения

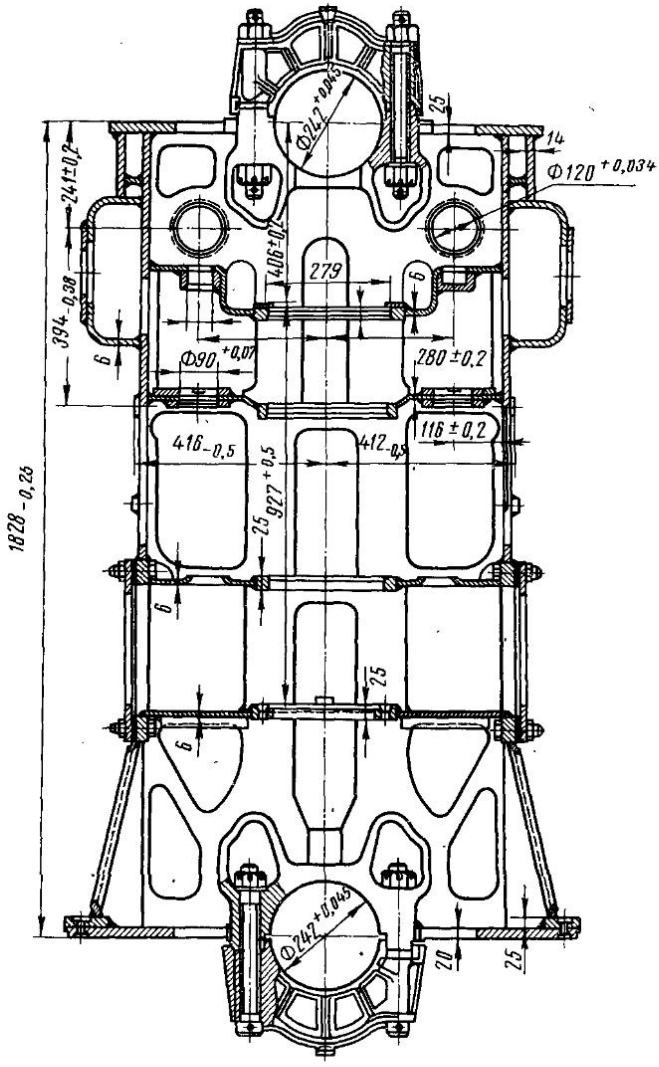


Рис. 22-19. Поперечный разрез блока дизеля

припусков на последующую механическую обработку или проведения операции правки. Поэтому укрупнение элементов в подузлы ограничено приваркой различных деталей (опор коленча-

тых валов, фланцев, усиливающих элементов) к плоским листовым заготовкам.

Общая сборка выполняется в жестком приспособлении, и в этом же приспособлении блок цилиндров подвергается сварке. Для этой цели используют специальные сборочно-сварочные стенды (рис. 22-20). Вращающаяся часть стенда представляет собой кондуктор, в котором собирают под сварку все подузлы блока. Для точного расположения собираемых элементов и надежного их фиксирования нижняя рама кондуктора *5* и верхняя съемная балка *1* имеют стойки и фиксаторы для установки вертикальных листов и валы для их расцентровки. Для выверки и установки горизонтальных листов предусмотрены стойки с линейками. Боковые стенки кондуктора *3* и *10* для установки торцовых листов блока оснащены откидными кронштейнами. Базовые места стенда рассчитаны на сборку и сварку по технологическим размерам, обеспечивающим в результате усадки при сварке нужные размеры блока. Кантователь выполнен в виде двух колец *2*, жестко соединенных платформой *5* и установленных на роликах *4* и *9*. Привод вращения от мотора *8* через редуктор *7* и вал *6* с помощью цевочного зацепления осуществляется с двух сторон, что предотвращает возможность скручивания платформы *5* и повышает точность сборки.

В процессе эксплуатации блок дизеля подвергается значительным вибрационным нагрузкам и поэтому требования к качеству выполнения швов весьма жесткие. Большинство швов блока угловые; целесообразно выполнять их под флюсом в положении «в лодочку». С помощью кантователя (рис. 22-20) такое положение обеспечивается только при выполнении горизонтальных швов, а сварку вертикальных швов производят в другом приспособлении. Если рассмотренный выше кантователь расположить на платформе, наклоняющейся в другой плоскости на угол в 30° в каждую сторону, то такой манипулятор позволяет выполнять в положении «в лодочку» угловые швы обоих направлений.

При изготовлении столь сложных деталей в поточной линии большая продолжительность сборочно-сварочных работ на одном рабочем месте заставляет одновременно использовать несколько одинаковых стендов, работающих параллельно.

Примером иной организации поточного производства сложной сварной детали типа станины может служить изготовление коробки бортовых фрикционов трактора Т-130. В этом случае жесткость собранной коробки оказывается достаточной для выполнения сварочных операций без закрепления. Поэтому общая сборка производится, как и в случае изготовления блока, целиком, на одном из трех работающих параллельно сборочных стендах, а сварка расчленена на ряд операций и выполняется на разных рабочих местах линии тележечного конвейера. Схема

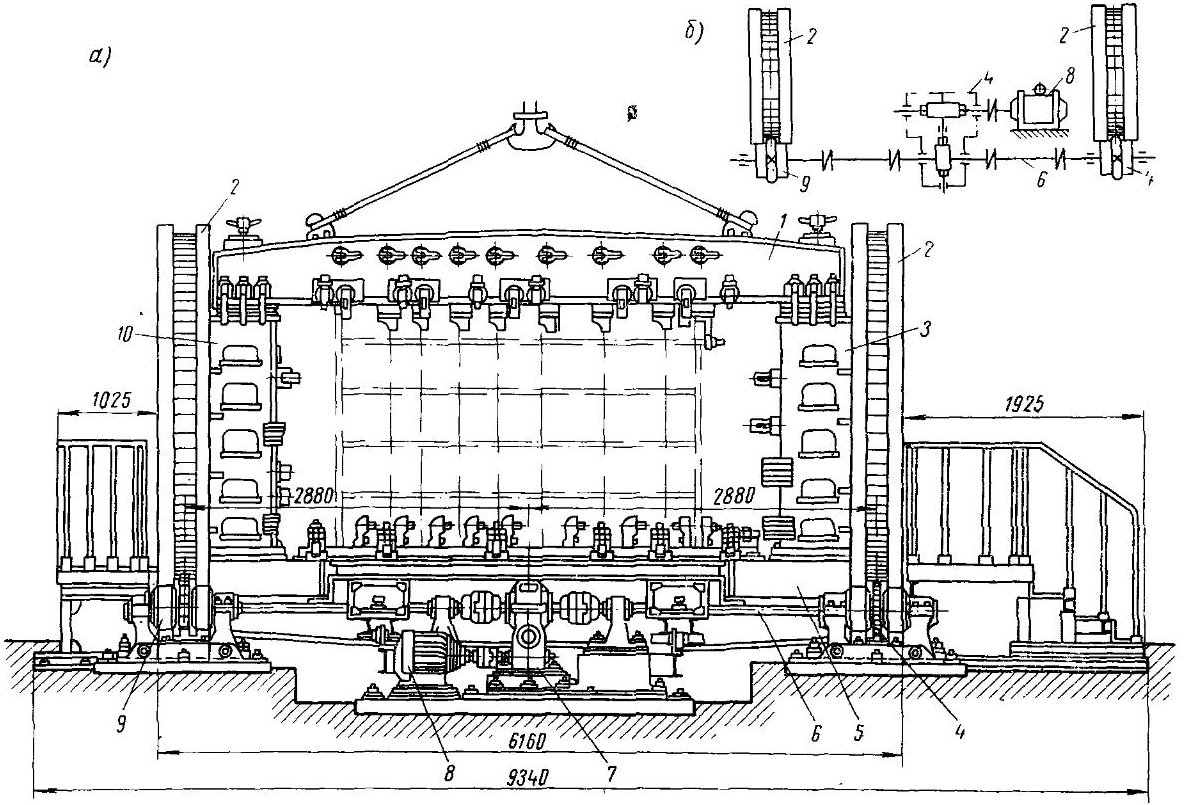


Рис. 22-20. Стенд для сборки и сварки блока цилиндров тепловозного дизеля:
а) чертеж стенда; *б)* схема механизма вращения

этой поточной линии приведена в главе XXIV на рис. 24-5. Механизация сварочных операций обеспечивается тем, что изделия на тележках конвейера закрепляются в кантователях, а каждое рабочее место оснащено оборудованием, соответствующим выполняемой сварочной операции (рис. 22-21).

При серийном производстве деталей, подобных рассмотренному блоку цилиндров, существенным является вопрос: необходима ли термообработка изделия после сварки. Для прочности конструкции термообработка блока цилиндров не нужна. Однако высокие требования к прямолинейности оси коленчатого вала вызывают опасения, что могут возникнуть искажения в результате механической обработки детали, имеющей остаточные сварочные напряжения, и накапливания деформаций с течением времени после сварки. Для снятия остаточных напряжений и стабилизации структуры сварных соединений термообработка является полезной. В условиях поточного производства наличие операции термообработки вызывает весьма большие трудности, так как нарушает поток и создает необходимость задела готовых деталей из-за продолжительности цикла нагрева, выдержки и последующего охлаждения. Изложенные соображения являются достаточно общими и применимы не только к блоку цилиндров, но и к станинам станков, и к другим сварным деталям типа станин, к которым предъявляются требования точности и неизменяемости размеров. Для подобных деталей решение вопроса о необходимости термообработки должно приниматься на основе конкретных наблюдений и измерений и сопоставления их результатов с требованиями технических условий.

Для сварных деталей типа валов, осей и роликов характерным является наличие кольцевых швов, соединяющих отдельные заготовки друг с другом. В зависимости от размеров деталей, материала заготовок и конструктивного оформления сварных соединений методы их сварки могут быть различны. Так, на рис. 22-22 показан карданный вал автомобиля, свариваемый из трех частей электродуговой сваркой. Шлицованный конец *1* и вилка кардана *3* выполняются горячей штамповкой из стали 40 и 40Х, труба *2* — из стали 35 и 45. Карданные валы диаметром более 40 *мм* сваривают под флюсом, диаметром 40 *мм* и менее — в среде CO_2.

Сборка осуществляется по посадочным поверхностям механически обработанных заготовок, а для их сварки используют специальные установки. Из-за малой протяженности кольцевых швов производительность таких установок существенно зависит от затрат времени на вспомогательные и установочные операции. С целью их сокращения стараются совмещать операции во времени, выполняя однотипные кольцевые швы несколькими сварочными головками одновременно, и стремятся автоматизировать весь цикл работы. Для подачи изделия под сварочные

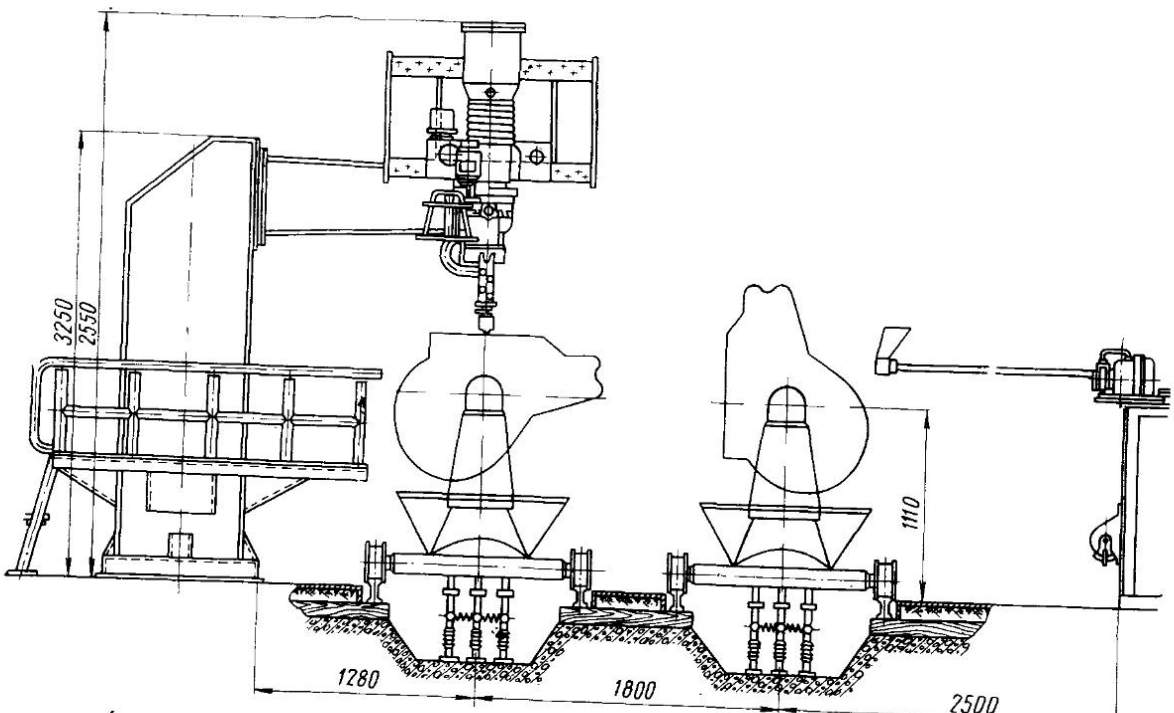


Рис. 22-21. Сварка коробки бортовых фрикционов в линии тележечного конвейера

головки используют четырехпозиционное приспособление, схематически показанное на рис. 22-23. Собранные карданные валы *1* устанавливают в приспособление на позицию *А*. При повороте барабана *2* на угол 90° изделие поступает под сварочные головки *4* на позицию *Б*. При этом одновременно включают привод вращения детали с помощью муфты *3* и питание сварочных головок. После завершения сварки обоих швов барабан снова

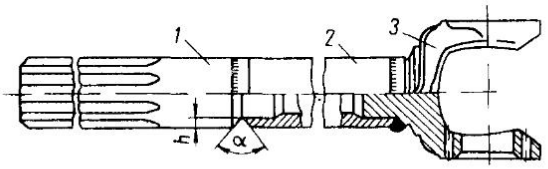


Рис. 22-22. Карданный вал автомобиля

поворачивается на 90°, подавая под сварку следующий вал. Весь цикл автоматизирован за исключением установки и съема деталей.

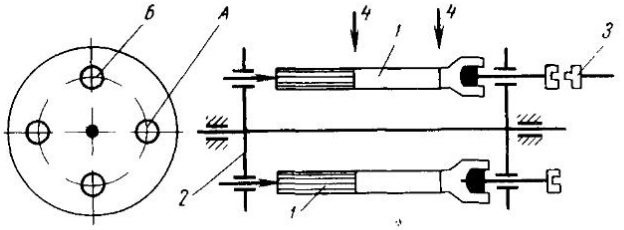


Рис. 22-23. Схема четырехпозиционного приспособления

Другим примером сварной детали с кольцевым швом является опорный ролик трактора (рис. 22-24). Сварочный станок располагают в линии механической обработки литых или горячештампованных заготовок. Предварительно обработанные половинки роликов подают в загрузочное устройство, представляющее собой гравитационный транспортер с отсекателями для штучной выдачи заготовок. Наличие в заготовках обработанной поверхности отверстия позволяет механизировать не только сварочную, но и сборочную операцию и обходиться без постановки прихваток. Половинки роликов одеваются на оправку и прижимают друг к другу так, что стык оказывается в плоскости расположения сварочной головки. Вращение оправки обеспечивает сварку кольцевого шва, освобождение ролика от

закрепления и съем с оправки — выдачу сваренного изделия. Полная автоматизация этих операций достигается при использовании автомата роторного типа, описанного ниже, в главе XXIV.

Выбор метода выполнения кольцевого шва деталей типа валов и осей часто диктуется их конструктивным оформлением. Так, наличие в надставке полуоси трактора МТЗ-7 (рис. 22-25) внутренних шлиц заставляет расчленять деталь на две части с целью получения этих шлиц протяжкой. Однако сварка такой составной детали на стыковой машине затрудняется опасностью повреждения шлиц сварочным гратом, а использование дуговой сварки — возможностью искажений прямолинейности оси от

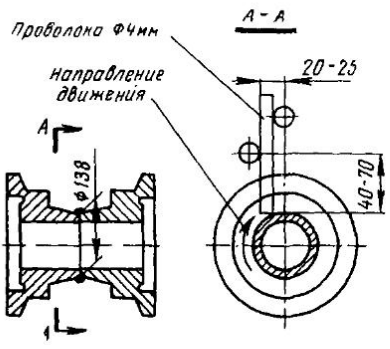


Рис. 22-24. Сварной ролик трактора С-80

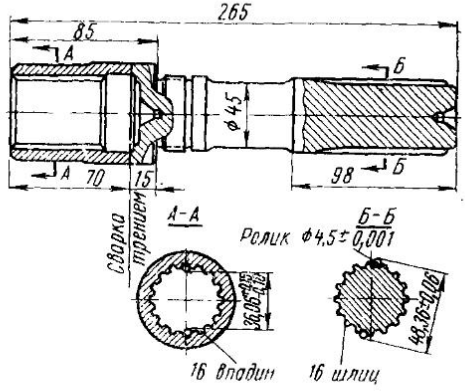


Рис. 22-25. Надставка полуоси трактора МТЗ-7

сварочных деформаций. Поэтому при изготовлении таких осей используют сварку трением на специальной машине.

Зубчатые колеса, шкивы, барабаны и другие детали подобного типа изготовляют с помощью дуговой сварки. Применительно к зубчатым колесам расчленение детали на части и выбор метода их соединения определяются как различием требований к свойствам металла обода, центра и ступицы, так и соображениями облегчения точной обработки зубьев. Так, например, блоки шестерен авиационных двигателей расчленяют из-за необходимости обеспечить доступность зубьев для шлифовки. При последующем объединении шестерен в блок искажения точно обработанных поверхностей должны быть минимальны. Поэтому дуговая сварка для этой цели оказывается малопригодной. Перспективной является электроннолучевая сварка, позволяющая получать швы с глубоким и узким проплавлением при минимальных остаточных деформациях. При-

мер таких шестерен, соединенных электроннолучевой сваркой показан на рис. 22-26. Такое решение можно также использовать и для присоединения шестерни к валу.

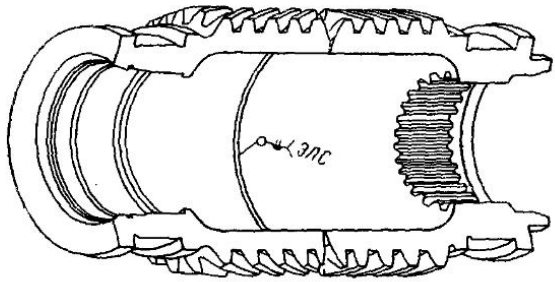


Рис. 22-26. Шестерни, соединенные электроннолучевой сваркой

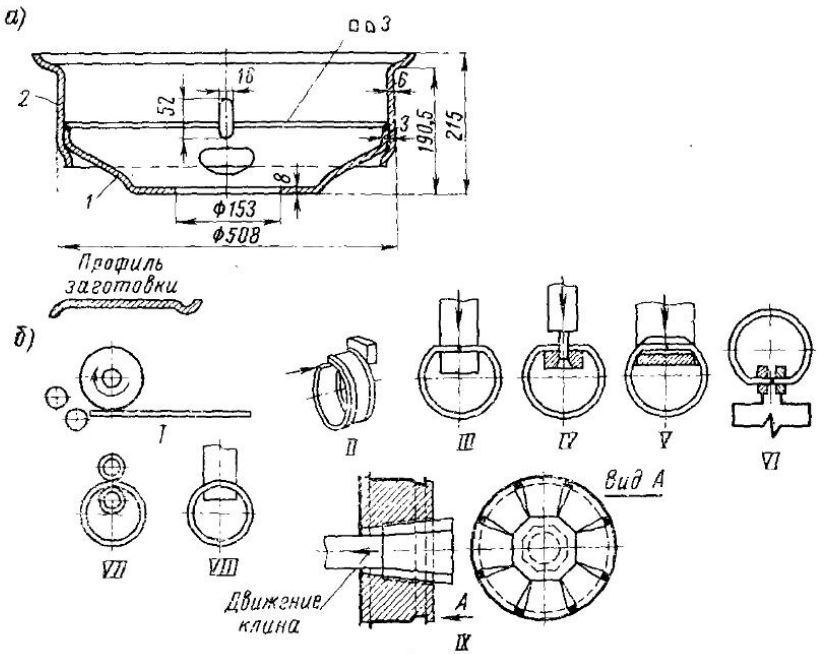


Рис. 22-27. Колесо грузового автомобиля:
а) чертеж колеса; *б*) операции изготовления обода колеса

В колесах из штампованных или гнутых тонкостенных элементов наряду с дуговой сваркой эффективно используют контактную сварку. Примером могут служить автомобильные

колеса, производство которых с использованием как дуговой, так и контактной сварки осуществляется в условиях массового производства.

Колесо грузового автомобиля (рис. 22-27, *а*) состоит из диска *1* и обода *2*. В поточной линии изготовления обода заготовка, поступающая из заготовительного цеха в виде полосы специального профиля, проходит ряд операций: вальцовку *I*, выправку *II*, спрямление концов для облегчения их зажима при сварке *III*, обрезку кромок с целью обеспечения их параллельности *IV*, сведение концов *V*, сварку встык методом оплавления *VI*, снятие грата *VII*, скругление обода *VIII*, обдирку грата наждачным кругом и калибровку *IX* (рис. 22-27, *б*). Диск колеса штампуется из листа и имеет по отбортованному краю меньшую толщину за счет специальной операции раскатки. Диск запрессовывается в обод на прессе и сваривается под флюсом непрерывным угловым швом в автоматической линии, описанной ниже, в главе XXIV.

Ободы и диски колес легковых автомобилей имеют меньшую толщину и свариваются точками на специальных многоэлектродных машинах типа ТМК-6-300. Обод с запрессованным в него диском укладывается на приемное устройство машины, и все операции осуществляются автоматически. Шесть сварочных клещей машины с помощью подъемноповоротного стола ставят на каждом изделии 12 точек за два приема. Производительность машины ТМК-6-300 составляет 120—200 колес в час в зависимости от толщины свариваемых элементов.

§ 3. СВАРКА ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

При изготовлении приборов приходится сваривать самые разнообразные материалы и их сочетания при толщине элементов от нескольких десятков ангстрем до нескольких миллиметров. Специфику требований к сварным соединениям и своеобразие технологических приемов сварки и применяемого оборудования проследим на некоторых характерных примерах.

Упругие чувствительные элементы давления (мембраны, сильфоны) изготавливают обычно из бронзы (бериллиевой или фосфористой) или из нержавеющей стали толщиной 0,3—0,05 *мм*, подвергнутой нагартовке для создания определенных упругих характеристик. К сварным соединениям этих элементов предъявляют требования прочности и плотности. Сваривают эти элементы аргонодуговой или контактной сваркой, принимая меры по ограничению сварочного разогрева. Аргонодуговая сварка обеспечивает получение более плотных швов и требует менее сложной технологической оснастки; интенсивность разогрева всего изделия при этом оказывается несколько выше, чем при контактной сварке.

Для плотного прижатия свариваемых кромок, уменьшения общего нагрева изделия и предотвращения прожогов используют сварочные приспособления «холодильники» в виде медных дисков (рис. 22-28). Сварку обычно производят токами в несколько ампер с сопловой защитой зоны шва или с применением стеклянных накладных микрокамер для уменьшения сдувания

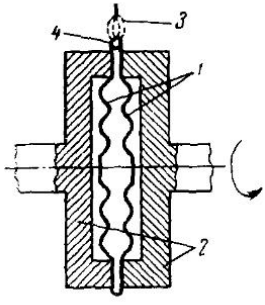


Рис. 22-28. Схема аргоно-дуговой сварки мембраны:

1 — элементы мембраны; *2* — зажимы — холодильники (медь); *3* — сварочная дуга; *4* — шов

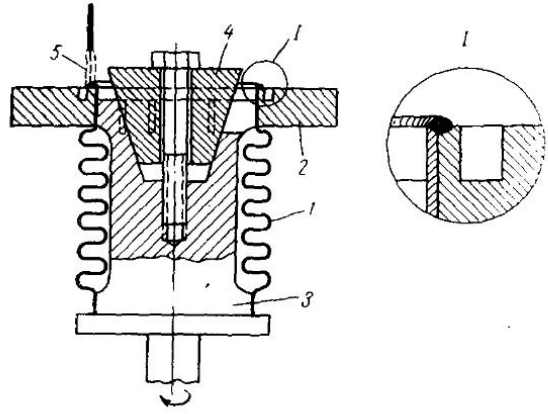


Рис. 22-29. Сварка сильфона с фланцем:

1 — сильфон; *2* — фланец; *3* — оправка — холодильник; *4* — разжимающий конус; *5* — дуга

аргона. В случае приварки сильфона к фланцу для прижатия тонкостенной детали и теплоотвода от места сварки используют массивную разжимную оправку, а для уравнивания толщин соединяемых элементов создают канавки (рис. 22-29).

При роликовой конденсаторной сварке (рис. 22-30) нагрев значительно меньше, поэтому «холодильники» могут не применяться, но требуется специальное приспособление для закрепления и синхронного вращения детали и ролика-электрода, предназначенное для определенного типоразмера изделия.

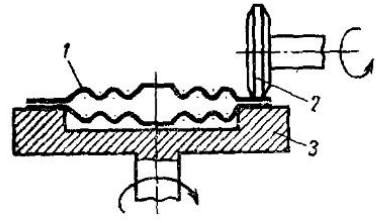


Рис. 22-30. Контактная сварка мембранного чувствительного элемента:

1 — мембрана; *2* — ролик-электрод; *3* — опора-электрод

При изготовлении полупроводниковых приборов приварка герметизирующих корпусов является одной из заключительных операций. Так как собранный и провереиный прибор

(например, транзистор) имеет весьма чувствительный к нагреву кристалл *4* (рис. 22-31) с выводами, припаянными легкоплавким припоем с температурой плавления около 150° С, то воздействие процесса сварки должно быть минимальным. Первоначально для этой цели использовали конденсаторную контактную сварку по схеме, показанной на рис. 22-32. Однако при таком способе герметизации процент брака из-за выплесков внутрь корпуса и возникновения перегрева оказывается весьма большим. Применение холодной сварки позволяет исключить нагрев, но воз-

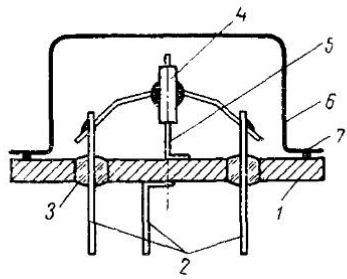


Рис. 22-31. Схема конструкции транзистора:

1 — основание корпуса; *2* — выводы; *3* — изолятор; *4* — кристалл; *5* — кристаллодержатель; *6* — герметизирующий корпус; *7* — место сварки

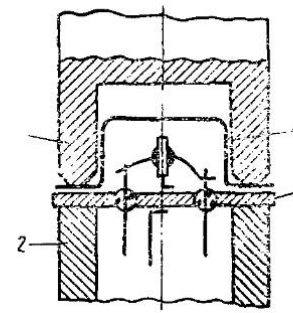


Рис. 22-32. Схема контактной сварки корпуса транзистора с основанием:

1 — верхний электрод; *2* — нижний электрод; *3* — основание корпуса; *4* — герметизирующий корпус

никающие при этом значительные пластические деформации могут вызвать разрушение изоляторов и кристаллодержателей. Ограничения деформации центральной части корпуса прибора достигаются созданием выточек, уменьшением жесткости фланцевой части корпуса или образованием гофр (рис. 22-33, *а, б, в*).

При изготовлении электронных приборов (радиоламп, тиратронов, кинескопов и т. п.), для соединения тонких проволочек, лент, фольги применяют главным образом конденсаторную сварку. Для точной фиксации элементов при их сварке используют специальные приспособления или предусматривают наличие фиксирующих выступов и впадин на соединяемых деталях.

Массовый характер производства деталей радиопромышленности требует осуществления механизации и автоматизации процесса изготовления. Примером детали, выпускаемой десятками миллионов штук в год, является резистор МЛТ (рис. 22-34), имеющий два одинаковых сварных соединения

колпачок-вывод. Схема специального автомата для приварки выводов показана на рис. 22-35. Корпус с надетыми колпачками *2* попадает из бункера в конденсаторную сварочную установку *1* и зажимается фигурными электродами *3*. Проволока для образования выводов одновременно подается к обоим кол-

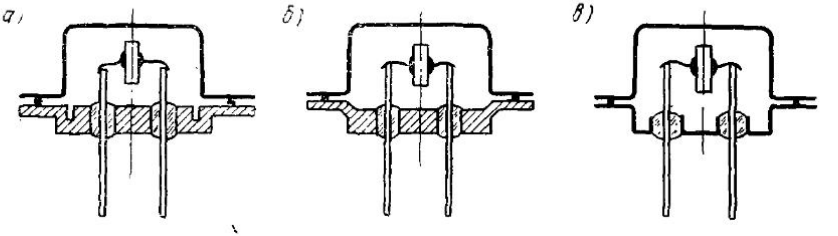


Рис. 22-33. Способы уменьшения деформации центральной части корпуса транзистора при холодной сварке:

а) разгрузочная канавка; *б*) точеный фланец с тонким буртом; *в*) тарелочный фланец

пачкам из бухт *4*, производится сварка, отрезка и выдача готового резистора. Производительность таких автоматов составляет 6000 деталей в час.

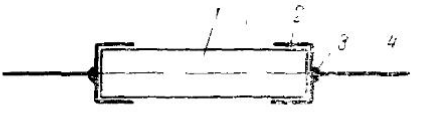


Рис. 22-34. Схема конструкции резистора МЛТ:

1 — керамическая трубка с напыленным резистивным слоем; *2* — контактный колпачок; *3* — место сварки; *4* — вывод

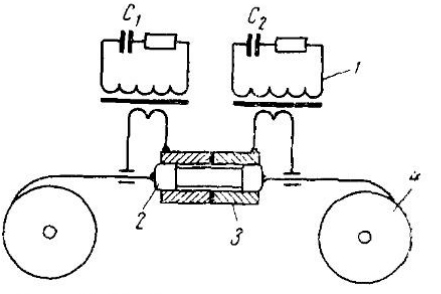


Рис. 22-35. Схема приварки выводов к сопротивлениям МЛТ

Для монтажа электрических соединений в приборостроении помимо пайки начинают все шире использовать сварку. При соединении элементов толщиной 0,3—1,0 *мм* обычно применяют предварительное скручивание выводов и оплавление их дугой при касании угольным карандашом (рис. 22-36). Сварное соединение при этом имеет вид шарика диаметром 1,5—2 *мм*.

При монтаже пленочных микросхем проволочные проводники диаметром 0,07—0,02 *мм* присоединяют к напыленным металлическим пленкам, используя для этого контактную сварку

с односторонним подводом тока (рис. 22-37). Весьма существенным в этом случае является возможность визуального контроля качества сварки по характеру расплавления проводника в зоне

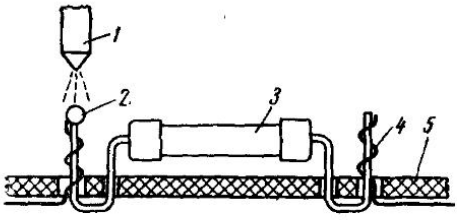


Рис. 22-36. Схема радиомонтажной сварки угольным карандашом:

1 — угольный карандаш (электрод); *2* — «шарик»; *3* — радиоэлемент; *4* — скрученные выводы; *5* — монтажная плата

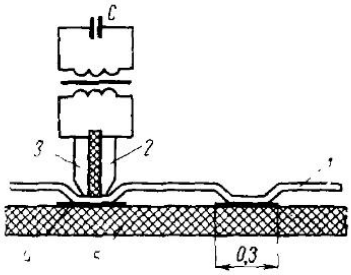


Рис. 22-37. Схема микросварки при изготовлении пленочных микросхем:

1 — проводник; *2, 3* — электроды; *4* — слой напыленного металла; *5* — диэлектрическая подложка

сварки. К недостаткам сварных электромонтажных соединений следует отнести их ограниченную ремонтоспособность.

ГЛАВА XXIII

СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ И РЕЛЬСОВ

§ 1. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

В настоящее время в строительстве применяют преимущественно сборные железобетонные конструкции, изготавливаемые индустриальными методами на заводах. Монолитные железобетонные сооружения строятся значительно реже. Все сварные соединения блоков сборных железобетонных изделий, взаимные соединения их (закладные части), а также соединения арматуры монолитного железобетона выполняют электрической сваркой.

В качестве арматуры наиболее часто применяют стержни круглого или периодического профиля (винтообразного очертания). Такой профиль арматуры улучшает сцепление стали с бетоном и позволяет увеличивать несущую способность стержней. Для арматуры применяют: холоднотянутую проволоку диаметром 3÷10 *мм* из углеродистой стали; горячекатаную сталь периодического профиля марки Ст. 5 диаметром 10÷80 *мм*; низколегированную горячекатаную сталь периодического профиля марок 25Г2С, 35ГС, 18Г2 и др.; а также прочные стали марок 80С, 20ХГСТ, 20ХГФЦ; круглый прокат из стали марок Ст. 3 и Ст. 0.

В практике строительства особенно широко распространена арматура периодического профиля из стали марки Ст. 5, а также из низколегированных сталей. Термообработанные стали в арматуре железобетона применяют редко. Сталь высокой прочности широко используют в предварительно напряженной арматуре, но она, как правило, сварке не подвергается. Ниже приведены способы соединения арматуры.

Контактной стыковой сваркой соединяют стержни встык при одинаковых и разных диаметрах. Сварные соединения при этом получаются равнопрочными основному металлу при сварке

стержней из всех указанных выше материалов, но при условии сохранения отношений диаметров стержней в пределах не выше 1,25 ÷ 1,50.

Контактной точечной сваркой соединяют различные элементы арматуры, например, узлы каркаса и сеток. Типы соединений стержней арматуры круглого и периодического профилей приведены на рис. 23-1, *а*. Этой сваркой успешно сваривают между

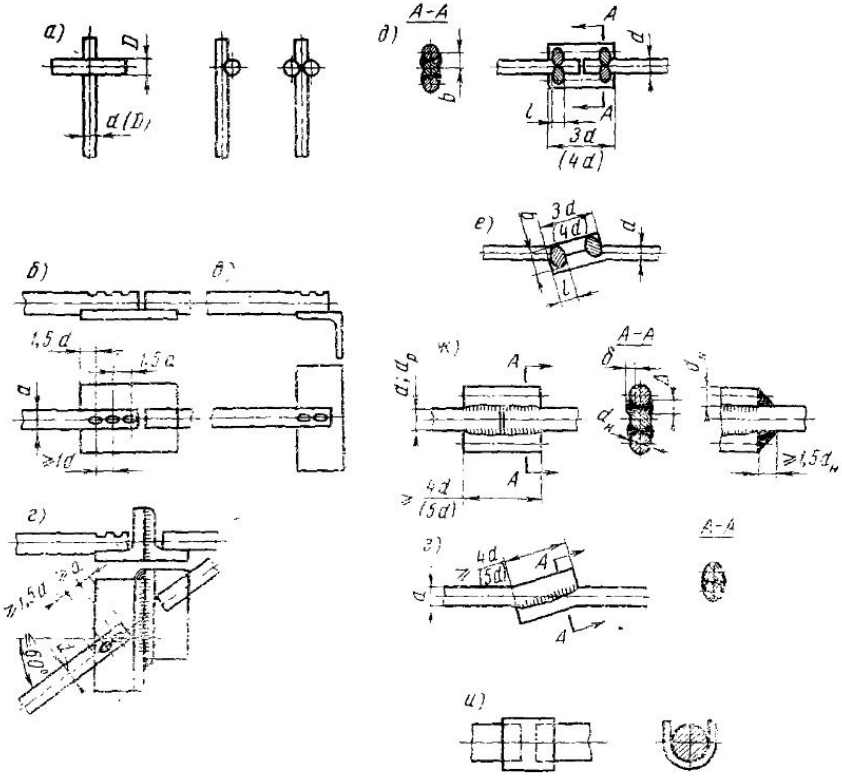


Рис. 23-1. Примеры сварных соединений арматуры железобетона (в скобках указаны размеры арматуры периодического профиля)

собой стержни диаметром 5 ÷ 50 *мм*. Нередко круглые стержни соединяются с плоскими элементами. На рис. 23-1, *б* приведен пример соединения стержней периодического профиля с полосовой сталью; на рис. 23-1, *в* приведен пример соединения с уголком, направленным к стержню под углом $\alpha = 90°$, а на рис. 23-1, *г* — под острым углом. Экспериментально установлено, что соединения стержней периодического и круглого профилей с плоскими элементами рациональны при постановке двух

или трех сварных точек; увеличение количества сварных точек не вызывается необходимостью.

При сварке арматуры из стали марки Ст. 5 с повышенным содержанием углерода, а также бессемеровской и низколегированной, точечные соединения иногда обладают повышенной хрупкостью. Хрупкость соединения особенно возрастает с увеличением числа стержней, пересекающихся в одном узле. Для уменьшения хрупкости сварных точечных соединений применяют рациональные технологические процессы, в частности термическую обработку, нагревая соединение на точечной машине при замыкании электродов. Испытания прочности точечных соединений арматуры производят на специальных образцах в разрывных машинах.

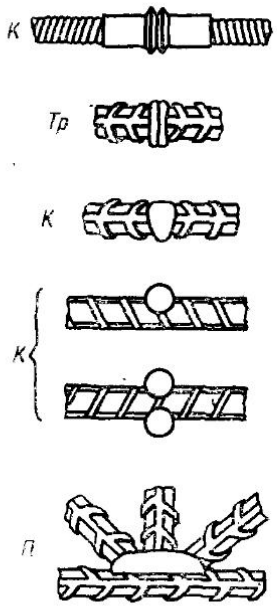


Рис. 23-2. Виды сварных соединений арматуры при разных технологических процессах сварки:
к — контактная; *Тр* — трением; *п* — плавлением

Электродуговой точечной сваркой соединяют стержни круглого и периодического профиля диаметром $\div 20$ *мм* из стали разных марок. Для сварки применяют электроды с качественными покрытиями или пистолеты-полуавтоматы, выполняющие точки под слоем флюса. При этом наложение точки производят в нижнем положении (рис. 23-1, *д, е*).

Сварку продольными швами производят, как указано на рис. 23-1, *ж, з*. Иногда длинные швы накладывают лишь с одной стороны, но это менее рационально. В случае применения малоуглеродистых сталей (Ст. 3 и Ст. 5) диаметр стержней может доходить до 80 *мм*; при низколегированных сталях его величина уменьшается. Сварочные работы производят в нижнем и вертикальном положениях. Площадь сечения накладок $F=1{,}3 \div 1{,}5$ от площади сечения основных стержней из стали марки Ст. 3 и $1{,}5 \div 2{,}0$ из сталей марок Ст. 5 и низколегированных; ширина шва $\Delta=0{,}5\,D$, где D — диаметр стержня; глубина $\delta=0{,}25\,D$ (рис. 23-1, *ж*).

Сварка ванным способом применяется для соединений арматурных стержней круглого и периодического профилей встык. Схема сварки при стальных подкладках приведена на рис. 23-1, *и*.

На рис. 23-2 приведены некоторые рекомендуемые виды соединений арматуры в зависимости от технологического процесса сварки. При дуговой сварке плавлением рекомендуются соединения встык и тавровые. В этих соединениях достигается хорошее проплавление встык. Ряд примеров приведен по сварке соединения втавр. На рис. 23-2 приведены также сварные соединения арматуры, сваренные контактным способом и трением.

§ 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ АРМАТУРНЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Процесс изготовления арматуры слагается из заготовительных операций, электросварки стержней, сеток или плоских каркасов и укрупнительной сборки пространственных каркасов.

Заготовка элементов арматуры небольших сечений осуществляется специальными механизмами (рис. 23-3). Проволока из бухты *1* протягивается через барабан для правки *2* тянущими роликами *3*, проходит между ножами *4*, находящимися в исходном положении, упирается в стержень отмеривающего устройства *5* и включает режущий нож *4*.

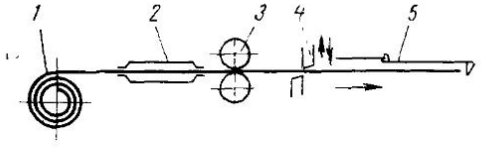


Рис. 23-3. Принципиальная схема автомата для правки и резки

Арматура более крупных сечений поставляется в виде отдельных стержней. Для уменьшения отходов стержни сваривают в бесконечную плеть на стыковой машине, а затем разрезают на мерные заготовки.

Прошедшие предварительную обработку арматурные стержни поступают на сборку элементов конструкций. Сетки составляются из взаимно-перпендикулярных стержней, соединяемых контактной точечной сваркой, и могут быть рулонные и плоские. Их назначение — армирование плит перекрытий, перегородок и других плоских элементов конструкций.

Автоматические линии для сварки сеток арматуры железобетона выполняют все операции, начиная от правки прутка и перемещения изделия до отрезки готовой сетки нужной длины.

Плоские каркасы, широко используемые в балочных перекрытиях, состоят обычно из продольной арматуры (поясов) и соединительной решетки в виде отдельных стержней или непрерывной змейки. Как и при изготовлении сеток, плоские каркасы сваривают на точечных контактных машинах.

Пространственные каркасы обычно собирают из отдельных плоских элементов, но могут изготавливаться и гибкой предварительно заготовленного плоского каркаса требуемых размеров. Пространственные конструкции больших размеров иногда собирают и сваривают в кондукторе целиком, а затем разрезают на части для доставки на место монтажа.

Методы, техника и технология сварки в значительной степени определяются местом производства работ (завод, полигон, монтажная площадка). Контактная сварка является наиболее производительным способом сварки арматуры, но ее примене-

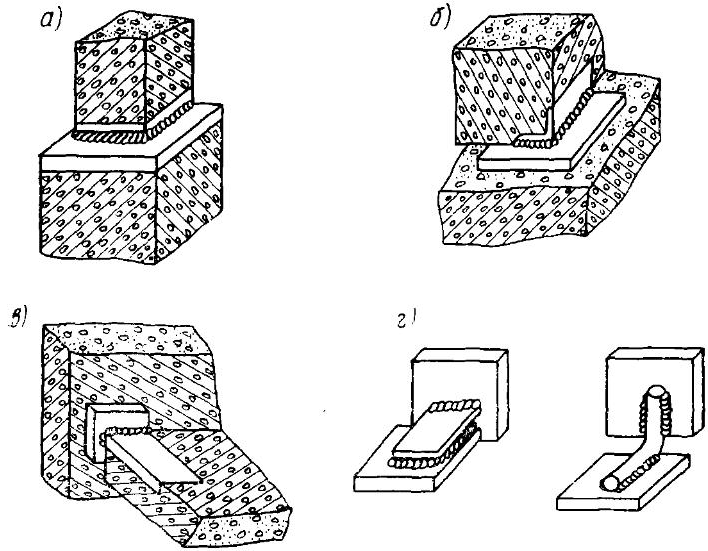


Рис. 23-4. Монтажные сварные соединения сборных железобетонных элементов

ние обычно ограничивается заводами и полигонами сборного железобетона. При изготовлении каркасов монолитного железобетона и выполнении монтажных соединений сборного железобетона применяют главным образом электродуговую, ванную и электрошлаковую сварки.

Для монтажной сварки сборные железобетонные элементы жилых зданий обычно имеют закладные детали, расположенные в местах примыкания одного элемента к другому. При монтаже зданий эти закладные детали сваривают ручной дуговой сваркой либо непосредственно (рис. 23-4, *а, б, в*), либо с помощью дополнительных связующих элементов: пластин, уголков, швеллеров или арматурных прутков (рис. 23-4, *г*).

В промышленных и энергетических сборных железобетонных сооружениях стыковку элементов производят сваркой арматурных стержней, выступающих из каждого сборного элемента. При выполнении таких соединений, помимо ручной дуговой сварки, все шире применяют ванную и электрошлаковую сварки, когда между торцами свариваемых стержней ванна расплавленного металла сохраняет жидкое состояние на протяжении всей сварочной операции. Сварка может производиться при горизонтальном и вертикальном положении стержней, расположенных под любым углом друг к другу. Чтобы предотвратить растекание жидкого металла и обеспечить формирование шва, применяют съемные инвентарные формы, а при ванной сварке также стальные остающиеся формы-подкладки. На рис. 23-5 показаны примеры подготовки соединений для ванной сварки с остающимися стальными формами. При сборке встык (рис. 23-5, *а*), под углом (рис. 23-5, *б, в*) и с пересечением (рис. 23-5, *г*) стержней, расположенных в горизонтальной плоскости, разделка торцов не производится, сварка выполняется одиночным обмазанным электродом. Вертикальные стыки обычно выполняют также одноэлектродной сваркой с применением чашеобразных стальных форм, торец верхнего стержня имеет скос (рис. 23-5, *д*). Сборка под сварку пересекающихся стержней показана на рис. 23-5, *е, ж*.

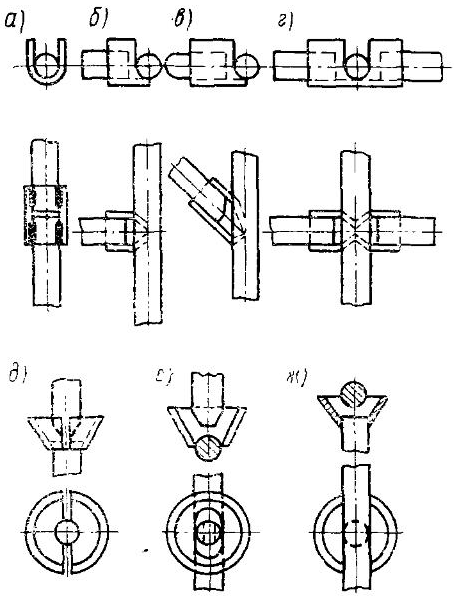


Рис. 23-5. Сварные соединения арматуры, выполняемые ванным способом

Следует иметь в виду, что при использовании способа сварки с остающейся формой сварные соединения не поддаются визуальному контролю и плохо поддаются контролю просвечиванием. Кроме того, производительность ванной сварки с остающейся формой существенно ниже ванной и электрошлаковой сварки в инвентарных формах (медных, двухслойных, керамических, графитовых и т. п.). При выполнении монтажных стыков сборных железобетонных элементов ванную сварку с остающи-

мися стальными формами применяют в случае коротких выпусков стержней арматуры, когда нет возможности производить сварку в инвентарных формах. При достаточной длине выпусков использование инвентарных форм более целесообразно, но для этого требуется высокая точность сборки концов стержней. Соосность выпусков и предупреждение искривления их осей должны обеспечиваться комплексом кондукторов и шаблонов.

Конструкции медных форм обычно предусматривают канавку по периметру шва (рис. 23-6). Такие усиления требуются для

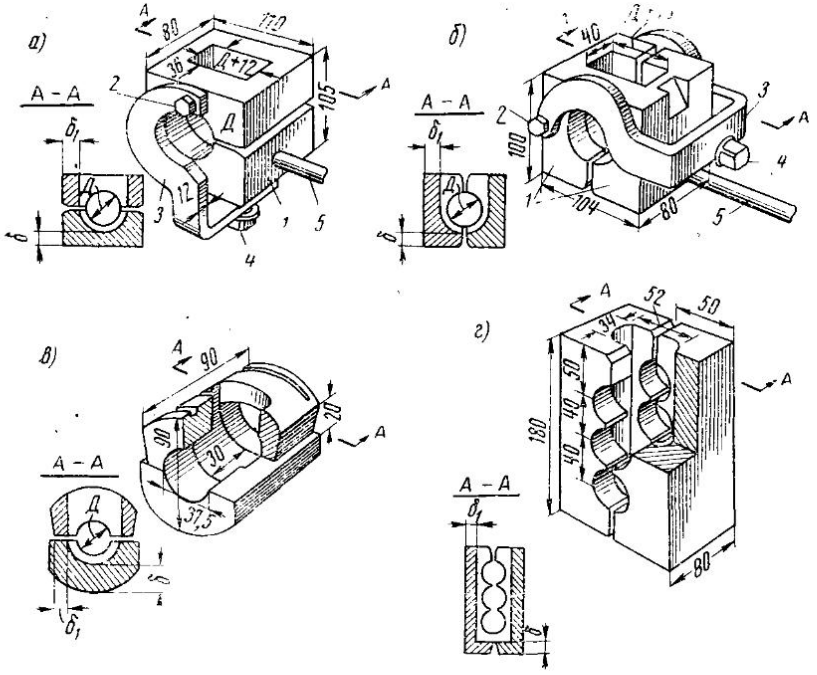


Рис. 23-6. Конструкции инвентарных составных медных форм с канавками для сварки стыковых соединений горизонтальных стержней:
а, б, в) — однорядных; *г)* многорядных

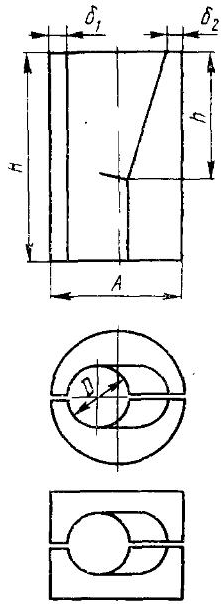
сварных соединений, выполняемых многоэлектродной ванной или электрошлаковой сваркой и предназначенных для эксплуатации под действием статической нагрузки. Соединения стержней под переменную нагрузку не должны иметь усилений. Поэтому для их сварки применяют медные формы без канавок, и сварку осуществляют одиночными электродами.

Для стыков горизонтальных стержней применяют формы с разъемом как в горизонтальной, так и в вертикальной

плоскости. Закрепление их на стержнях производят посредством накидной скобы, шарнирно соединенной с одной из половин (рис. 23-6, *а, б*).

Толщина стенок медных форм должна быть достаточной для обеспечения теплоотвода от ванны, а также для предотвращения подплавления их дугой или теплом шлаковой ванны. Поэтому толщина донной части должна быть $\geqslant$ 20 *мм*, а боковых стенок — 20 *мм*.

Для стыков вертикальных стержней применяют формы из двух половин с разъемом в вертикальной плоскости. Характер-



D	A	H	h	δ_1	δ_2	
23-41	80-110	90-120	55-75	15-20	10-15	мм

Рис. 23-7. Конструкции инвентарных медных форм для сварки стыковых соединений вертикальных стержней диаметром 20—36 *мм*

ные размеры таких форм для сварки стержней диаметром 20—36 *мм* показаны на рис. 23-7.

Рассмотренные приемы ванной и электрошлаковой сварки применяют и при выполнении соединений пространственных каркасов.

§ 3. СВАРКА СТЫКОВ РЕЛЬСОВ

С увеличением скорости движения поездов износ концов рельсов и ходовой части подвижного состава резко увеличивается. Поэтому сокращение количества рельсовых стыков за счет

увеличения длины рельсов с 12,5 до 25, 37, 50 *м*, а тем более переход к бесстыковым плетям рельсов длиной 800 *м* дает большой экономический эффект.

С 1958 по 1966 г. в СССР было уложено более 71 000 *км* железнодорожных сварных рельсов, из них 51 400 *км* выполнено контактной сваркой и в том числе около 7000 *км* бесстыкового пути.

Преимущественное применение контактной сварки объясняется высокой и стабильной прочностью получаемых стыков, высокой ее производительностью, малой трудоемкостью и возмож-

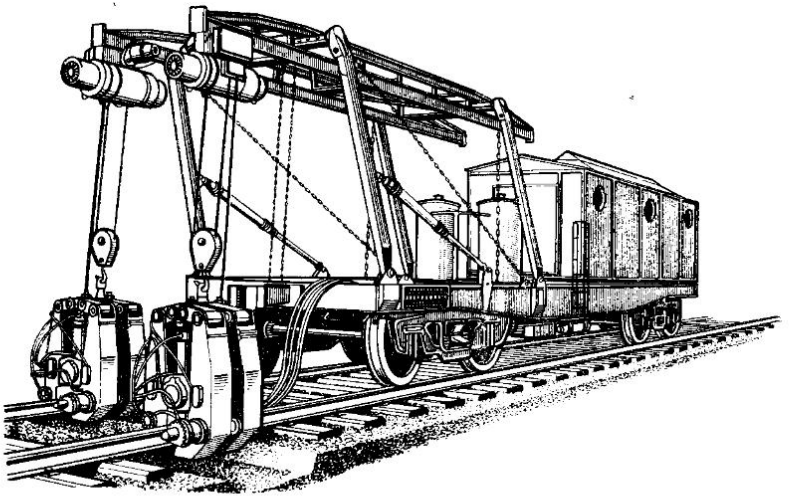


Рис. 23-8. Передвижная рельсосварочная машина ПРСМ-1

ностью механизации и автоматизации. Сварка обычно выполняется оплавлением с подогревом на стыковых контактных машинах мощностью от 300 до 600 *кв·а*. Весь цикл подготовки рельсов, сварки и последующей обработки стыков производят в поточных механизированных линиях специальных рельсосварочных предприятий и рельсосварочных поездов.

Хотя основным способом сварки рельсов остается контактная сварка, определенные перспективы развития имеет и газопрессовая сварка. Эта сварка обеспечивает высокое качество стыков рельсов из высокоуглеродистых и легированных сталей и не требует мощных источников энергии. Первая технологическая линия газопрессовой сварки уже выпускает рельсовые плети для бесстыкового пути.

Наряду со сваркой рельсов в стационарных условиях значительное развитие получила контактная сварка в пути с помощью

передвижных машин ПРСМ. На конец 1966 г. такими машинами было сварено более 3000 *км* рельсов. ПРСМ (рис. 23-8) представляет собой четырехосную платформу, в передней части которой смонтированы конструкции для перемещения сварочных головок в процессе работы и установки их в транспортное положение. В закрытом помещении на остальной части платформы располагается аппаратура и источник питания электроэнергией.

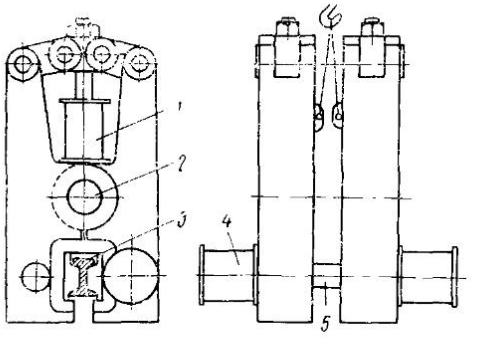


Рис. 23-9. Схема подвесной стыковой машины для сварки рельсов с контурным трансформатором

Конструкция сварочной головки с контурным трансформатором схематически показана на рис. 23-9. После опускания головки на стык, перемещение штоков цилиндров *1* вызывает поворот рычагов вокруг оси *2* и зажатие стыкуемых рельсов *3*. Перемещение при оплавлении и последующей осадке осуществляется гидравлическими цилиндрами *4* вдоль направляющих *5*.

Опыт использования передвижных машин ПРСМ показал, что их использование оказывается эффективным в следующих случаях:

а) при сварке стыков рельсов станционных путей;

б) при восстановлении целостности рельсовых плетей бесстыкового пути после удаления дефектных мест;

в) при смене рельсов с предварительной укладкой новых внутри колеи, последующей сваркой и заменой старых;

г) на временных сварочных технологических линиях, организуемых на звеносборочных базах или станциях, с устройством специальных стендов для ремонта и сварки годных старых рельсов и рельсовых плетей.

ГЛАВА XXIV

МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

При изготовлении сварных конструкций сварочные операции составляют обычно не более $^1/_3$ общего объема всех основных (заготовительные, сборочные, сварочные, отделочные) и вспомогательных (транспортные, установочные, ремонтные, контрольные) операций. В этих условиях преимущественная механизация сварочных работ при сохранении ручного труда на других операциях, естественно, оказывается малоэффективной. В отдельных случаях этот эффект может быть даже отрицательным из-за усложнения заготовительных и сборочных операций. Наиболее совершенной формой организации производства, позволяющей осуществить комплекс механизации и автоматизации всех работ, являются поточные линии. Применительно к изготовлению сварных конструкций эффективно использование поточных линий в значительной степени затруднено низким уровнем специализации производства. Поэтому [illegible]ным направлением дальнейшего развития сварочного производства является повышение уровня концентрации и специализации предприятий по выпуску сварных конструкций. Это позволит шире использовать поточные методы производства с механизацией не только сборочно-сварочных, но и заготовительных и транспортных операций.

§ 1. МЕХАНИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ

При решении вопросов комплексной механизации и автоматизации процессов производства существенную роль играют транспортирующие устройства, которые в общем случае состоят из загружающих, разгружающих, транспортирующих и ориентирующих механизмов.

Прерывистое перемещение осуществляют как универсальными средствами — электрокарами, автопогрузчиками, тележками, кранами и электрическими тельферами, так и специальными пульсирующими конвейерами, шаговыми транспортерами,

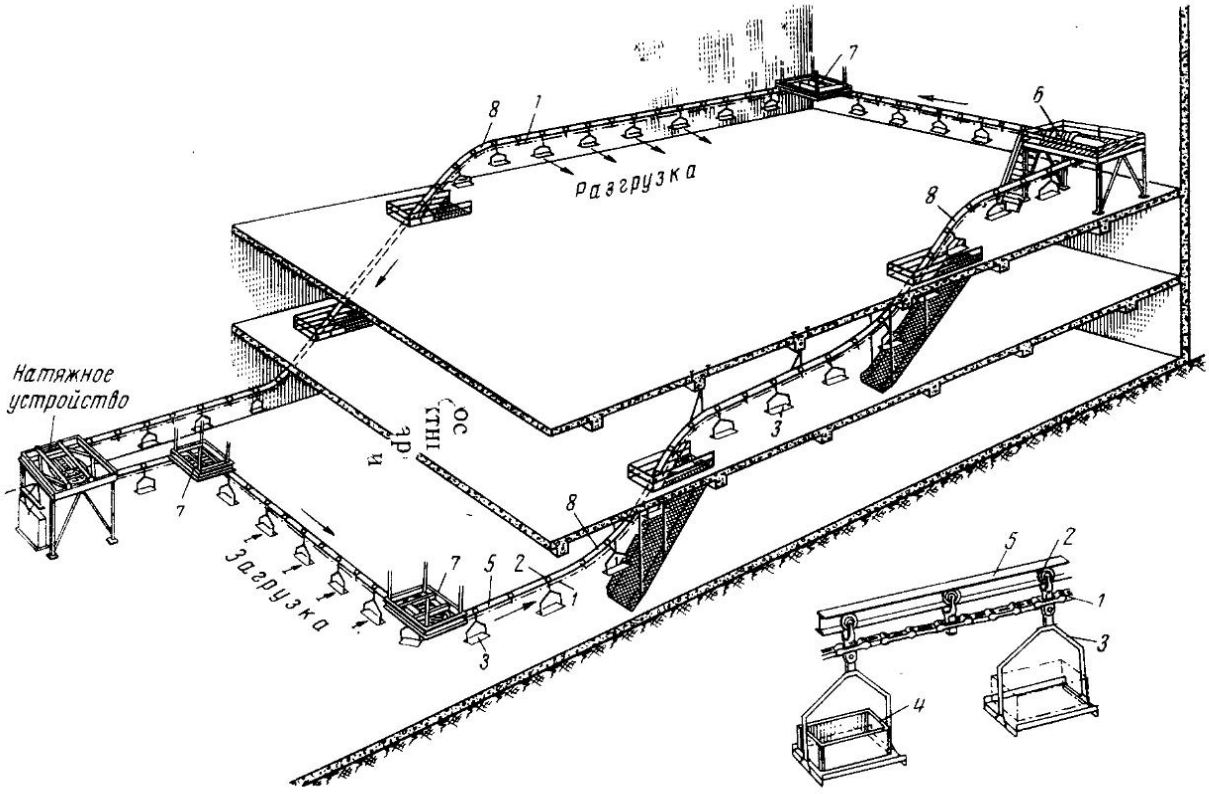


Рис. 24-1. Устройство подвесного конвейера

рольгангами, склизами и толкателями. Непрерывное перемещение обеспечивают подвесные и рельсовые конвейеры и напольные транспортеры. Рассмотрим некоторые типы конвейеров, используемые в условиях сварочного производства.

Подвесной конвейер (рис. 24-1) состоит из замкнутого тягового элемента *1* с прикрепленными к нему тележками *2*, несущими подвески *3* с транспортируемыми грузами *4*. Катки кареток перемещаются по замкнутому подвесному пути *5*. Тяговый элемент приводится в движение приводом *6*. Повороты в горизонтальной плоскости осуществляются с помощью звездочек *7*, а в вертикальной при помощи перегибов *8* направляющего пути *5*. Загрузка и разгрузка подвесок производится на ходу кон-

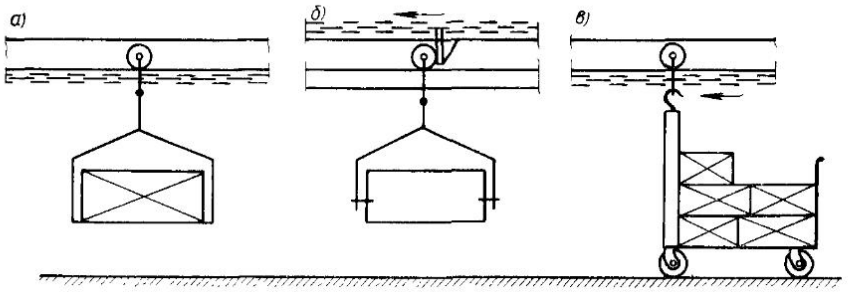


Рис. 24-2. Схемы различных типов подвесных конвейеров:
а) грузонесущего; *б*) толкающего; *в*) грузотянущего

вейера. Схемы различных типов крепления тележки подвесного конвейера к тяговому элементу показаны на рис. 24-2.

Подвесные конвейеры применяют для транспортировки заготовок, деталей и узлов длиной до 3—4 *м* и весом до 1,5—2 *Т*. В процессе транспортировки грузы могут подвергаться различным технологическим операциям: очистке в пескоструйных или дробеструйных камерах, травлению в химических ваннах, металлопокрытию, окраске, сушке, термообработке и т. п.

Пластинчатые конвейеры применяют для транспортировки деталей между рабочими местами. Конвейер (рис. 24-3, *а*) состоит из металлоконструкции *1*, направляющих *2*, катков *3*, металлических пластин *4*, тяговых цепей *7*, приводной станции *6* и натяжной *5*. Если несущие пластины *4* заменить роликами, свободно вращающимися на осях, то такой роликовый катковый конвейер можно использовать не только для транспортировки изделий, но и в качестве накопителя. Так, на Горьковском автозаводе подобное устройство используется как магазин-конвейер (рис. 24-3, *б*) в поточной линии сварки колес.

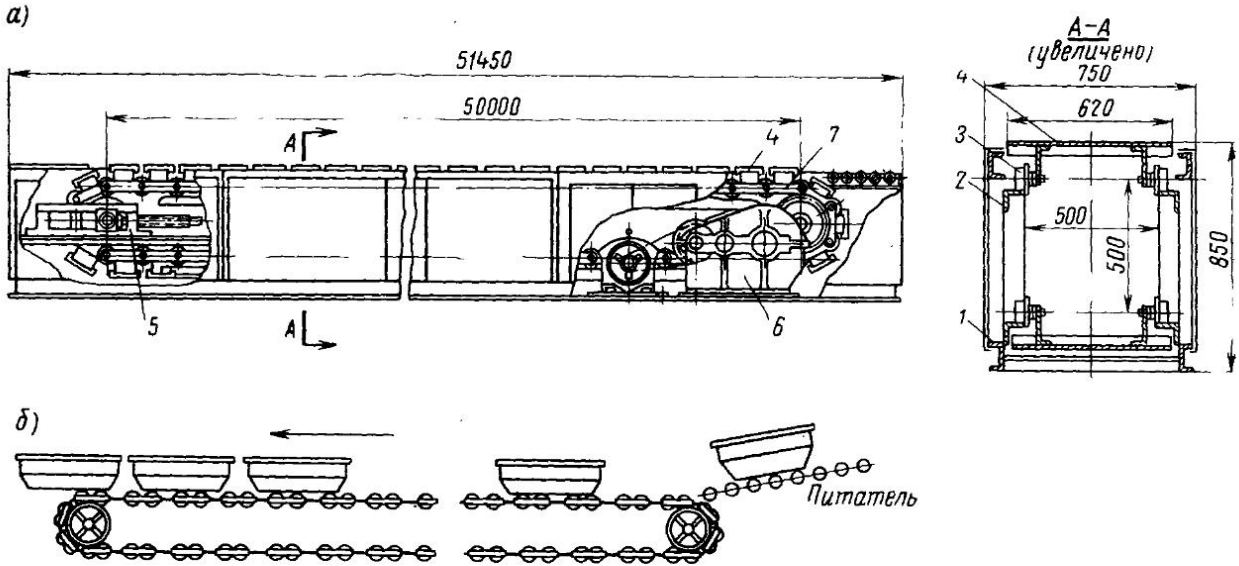


Рис. 24-3. Пластинчатый и роликовый катковый конвейеры

Поступившее на конвейер колесо движется вместе с роликами, пока не остановится, встретив на своем пути уже накопленные колеса. При этом тяговые цепи с роликами продолжают движение, не вызывая перегрузки механизма. Движение колес возобновляется, как только очередное колесо снимается с конвейера.

Тележечные конвейеры используют на сборочно-сварочных участках. Движение тележек может быть как непрерывное, так и пульсирующее.

Вертикально-замкнутые конвейеры более компактны, но в горизонтально-замкнутых конвейерах для работы могут быть использованы обе ветви. Конвейеры, на которых производятся длительные и различные по времени операции целесообразнее выполнять горизонтально-замкнутыми.

Вертикально-замкнутый конвейер (рис. 24-4) имеет ряд тележек *4* с зажимными приспособлениями *5* для крепления изделий. Движение задается тяговой цепью *3*, к которой прикреплены передние оси тележек. Тележки передвигаются по направляющим *2* металлоконструкции *1*. Направляющие в головной и хвостовой части имеют откидывающиеся участки для прохода колес тележек во время перехода с рабочей ветви на холостую и обратно без опрокидывания.

Схема горизонтального тележечного конвейера для сварки корпусов бортовых фрикционов трактора Т-130 показана на рис. 24-5. Линия имеет 20 рабочих мест, в том числе четыре последних резервных на случай возможных неполадок. Сборка и прихватка осуществляется на одном из стендов *I*. Затем узел устанавливается на тележку, находящуюся на поворотном круге *III*, и передвигается на позицию *1* линии *II*. Узел на тележке закрепляется в кантователе и может поворачиваться в удобное для сварки положение. На каждой позиции выполняются определенные операции, обеспеченные соответствующим оборудованием. На двух позициях сварка выполняется вручную, на восьми полуавтоматами и на шести автоматами под флюсом. Через определенный интервал времени все тележки перемещаются на следующую позицию. После десятого рабочего места узел снимается с тележки, передается на фрезерный станок *IV* для фрезеровки места под верхний лист, а затем снова устанавливается на тележку.

Тележечный конвейер, предназначенный для транспортирования крупногабаритных сварных рам, был рассмотрен ранее в главе XVII (см. рис. 17-22). Стальной канат обеспечивает возвратно-поступательное движение всех тележек линии. Изделия домкратами тележек приподнимаются над опорами рабочих мест, перемещаются движением тележек на следующую позицию и опускаются на опоры. Тележки с опущенными домкратами возвращаются в исходное положение.

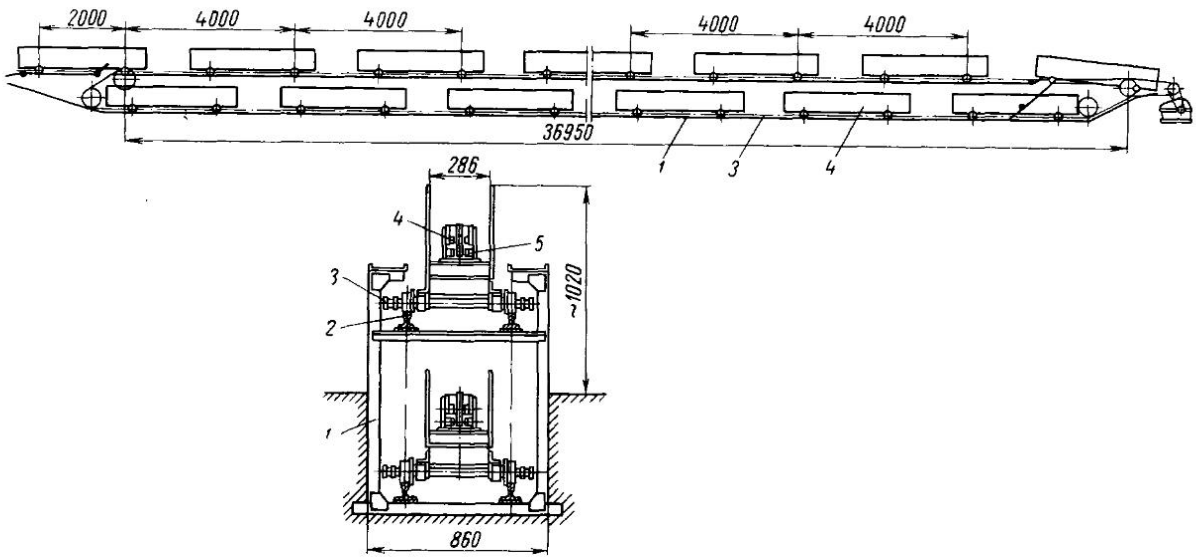


Рис. 24-4. Схема вертикально-замкнутого тележечного конвейера

Ритмичное перемещение изделий в автоматической линии на величину шага может производиться штанговым конвейером. Так, на Горьковском автозаводе конвейер подобного типа используется при транспортировке колес по линии сварочных автоматов (рис. 24-6). Колеса располагаются на направляющих металлоконструкции. Составная штанга *2* проходит под ними, совершая возвратно-поступательное движение при помощи двух пневмоцилиндров *1* простого действия. На штанге расположены шарнирные кулачки *3*, которые зацепляют изделие при поступа-

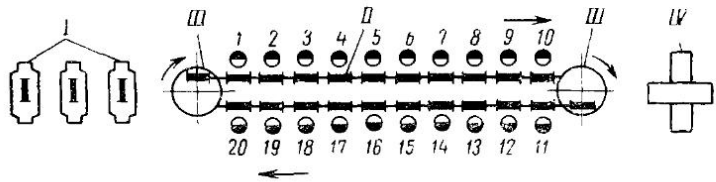


Рис. 24-5. Схема горизонтально-замкнутого тележечного конвейера

тельном движении штанги и продвигают его на величину шага по направляющим. При возвратном движении штанги кулачки под действием веса изделия опускаются и проскальзывают под ним.

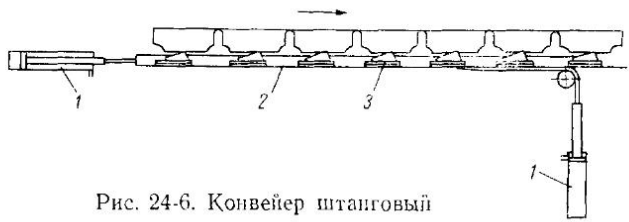


Рис. 24-6. Конвейер штанговый

Роликовые конвейеры могут быть приводные и неприводные. Наиболее часто неприводные роликовые конвейеры устанавливают под небольшим наклоном, достаточным для движения грузов под действием составляющей силы тяжести. Приводные роликовые конвейеры с групповым или индивидуальным приводом перемещают изделия по горизонтали. При изготовлении двутавровых сварных балок на заводе им. Бабушкина (см. рис. 16-16) этот тип конвейера используется как на участках заготовки листовых элементов полок и стенок, так и на участках сборки, сварки и отделки балок.

Применительно к транспортировке цилиндрических изделий конвейер может составляться из отдельных приводных и неприводных роликоопор. Такой тип конвейера применяют, например, в поточной линии при изготовлении котлов железнодорожных цистерн (см. гл. XX, § 2).

Основной частью конвейера являются ролики *3* (рис. 24-7), установленные наклонно на стойках *2* рамы *1*. В приводной роликоопоре одна из стоек заменена редуктором *4* с электромо-

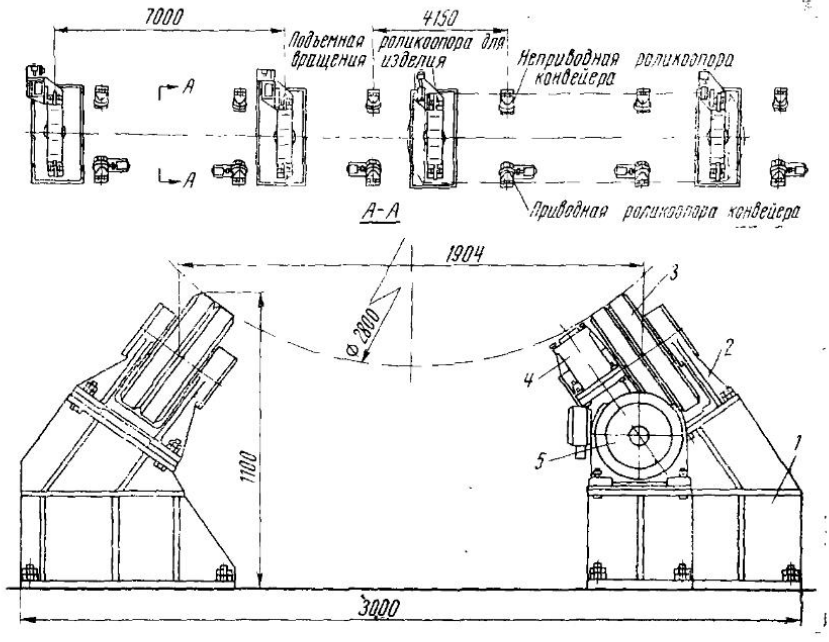


Рис. 24-7. Конвейер роликовый

тором *5*. Между роликоопорами конвейера расположены подъемные роликоопоры вращения для поворота изделия. Доставленная конвейером обечайка поднимается этими роликоопорами, поворачивается в соответствии с содержанием операции, данного рабочего места, затем опускается обратно и перемещается на следующее рабочее место.

При изготовлении прямошовных сварных труб большого диаметра передачу труб с заготовительной линии в сварочные станы и со станов наружной сварки на станы внутренней сварки

осуществляют роликовыми конвейерами на тележках. Сочетание движений трубы вдоль роликового конвейера и тележки по рельсам в перпендикулярном направлении позволяет перемещать изделия как вдоль, так и поперек цеха.

Погрузочно-разгрузочные работы относятся к категории тяжелых и трудоемких, их механизация является существенным резервом повышения производительности труда и снижения себестоимости продукции.

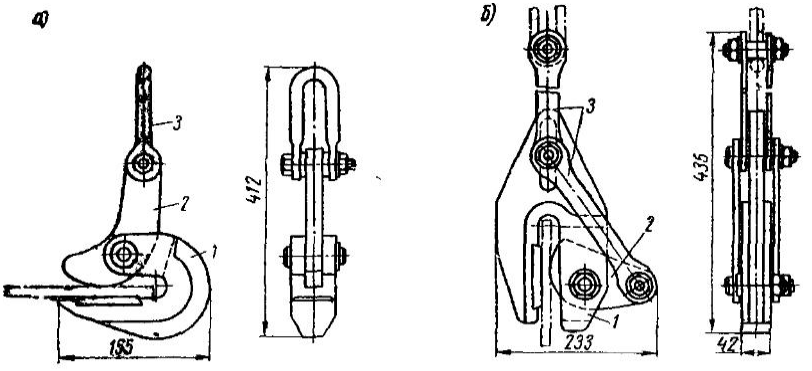


Рис. 24-8. Захваты для транспортирования листов:

а) **в горизонтальном положении;** *б)* **в вертикальном положении**

При выполнении крановых операций механизация подвески и снятия грузов достигается применением специализированных захватов.

На рис. 24-8 показаны механические захваты для зачаливания листов в горизонтальном и вертикальном положении. При транспортировке листовые полотнища большой длины зачаливают в нескольких точках. Для этого используют жесткую траверсу с несколькими захватами, подвешенными на тросе через уравнительные блоки. Полотнища транспортируются в горизонтальном положении на парных горизонтальных захватах (рис. 24-8, *а*) и в вертикальном положении на вертикальных захватах (рис. 24-8, *б*). Кантование производится при помощи вертикальных захватов.

Для захвата и удержания плоских деталей и узлов в горизонтальном и вертикальном положениях применяют вакуумные захваты (рис. 24-9). Ввиду малого объема вакуумной камеры время захвата детали измеряется секундами. Вакуум обычно

составляет не более 0,1—0,15 *кГ/см*^{2}, его создают либо с помощью эжектора от сети сжатого воздуха, либо вакуумным насосом. По сравнению с электромагнитными захватами вакуумные захваты имеют ряд преимуществ: меньший вес, возможность захвата только одного верхнего листа, независимость усилия захвата от материала листа, возможность поворота листа, большая безопасность в работе и т. п. Двукратный запас грузоподъемности вакуумного захвата обеспечивает удержание груза

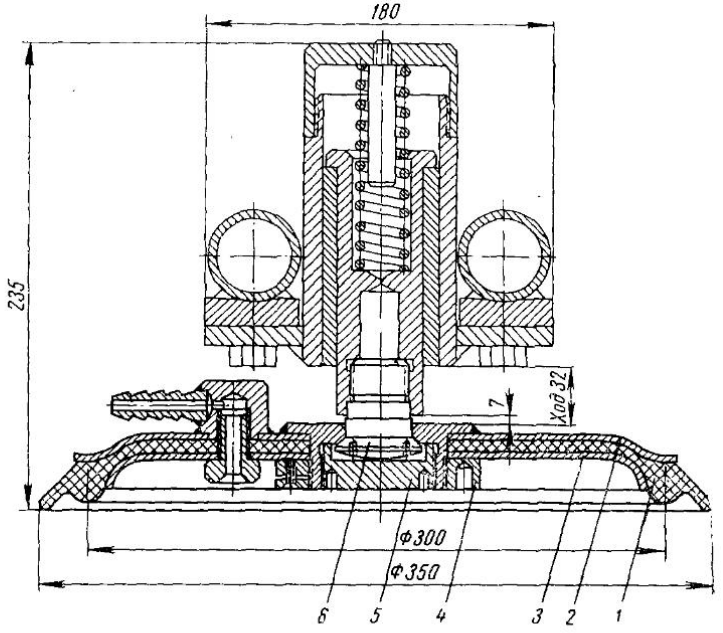


Рис. 24-9. Вакуумный захват:

1 — присос; *2* — диск верхний; *3* — диск нижний; *4* — гайка; *5* — заглушка; *6* — винт

в случае отказа вакуумного насоса в течение нескольких минут.

При транспортировке листов и полотнищ большой длины траверса с вакуумными захватами может подвешиваться на крюк мостового крана или закрепляться на специальном самоходном портале.

При использовании конвейера обычно грузы весом до 25 *кГ* загружают и разгружают вручную, свыше 25 *кГ* — при помощи электроталей, различных захватов или пневмо(гидро)подъемников. Механизация загрузки и разгрузки конвейеров позволяет

создать непрерывный поток и сократить количество обслуживающего персонала.

Питатели выполняют только операцию загрузки. Гравитационные питатели обычно представляют собой короткие наклонные дисковые или роликовые конвейеры (иногда просто наклонные плоскости), которые с помощью отсекателей выдают детали на основной конвейер. На рис. 24-10 изображен гравитационный лотковый питатель, загружающий цепной элеватор. В исходном положении детали удерживаются на наклонном лотке *1* штоком *5*. При движении цепи *7* вниз кулачок *6* поворачивает рычаг *4*, утапливает шток *5*, и очередная деталь соскакивает на полку *8*. При этом шток *2* выдвигается и отсекает следующие детали. Затем под действием пружины *3* рычаг *4* со штоками *5* и *2* возвращается в исходное положение и все детали на лотке *1* смещаются до упора в шток *5*.

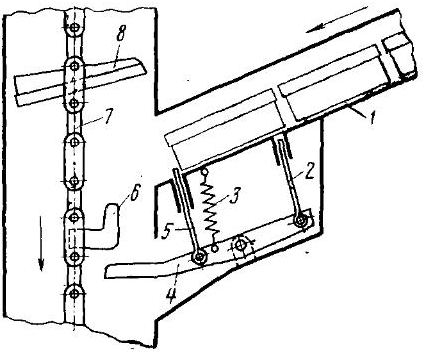


Рис. 24-10. Гравитационный лотковый питатель

Схема другого гравитационного питателя для цилиндрических деталей, располагаемых с определенным шагом, показана

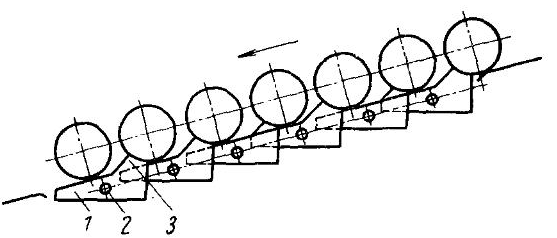


Рис. 24-11. Гравитационный питатель для цилиндрических деталей

на рис. 24-11. При срабатывании отсекателя выходная деталь скатывается и рычаг *1* под действием силы веса поворачивается вокруг оси *2*, освобождая вторую деталь от упора *3*. Движение этой детали до упора в отсекатель заставит рычаг *1* вернуться в прежнее положение. Таким образом, все грузы, находящиеся на питателе, передвинутся на один шаг. Для выдачи деталей

в заданном темпе могут использоваться конвейерные питатели, оснащенные отсекающими устройствами. Простейший пример такого питателя показан на рис. 24-12. В заданное время отсекающее устройство срабатывает и выдает деталь.

Механизмы, осуществляющие перегрузку, могут быть весьма разнообразны. Конструктивные схемы наиболее характерных механизмов приведены в табл. 24.1. Работу более сложных устройств рассмотрим на некоторых примерах.

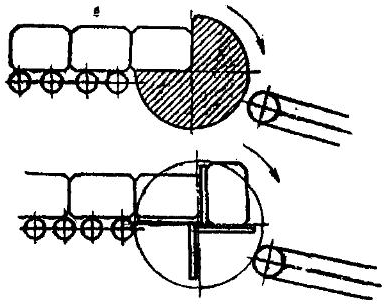


Рис. 24-12. Схемы отсекателей роторного типа

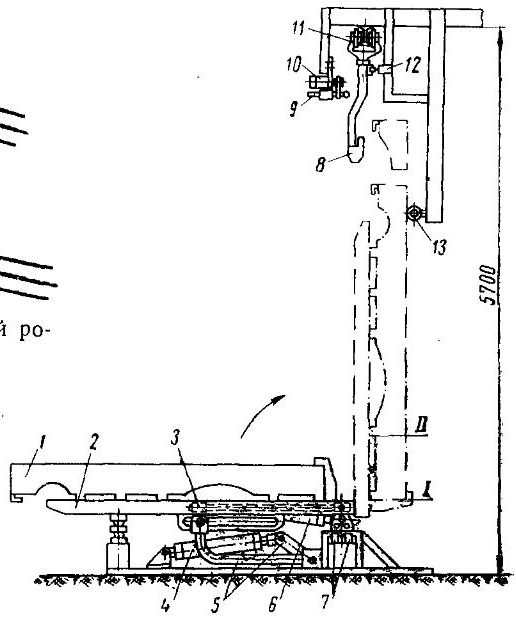


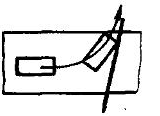
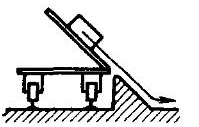
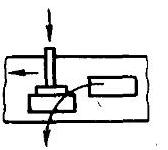
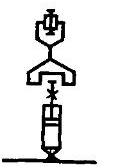
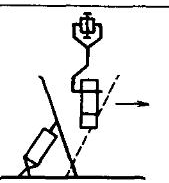
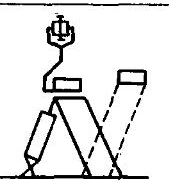
Рис. 24-13. Автоматическая установка для навески и съема автомобильных платформ

На рис. 24-13 показана установка для автоматической навески и съема платформы автомобиля. При движении тележки конвейера *11* подвеска *8* нажимает на конечный выключатель *12*, включая гидроцилиндр *4*. Рычагами *5* рама *2* поворачивается в вертикальное положение до упора *13*, и ее положение фиксируется концевым выключателем *7*. После этого гидроцилиндр *6* поднимает каретку *3* с платформой *1* в положение *II*. Затем пневмоцилиндр *10* упором *9* отклоняет подвеску *8* в крайнее правое положение, каретка *3* опускается, платформа *1* навешивается на крюк подвески *8*, а рама *2* поворачивается в исходное положение. Съем платформы производится в обратном порядке.

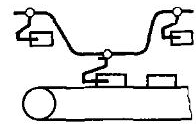
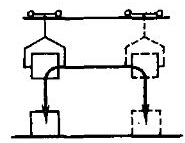
Передачу изделия с одного конвейера на другой, расположенный под углом 90° к первому, рассмотрим на примере автомата передачи автомобильных кузовов (рис. 24-14).

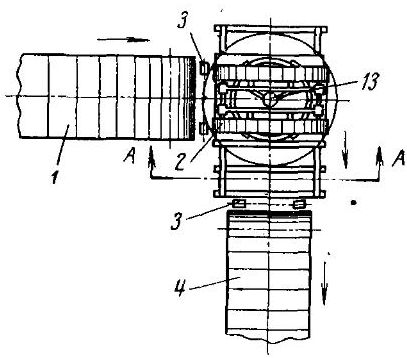
Таблица 24.1

Конструктивные схемы наиболее характерных механизмов

Наименование устройства		Схема устройства
Сбрасывающее	плужковое	
	гравитационное	
Сталкивающее	горизонтальное	
	вертикальное	
Рычажное	с простыми рычагами	
	с рычажными системами	

Продолжение табл. 24.1

Наименование устройства	Схема устройства
Непосредственная перегрузка	
Тележечное	



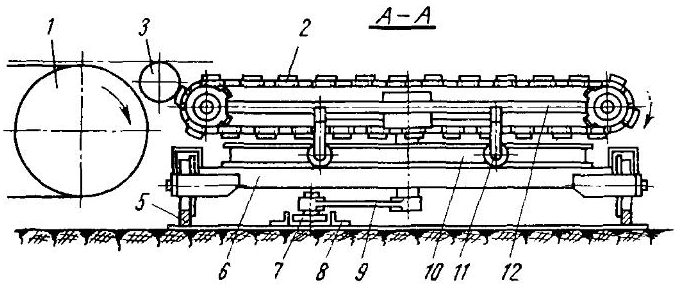


Рис. 24-14. Схема автомата передачи автомобильных кузовов

Конвейер *1* сталкивает кузов сначала на переходный ролик *3*, выполненный в виде обгонной муфты с приводом через цепную передачу от конвейера *1*. Когда центр тяжести кузова переместится на ролик *3*, кузов наклоняется и касается траков цепи конвейера *2*, которые к этому моменту уже получили импульс на движение. Скорость конвейера *2* задается несколько больше скорости конвейера *1*. Завершение схода кузова с ролика *3* на конвейер *2* служит импульсом включения привода тележки *6*, которая по рельсам *5* перемещает кузов к конвейеру *4*. При этом ролик *7* рычага *9* обкатывается по копирным направляющим *8* и с помощью вала *13* поворачивает на 90° каркас *12* конвейера *2* вместе с кузовом на катках *11* по поворотному кругу *10*. Во время поворота привод конвейера *2* не работает, он включается для сталкивания кузова только после остановки тележки *6*. Через переходной ролик *3* кузов передается на конвейер *4*, а тележка *6* возвращается в исходное положение с разворотом конвейера в обратную сторону.

§ 2. МЕХАНИЗАЦИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Применительно к поточному производству сварных изделий определенного типа, например, двутавровых балок или труб, механизация заготовительных операций была рассмотрена выше. Однако в условиях индивидуального и мелкосерийного производства опыт механизации заготовительных операций еще невелик. Поэтому представляет интерес решение этих вопросов в новом блоке цехов металлоконструкций Уралмашзавода.

В отделении подготовки листового проката (рис. 24-15) пакеты листов с сортировочных площадок *1* подаются мостовым краном на стеллажи *2* к листоправильным вальцам *3*. Комплексная механизация участка правки обеспечивается приводным рольгангом *4* и перегрузочными мостами *5*.

Перегрузочные мосты *1* и *2* (рис. 24-16) перемещаются по специальной эстакаде и вакуумными захватами подают листы по одному из пакета на рольганг или снимают с него и переносят на складские площадки. Наличие приводных рольгангов позволяет не только удобно и производительно задавать листовой прокат в машину, но и транспортировать его в следующие пролеты, исключая трудоемкие операции по перегрузке листов из пролета в пролет.

Для подачи листового металла под пресс или к гильотинным ножницам используют опорные стойки с шаровыми или самоустанавливающимися роликовыми опорами, как это показано на рис. 24-17. Такие устройства облегчают ручной труд рабочего, но не исключают его. Для полной механизации всех основных операций у гильотинных ножниц на Уралмашзаводе использован

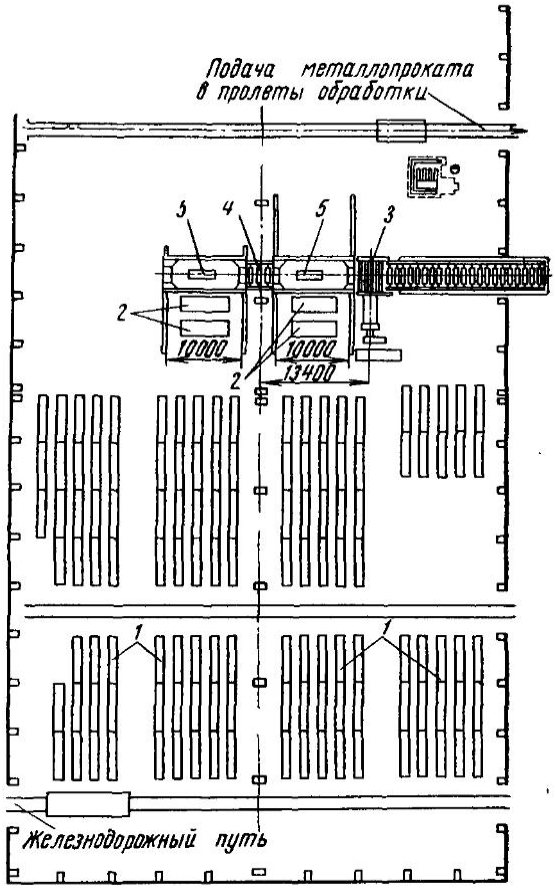


Рис. 24-15. Схема отделения подготовки листового проката

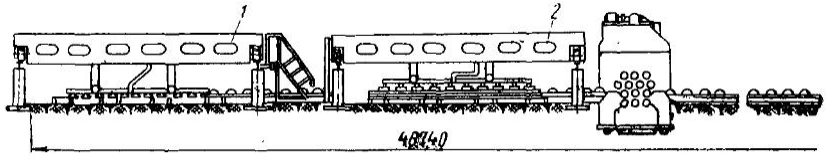


Рис. 24-16. Схема размещения средств комплексной механизации на участке листоправильных вальцов

комплекс специальных устройств, схема их расположения показана на рис. 24-18.

Укладка листов на подающие механизмы выполняется универсальным портальным манипулятором *6*, несущим на себе тележку с колонной. В результате поворота колонны с подвешен-

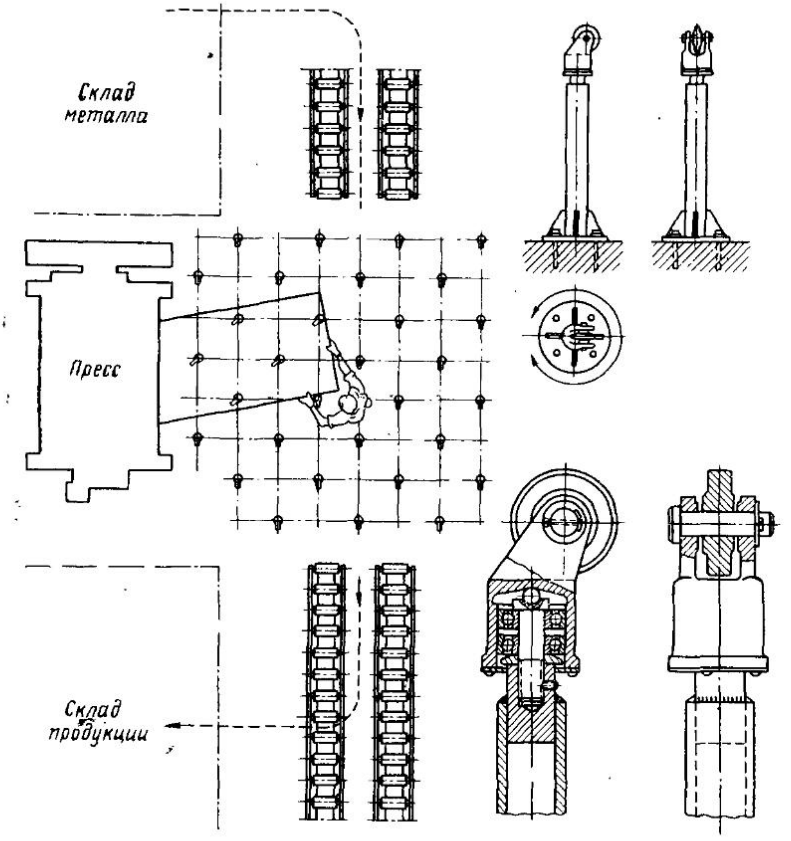


Рис. 24-17. Дисковые ролики на поворотных головках для поддержания листового металла

ной к ней траверсой с вакуумными захватами лист можно уложить под любым углом по отношению к гильотинным ножницам.

При поперечной резке лист укладывают на холостой рольганг тележки *5*; с помощью пневмогидравлических зажимов к его торцу крепится захват механизма подачи. Продвижение листа к ножам обеспечивается движением тележки *5* по рель-

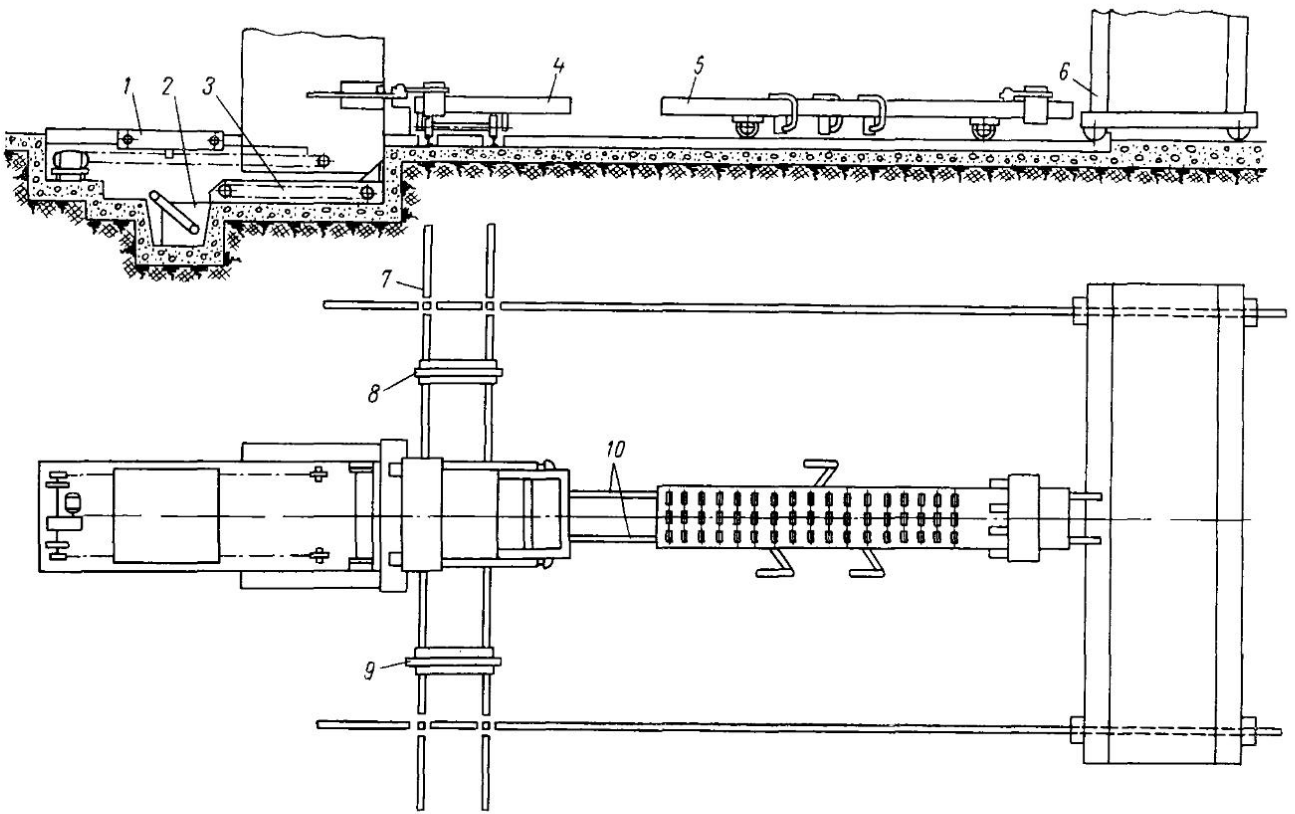


Рис. 24-18. Общий вид комплекса механизмов для резки металла на гильотинных ножницах

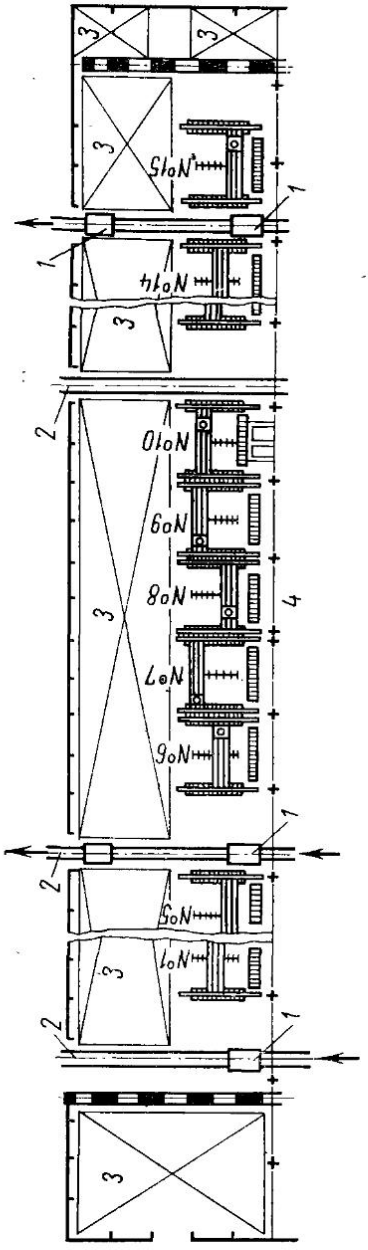


Рис. 24-19. Пролет комплектации склада полуфабрикатов:
1 — передаточные тележки для заготовок больших габаритов; *2* — внутрицеховые технологические линии; *3* — складские площадки, *4* — стеллажи-штабелеры (15 секций). Стрелками показаны поступление заготовок и выдача комплекта в сборочно-сварочные цехи

сам *10*, подачу листа под ножи осуществляет механизм подачи.

При продольной резке лист укладывают на тележку *4* и прицепные тележки *8* и *9*, поддерживающие его концы. Подача листа под ножи в поперечном направлении осуществляется ходовыми винтами тележки *4* с помощью специальных кареток с захватами. Продвижение листа вдоль ножей обеспечивается движением тележки *4* по рельсам *7*. Удаление нарезанных заготовок из-под ножей выполняется тележкой *1*, а обрезные отходы сталкиваются механизмом *3* в коробку *2*.

На участках обработки профильного проката смонтированы полуавтоматические линии мерной резки углового проката, швеллерных и двутавровых балок и труб на ножницах и пилах.

После газовой и механической резки листовые заготовки пакетом подаются мостовым краном к многовалковым вальцам для правки.

Заготовки из листа имеют самые разнообразные размеры и конфигурацию с различными вырезами. Это затрудняет работу с вакуумными захватами, и поэтому портальный манипулятор, подающий детали на правку, имеет траверсу с электромагнитными захватами.

В условиях индивидуального и мелкосерийного производства при большом объеме выпуска металлоконструкций особое значение приобретает организация и механизация промежуточного склада полуфабрикатов.

В новом блоке цехов Уралмашзавода этот склад выделен в самостоятельный цех, в функции которого входит: 1) запуск заказов в производство заготовительных цехов, исходя из наличия металлопроката, литья и поковок; 2) прием готовых деталей из заготовительных цехов; 3) хранение заготовок и комплектование их для сборки сварных узлов с подачей комплекта заготовок сборочно-сварочным цехам.

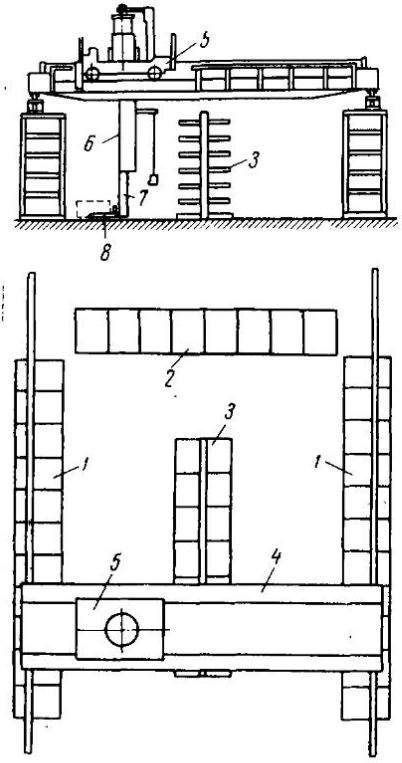


Рис. 24-20. Секция стеллажей с краном-штабеллером

План этого цеха показан на рис. 24-19. Готовые к сборке крупногабаритные детали поступают на передаточных тележках *1* по линиям *2*; для хранения этих крупных деталей выделены складские площадки *3*. Мелкие детали доставляют вагонетками, автокарами или автопогрузчиками в контейнерах. Для складирования и комплектации мелких деталей предусмотрены пятнадцать секций специальных стеллажей штабеллеров *4* (№ 1, . . ., № 15). В каждой секции боковые *1* и торцовый *2* стеллажи (рис. 24-20) имеют клетки, в которые устанавливают контейнеры с деталями. Для подъема и переноса в нижней части контейнера предусмотрены окна под лапы вилочного захвата крана-штабеллера или автопогрузчика. На двустороннем елочном стеллаже *3* имеются кронштейны, на которые укладывают узкие и длинные детали преимущественно из профильного проката и труб. Мостовой кран-штабеллер *4*, обслуживающий секцию стеллажей, несет тележку *5* с вращающейся телескопической колонной *6*. Его рабочим органом является подвижная каретка *7* с вилочным захватом *8*.

§ 3. МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Результат мероприятий по механизации и автоматизации конкретного производственного комплекса следует оценивать, во-первых, достигнутым повышением производительности труда, а, во-вторых, степенью автоматизации, т. е. замены ручного труда машинным.

Коэффициент повышения производительности труда данной машины (локальный) определяется отношением трудоемкости выполнения операции при ручной работе $T_р$ к трудоемкости ее выполнения машиной $T_м$

$$K_л = \frac{T_р}{T_м}.$$

Для поточной линии, где часть операций выполняется вручную, а часть механизирована с определенным локальным эффектом повышения производительности труда K, результирующий коэффициент повышения производительности труда может быть выражен отношением

$$K_0 = \frac{\Sigma (T_р + T_м K)}{\Sigma (T_р - T_м)}.$$

Степень автоматизации данной машины (локальная) определится отношением достигаемого уменьшения трудоемкости работ к общей трудоемкости при ручной работе

$$C_л = \frac{T_р - T_м}{T_р} 100\%;$$

соответственно степень автоматизации поточной линии

$$C = \frac{\Sigma (T_м K - T_м)}{\Sigma (T_м K + T_р)} 100\%.$$

Средние величины коэффициентов повышения производительности труда и степени автоматизации, присущие различным типам оборудования, были получены в ИЭС им. Патона на основе результатов обследования большого количества предприятий. Эти данные позволили классифицировать оборудование в зависимости от его назначения и достигаемой степени автоматизации, как показано в табл. 24.2 и на рис. 24-21.

Можно видеть, что производительность труда и степень автоматизации всего производственного комплекса характеризуется прежде всего классом оборудования, т. е. широтой охвата, механизацией различных операций производственного комплекса, а не величиной локальных коэффициентов $K_л$ и $C_л$. Так, даже

Таблица 24.2

Классификация оборудования для механизации и автоматизации сборочно-сварочных работ

Назначение	Класс	Тип	Общая характеристика и область применения
Вспомогательные	I	Для механизации сборочно - сварочных работ	Устройства, с помощью которых механизируются сборочные и вспомогательные при сварке операции (фиксация деталей, кантовка и вращение, местный транспорт, зажатие изделия и др.). Применяется в любом сварочном производстве
Сварочные	II	Шланговые полуавтоматы	Универсальное оборудование, с помощью которого механизирована одна из основных сварочных операций — подача электрода. Может применяться в любом сварочном производстве
	III	Универсальные сварочные станки и установки	Универсальное оборудование, с помощью которого механизируются основные сварочные операции. Применяется в мелкосерийном и индивидуальном производстве
	IV	Специализированные сварочные станки и установки	Оборудование, специализированное для сварки однотипных изделий либо деталей со швами сложной конфигурации. Применяется в крупносерийном производстве
	V	Специализированные сварочные станки-автоматы (с автоматическим управлением)	Специализированные станки, с помощью которых осуществляется автоматизация основных и вспомогательных сварочных операций. Станки могут встраиваться в автоматические линии. Применяются в крупносерийном и массовом производстве
Сборочно-сварочные	VI	Сборочно - сварочные станки обычного типа	Станки, с помощью которых механизируются сборочные, сварочные и некоторые вспомогательные операции. Применяются в мелкосерийном и серийном производстве
	VII	Сборочно - сварочные станки-автоматы (с автоматическим управлением)	Специализированные станки с автоматическим циклом производства сборочно-сварочных и вспомогательных операций. Эти станки могут встраиваться в автоматические линии. Применяются в крупносерийном и массовом производстве

Продолжение табл. 24.2

Назначение	Класс	Тип	Общая характеристика и область применения
Сборочно-сварочные	VIII	Механизированные сборочно - сварочные линии	Многопозиционные механизированные линии, на которых осуществляется последовательным потоком весь комплекс сборочных, сварочных, а иногда и заготовительных операций. Применяются в серийном производстве
	IX	Автоматические сборочно-сварочные линии (с автоматическим управлением)	Многопозиционные линии и конвейеры с автоматическим производственным циклом сборки, сварки и автоматическим управлением. Применяются в крупносерийном и массовом производстве

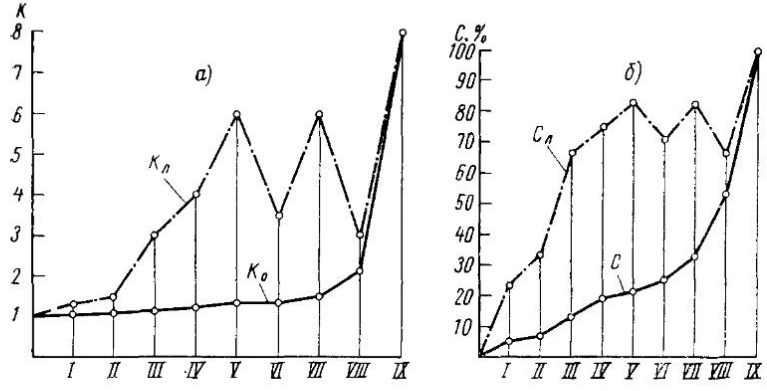


Рис. 24-21. Значения коэффициентов производительности труда и степени автоматизации для оборудования различных классов

весьма заметное повышение производительности труда при выполнении сварочной операции (в 6 раз), достигаемое при использовании станков V класса, дает общее повышение производительности труда всего на 33%. Напротив, при использовании оборудования VIII класса величина $K_п = 3$ обеспечивает повышение производительности труда всего производственного комплекса более чем в 2 раза.

Для характеристики современного состояния механизации и автоматизации процессов сварочного производства рассмотрим примеры оборудования различных классов.

Для сварки проушин с цилиндрами гидроамортизаторов автомобиля (рис. 24-22) используют станок-автомат, соответствующий V классу. Его принципиальная схема показана на рис. 24-23.

Цилиндры с запрессованными проушинами укладываются в бункер *1*. Штоком пневмотолкателя *2* изделия из бункера *1* подаются на одну из оправок *3*, закрепленных радиально на валу *5*. При повороте вала очередная оправка с изделием располагается между сварочными роликами *4*. Усилия на электродах создаются пневмоцилиндрами *7* головок *9*. Вращение роликов осуществляется от редукторов *12* через карданные валы *11* и шарошки *8*. Осевое смещение изделия предотвращается пневмоприжимом *10*. Каждый ролик сваривает трубу на длине полупериметра. После сварки ролики автоматически раздвигаются, оправки поворачиваются на угол 30°, и одно из сваренных изделий сбрасывается съемником *6*. Синхронизация достигается коммутатором, контакты которого включаются кулачками распределительного вала.

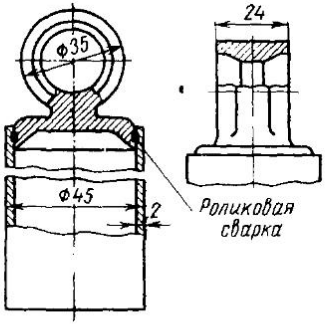


Рис. 24-22. Цилиндр гидроамортизатора автомобиля

Вальцесварочный станок для изготовления кузовов шахтных вагонеток относится к оборудованию VI класса. Работа этого станка основана на принципе совмещения нескольких разнородных операций: вальцовка-загиб боковины, сборка боковины с двумя лобовинами и автоматическая сварка двух криволинейных швов, соединяющих лобовины с боковиной (рис. 24-24, *а*). Станок имеет два кондуктора-манипулятора *1*, над которыми перемещается катучая балка с устройством для прижатия башмаков *5* и *7* и валков *6*, работающим от сети сжатого воздуха, и самоходной тележкой, несущей две сварочные головки *4*. Эта тележка поочередно обслуживает оба сборочно-сварочных агрегата. Изготовление кузова начинается установкой двух его лобовин по торцам кондуктора *1*; кондуктор поворачивается на 90°. В станок с помощью подвижных направляющих валков *2* заводится до упора плоский лист боковины (рис. 24-24, *б, в*), плотно прижимается к лобовинам и корпусу кондуктора башмаком *5* и валками *6*, тележка со сварочными головками *4* устанавливается на начало шва, и нажимается пусковая кнопка. Когда головки *4* достигнут начала круговых швов, тележка автоматически останавливается, и в тот же момент кондуктор *1* начинает вращаться с окружной скоростью, равной скорости сварки (рис. 24-24, *г*). При этом боковина под действием валков *6* изги-

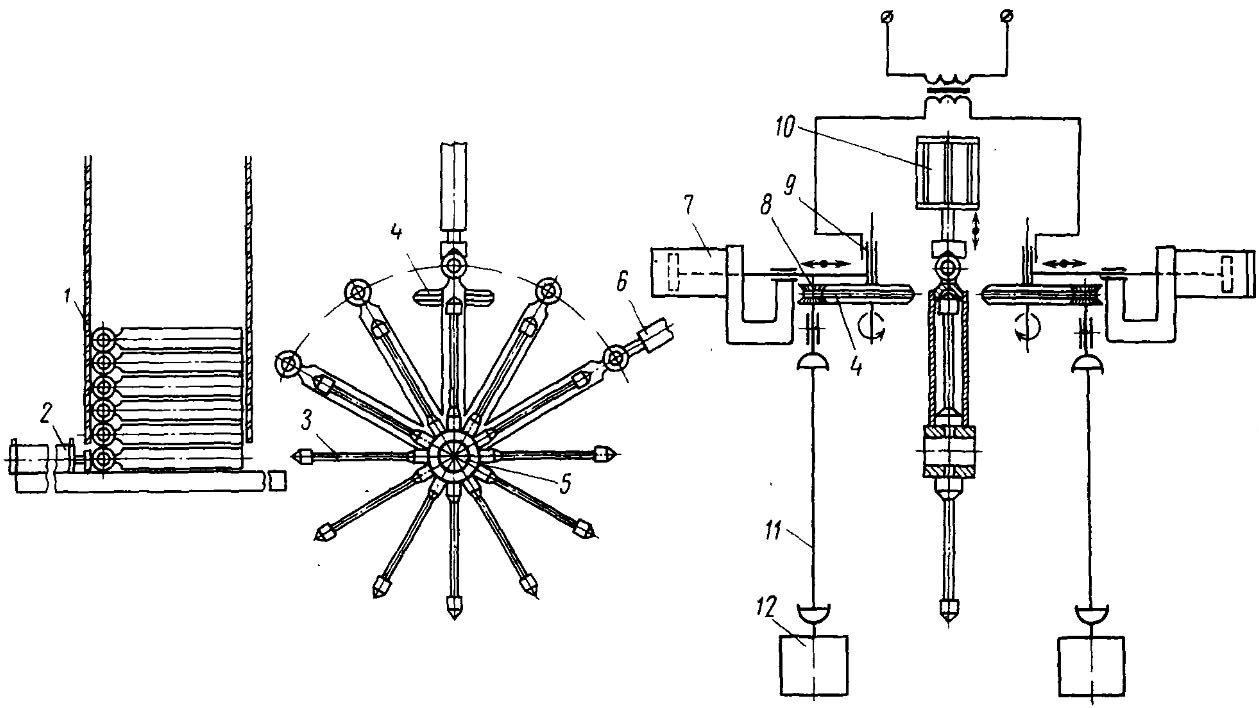


Рис. 24-23. Принципиальная схема автомата для роликовой сварки узлов гидроамортизаторов

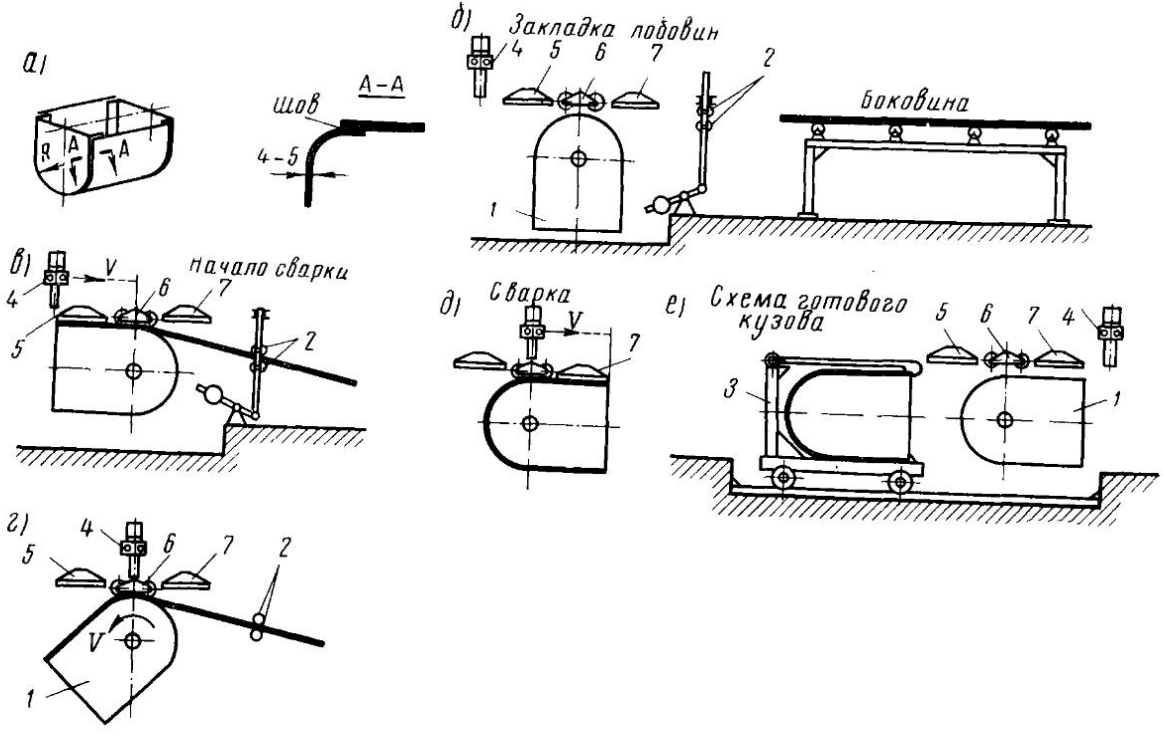


Рис. 24-24. Схема работы вальцесварочного станка

бается и плотно прижимается к кромкам лобовин. Когда заканчивается сварка круговой части швов, вращение кондуктора автоматически прекращается, и одновременно включается привод тележки (рис. 24-24, *д*). При сварке участков прямолинейных швов боковины прижимаются к лобовинам башмаком *7*. Готовый кузов снимается с кондуктора с помощью тележки *3*, имеющей захваты (рис. 24-24, *е*). Оба сборочно-сварочных агрегата обслуживает один оператор.

Примером оборудования VII класса может служить автомат для сборки и сварки стальных пустотелых шаров, схема которого показана на рис. 24-25. Наличие в станке программного

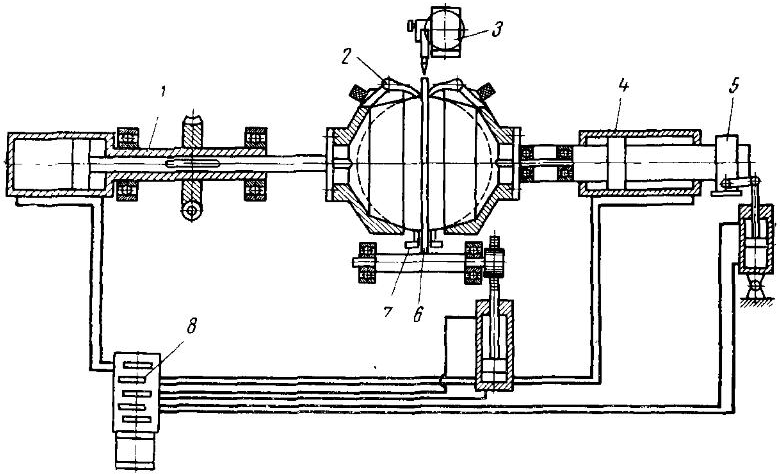


Рис. 24-25. Схема станка-автомата для сборки и сварки пустотелых стальных шаров

командного устройства *8* обеспечивает полную автоматизацию сборочно-сварочного цикла со всеми вспомогательными операциями. Это устройство имеет кулачковый вал, действующий на систему пневмозолотников и выключателей, управляющих пневмоцилиндрами, двигателями и электромагнитами в соответствии с программой цикла.

Подача заготовок осуществляется с предыдущего рабочего места поточной линии по наклонному лотку, причем заготовки движутся попарно. Катящиеся под собственным весом полусферы упираются в откидные упоры *7*, один из которых задерживает поток заготовок, а второй освобождает одну пару заготовок и позволяет им скатываться по направляющим до неподвижного упора в станке.

Совмещение плоскости стыка с плоскостью расположения электрода, перпендикулярной оси вращения заготовок, осуществляется с помощью шлифованного откидного ножа *6*. Во время сборки изделия нож находится в верхнем положении между центровыми бабками. Поданные в станок полусферы располагаются по обе стороны от ножа и плотно прижимаются к нему штоками пневмобабок сначала передней *1*, а затем задней *4*. После этого передняя бабка смещается назад на 2 *мм*, освобождая зажатый нож, который отбрасывается в нижнее положение. Затем передняя бабка с защемленной в ней полусферой подается вперед до плотного соприкосновения со второй полусферой. В левом рабочем положении шток задней бабки фиксируется колодочным тормозом *5*. Благодаря наличию тормоза и откидного ножа торец полусферы, защемленной в задней бабке, располагается точно в плоскости электрода сварочной головки *3*, независимо от неточностей размеров самого изделия. Защемление в бабках осуществляется специальными пружинящими захватами *2*. После окончания сварки шар по наклонному желобу выкатывается наружу, включая по пути механизм загрузки.

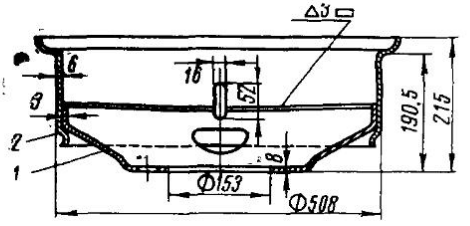


Рис. 24-26. Чертеж колеса автомобиля

К оборудованию VIII класса следует прежде всего отнести поточную линию производства сварных труб большого диаметра Челябинского трубного завода, где обеспечена комплексная механизация всего процесса — от заготовительных операций до калибровки и контроля труб.

Другой пример оборудования VIII класса — линия производства сварных двутавров на заводе им. Бабушкина. Работа этих линий была рассмотрена выше в разделах изготовления балок (глава XVI, § 1) и труб (гл. XX, § 3).

Автоматические линии IX класса представляют наиболее совершенную форму организации производства; некоторый опыт в их проектировании и эксплуатации уже имеется. Так, на Горьковском автозаводе линия сварки колес грузового автомобиля работает с конца 1950 г. Колесо собирается из обода *2* и диска *1* (рис. 24-26) и сваривается круговым угловым швом.

Схема автоматической линии показана на рис. 24-27. Линия начинается от пресса *1*, где производится запрессовка диска в обод. На уровне выталкивателя этого пресса установлен приемный наклонный рольганг линии *2*, куда прессовщик сталкивает очередное собранное колесо, поступающее затем на магазин-конвейер *3*. Отсюда колеса перегружаются на первый шаговый

транспортер *6* и распределяются между четырьмя сварочными автоматами *8**. Транспортер периодически приводится в движение пневматическими цилиндрами *7* и *11* и проталкивает колеса на величину шага. Четыре раздатчика *5*, расположенные против соответствующих сварочных автоматов, работают попарно (первый одновременно с третьим и второй одновременно с четвертым) при ритме, равном 1 *мин*, и со сдвигом во времени между срабатыванием каждой пары раздатчиков, равным 0,5 *мин*. Каждый из этих раздатчиков *5* снимает колесо с транспортера *4* и подает его к подъемнику сварочного аппарата.

При подаче сжатого воздуха в правую полость цилиндра *4* (рис. 24-28) гидравлического подъемника *5* масло из левой полости вытесняется через калиброванное отверстие, и рычаг *3* с вращающимся столиком *2* плавно поднимает колесо *1* и прижимает его к фрикционному диску *9* механизма вращения колеса *10*. Одновременно включается электродвигатель *7* для вращения колеса и подается флюс. Через определенный промежуток времени, достаточный для образования валика флюса, включается сварочная головка *6*. После того как свариваемое колесо

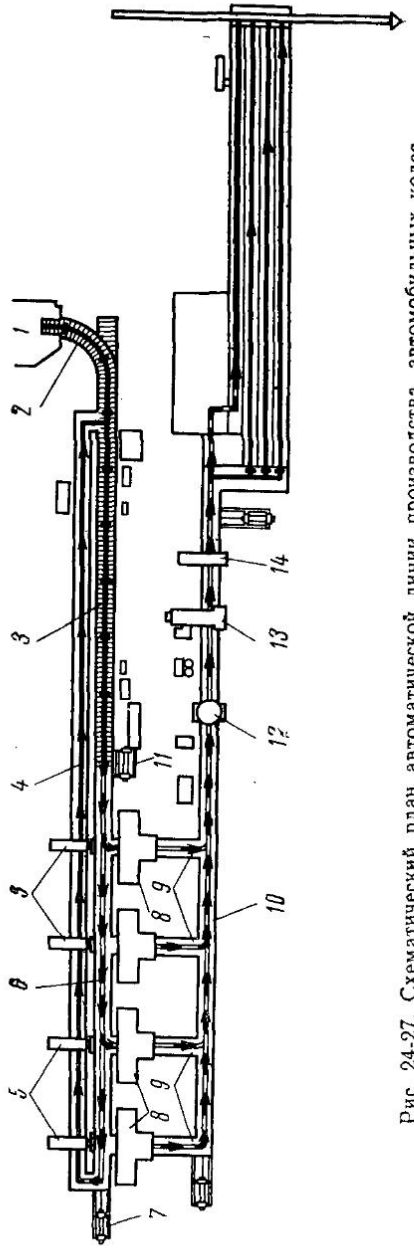


Рис. 24-27. Схематический план автоматической линии производства автомобильных колес

* Работа магазин-конвейера и шагового транспортера была рассмотрена выше (см. рис. 24-3 и рис. 24-6).

совершило полный оборот, сварочная головка автоматически выключается путевым выключателем *8*, прекращается подача флюса, и рычаг *3* плавно опускает колесо.

Цикл работы автомата составляет около 57 *сек*. Очередное колесо при подаче на автомат сталкивает готовое колесо по рольгангу *9* (см. рис. 24-27) на второй шаговый транспортер *10*, вдоль которого расположены автоматы для очистки шлака *12*,

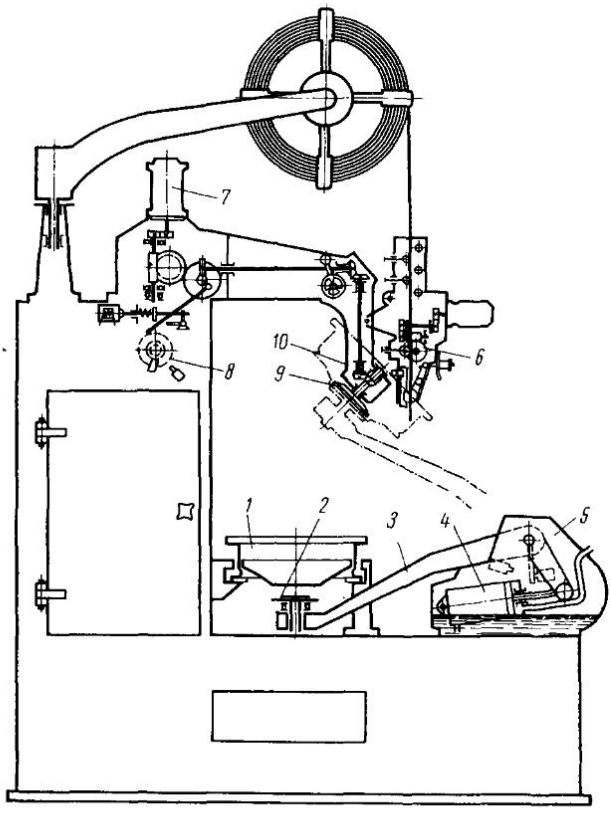


Рис. 24-28. Схема автомата для электродуговой сварки колес

пробивки ниппельного отверстия *13* и зачистки заусенцев *14*. В тех случаях, когда какой-либо сварочный автомат неисправен, либо выключен, соответствующий ему раздатчик не срабатывает, и несваренное колесо, дойдя до конца первого шагового транспортера, автоматически перегружается на конвейер возврата *4*, доставляющий несваренные колеса к началу линии.

В условиях массового производства сварных деталей приборов применяют автоматы, которые могут быть отнесены к IX классу. Так автомат ЗР-19, предназначенный для сварки двухзвенных электродов радиоламп (рис. 24-29), выполняет следующие операции. Никелевая *10* и платинитовая *1* проволоки из катушек, через рихтующие ролики *2* и отрезные дюзы *5, 9* механизма отрезки прерывистым движением подаются к месту сварки. Подача проволок осуществляется зажимами *3* механизмов подач, приводимых в движение от распределительного вала.

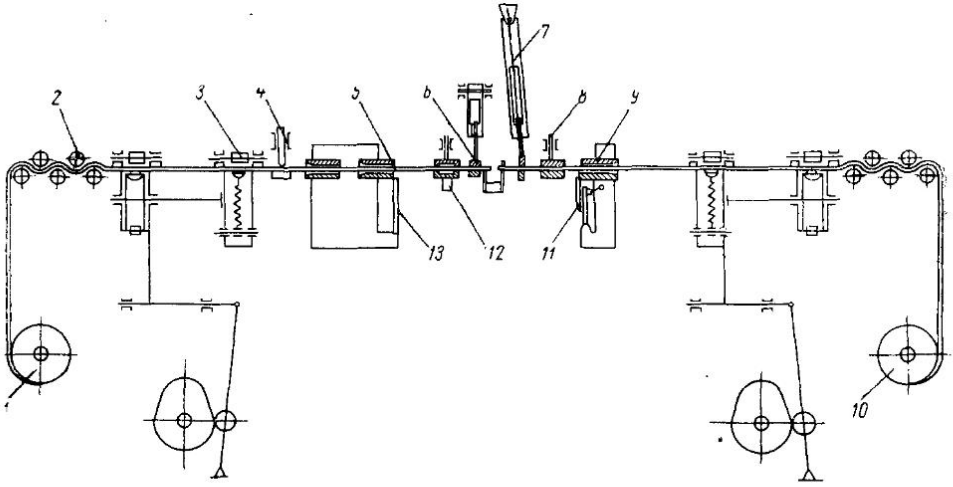


Рис. 24-29. Кинематическая схема автомата ЗР-19

Центровка свариваемых концов производится зажимами *8* и *12* и вилок *6* и *7*. Сварка происходит путем разряда конденсаторов при сближении концов в результате их оплавления и осадки за счет продолжающегося перемещения никелевого звена при торможении платинитового зажимом *4*. После окончания сварки проволоки отрезаются ножами *11* и *13* и сварное изделие зажимом *6* выбрасывается в ящик готовых изделий.

Дальнейшее развитие автоматизации массового производства однотипных сварных деталей, вероятно, пойдет по пути широкого использования роторных сборочно-сварочных линий. В таких линиях обработка изделий производится в процессе их транспортировки. С помощью транспортного ротора *1* (рис. 24-30) изделия подаются в сектор питания $\alpha_п$ рабочего ротора *2* и подвергаются обработке в рабочем секторе $\alpha_р$. В секторе съема $\alpha_с$ они выдаются из ротора *2* в транспортный ротор *3*, в целях передачи изделия на следующий рабочий ротор для выполнения другой операции. Рабочие инструменты, производящие обработку изделия, движутся совместно с ротором, и их количество равно

количеству гнезд ротора. При этом все гнезда ротора обычно имеют одинаковый инструмент, и изделия в рабочем секторе проходят одну и ту же операцию.

Первый сборочно-сварочный роторный автомат конструкции ИЭС им. Е. О. Патона, предназначенный для сборки и сварки тракторных катков, работает следующим образом. Специальный автооператор принимает из лоткового устройства одновременно

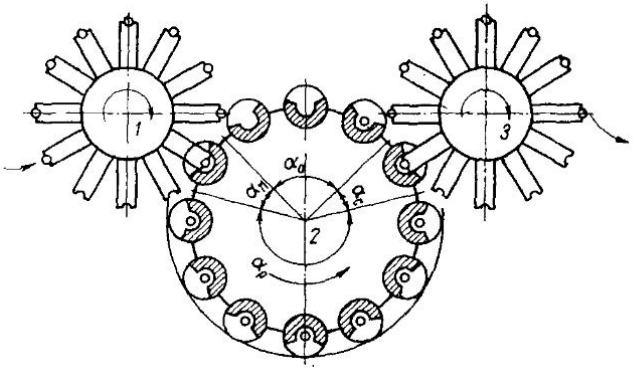


Рис. 24-30. Схема автоматической линии роторного типа

две заготовки и, следуя за планшайбой, на ходу подает их в зажимное (сборочное) устройство, где обе заготовки крепятся и приводятся во вращение. Затем включается сварочная головка, автоматически возбуждается дуга, подается флюс и начинается сварка. После того, как свариваемый каток совершит полный оборот вокруг своей оси, сварка прекращается. Зажимное устройство освобождает сваренное изделие, и оно в определенном положении ротора выгружается на ходу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения. «Машиностроение», 1968.

2. Куркин С. А. Технология изготовления сварных конструкций. Машгиз, 1962.

3. Мирлин Г. А. Сварка в автостроении. Машгиз, 1963.

4. Николаев Г. А. Сварные конструкции. Машгиз, 1962.

5. Общемашиностронтельные типовые и руководящие материалы. Ч. 2 и 3. Оборудование для комплексной механизации сварочного производства. М., 1964.

6. Севбо П. И. Комплексная механизация и автоматизация сварочных процессов. Киев, «Наукова думка», 1964.

7. Окерблом Н. О., Демянцевич В. П., Байкова И. П. Проектирование технологии изготовления сварных конструкций. Судпромгиз, 1963.

8. Стрелецкий Н. С. и др. Стальные конструкции. Стройиздат, 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Глава I. **Вводная** 5
Глава II. **Материалы** 10
§ 1. Сорта сталей и алюминиевых сплавов 10
§ 2. Сортамент 17
Глава III. **Заготовительные операции** 22
Глава IV. **Сварные соединения и расчет их прочности при статических нагрузках** 31
§ 1. Принципы расчета строительных конструкций по предельному состоянию 31
§ 2. Принципы расчета машиностроительных конструкций по допускаемым напряжениям 33
§ 3. Расчетные сопротивления и допускаемые напряжения при расчете прочности сварных соединений в стальных конструкциях 34
§ 4. Допускаемые напряжения для сварных конструкций из алюминевых сплавов 36
§ 5. Электродуговые сварные соединения 38
§ 6. Сварные соединения, выполненные контактной сваркой . . . 58
§ 7. Соединения при специальных методах сварки 69
§ 8. Соединения при сварке пластмасс 79
§ 9. Примеры расчета 81
§ 10. Комбинированные клепано-сварные соединения 85
§ 11. Клеено-сварные соединения 87
§ 12. Паяные соединения 88
§ 13. Соединения, работающие на изгиб и сложное сопротивление . 91
§ 14. Расчет прочности сварных соединений по рекомендации Международного института сварки (МИС) 102
§ 15. Условные обозначения сварных швов 106
Глава V. **Концентрация напряжений в сварных соединениях и методы ее снижения** 110
§ 1. Общие соображения 110
§ 2. Распределение напряжений в стыковых швах 113
§ 3. Распределение напряжений в лобовых швах 114
§ 4. Распределение напряжений во фланговых швах 120
§ 5. Распределение напряжений в комбинированных соединениях с лобовым и фланговыми швами 124
§ 6. Распределение усилий в роликовых соединениях, сваренных контактным способом 126
§ 7. Распределение усилий в точечных соединениях, сваренных контактным способом 127
§ 8. Концентрация деформаций в зоне дефектов 131
Глава VI. **Деформации, напряжения и перемещения, вызываемые процессом сварки** 133
§ 1. Деформации и напряжения при неравномерном нагреве и остывании 133

§ 2. Свойства металлов при высоких температурах. Распределение температур при сварке 136
§ 3. Образование деформаций, напряжений и перемещений при сварке 139
§ 4. Остаточные напряжения в сварных соединениях 145
§ 5. Деформации и перемещения в сварных соединениях и конструкциях 148
§ 6. Остаточные напряжения и перемещения, возникающие в элементах оболочек 161
§ 7. Экспериментальные методы определения сварочных деформаций, напряжений и перемещений 165
Глава VII. **Методы снижения остаточных напряжений и деформаций в сварных конструкциях** 170
§ 1. Общие замечания 170
§ 2. Уменьшение остаточных напряжений 172
§ 3. Способы уменьшения сварочных деформаций и перемещений 177
§ 4. Особенности уменьшения напряжений и перемещений при сварке элементов тонкостенных оболочек 186
Глава VIII. **Технологическая прочность сварных соединений и методы ее повышения** 190
§ 1. Образование в сварных соединениях горячих (кристаллизационных) трещин 190
§ 2. Образование в сварных соединениях холодных трещин . . . 192
Глава IX. **Статическая прочность сварных соединений** 197
§ 1. Общие положения 197
§ 2. Прочность сварных соединений 202
§ 3. Повышение статической прочности 214
Глава X. **Усталостная прочность сварных соединений и методы ее повышения** 217
§ 1. Прочность основного металла при переменных нагрузках . . 217
§ 2. Прочность сварных соединений из стали, выполненных дуговой сваркой, при переменных нагрузках 222
§ 3. Усталостная прочность сварных соединений элементов больших толщин 229
§ 4. Усталостная прочность сварных соединений при контактной сварке 231
§ 5. Усталостная прочность сварных соединений из цветных сплавов, сваренных дуговой сваркой 234
§ 6. Методы повышения прочности сварных соединений при переменных нагрузках 235
§ 7. Допускаемые напряжения при работе конструкций под переменными нагрузками 240
Глава XI. **Хрупкие разрушения сварных соединений** 246
§ 1. Общие положения 246
§ 2. Причины хрупких разрушений сварных конструкций 251
§ 3. Прочность сварных соединений при ударе 255
§ 4. Предупреждение хрупких разрушений 257
Глава XII. **Конструктивная прочность сварных изделий** 261
§ 1. Понятие о конструктивной прочности 261
§ 2. Влияние схемы напряженного состояния 266
§ 3. Влияние концентраторов напряжений 271
§ 4. Влияние пониженной температуры 272
§ 5. Влияние пластической деформации и деформационного старения 274
§ 6. Пути повышения конструктивной прочности 275
Глава XIII. **Общие принципы рационального проектирования и изготовления сварных конструкций** 279
§ 1. Рациональное проектирование и изготовление конструкций . 279

§ 2. Выбор материалов для сварных конструкций 281
§ 3. Рациональное построение технологических процессов изготовления сварных конструкций 285
§ 4. Сборочно-сварочные операции и проектирование приспособлений 288
Глава XIV. **Балки** 301
§ 1. Общие сведения о балках 301
§ 2. Схема расчета балок 302
§ 3. Определение расчетных усилий в балках методом линий влияния 303
§ 4. Расчет жесткости и прочности 308
§ 5. Общая устойчивость 313
§ 6. Местная устойчивость 315
§ 7. Ребра жесткости 316
§ 8. Работа на кручение 318
§ 9. Расчет с учетом пластических деформаций 319
§ 10. Сварные соединения 322
§ 11. Стыки 323
§ 12. Применение штампованных и гнутых профилей 324
§ 13. Применение алюминиевых сплавов 326
§ 14. Опорные части 330
§ 15. Результаты испытаний 331
§ 16. Примеры сварных конструкций 333
§ 17. Пример расчета и конструирования балки 336
Глава XV. **Стойки** 353
§ 1. Типы поперечных сечений 353
§ 2. Устойчивость стоек со сплошными поперечными сечениями . 355
§ 3. Прочность и устойчивость стоек с составными поперечными сечениями 365
§ 4. Соединительные элементы 366
§ 5. Стыки 371
§ 6. Базы и оголовки 372
§ 7. Примеры стоек 372
Глава XVI. **Изготовление конструкций балочного типа** 376
§ 1. Изготовление балок двутаврового сечения 376
§ 2. Пример проектирования оснастки поточной линии сборки и сварки двутавровых балок 388
§ 3. Изготовление конструктивных элементов двутаврового сечения 400
§ 4. Изготовление балок коробчатого сечения 405
§ 5. Приемы выполнения стыков балок 411
Глава XVII. **Сварные рамы** 414
§ 1. Типы соединений элементов рамы 414
§ 2. Соединения балок в рамах с дополнительными усилениями . 417
§ 3. Соединения балок со стойками 420
§ 4. Точечные соединения рам, работающих на изгиб 421
§ 5. Сварные рамы и станины 424
§ 6. Рамы под двигатели 427
§ 7. Изготовление рам 428
Глава XVIII. **Решетчатые конструкции (фермы)** 440
§ 1. Типы ферм 440
§ 2. Определение нагрузок и усилий стержней 441
§ 3. Линии влияния усилий стержней 443
§ 4. Поперечные сечения стержней 448
§ 5. Сечения сжатых и растянутых поясов, раскосов и стоек . . 449
§ 6. Узлы ферм 453
§ 7. Специальные конструкции ферм 461
§ 8. Стыковые соединения поясов 463

§ 9. Сварные легкие прутковые фермы 467
§ 10. Применение алюминиевых сплавов в сварных конструкциях ферм 468
§ 11. Пример расчета алюминиевой фермы 469
§ 12. Пример расчета стальной фермы 472
§ 13. Применение пайки 475
§ 14. Пример расчета кранового моста 476
§ 15. Изготовление решетчатых конструкций 505
Глава XIX. **Листовые конструкции (расчет и проектирование)** . . . 514
§ 1. Вертикальные цилиндрические резервуары 514
§ 2. Покрытия цилиндрических резервуаров 521
§ 3. Резервуары со сферическими днищами 524
§ 4. Сферические и каплевидные резервуары 527
§ 5. Цистерны 529
§ 6. Местные напряжения в листовых конструкциях 530
§ 7. Газгольдеры 533
§ 8. Применение алюминиевых сплавов для изготовления резервуаров и цистерн 534
§ 9. Конструкции металлургического и других комплексов 535
§ 10. Котлы и сосуды, работающие под давлением 539
§ 11. Трубы и трубопроводы 554
Глава XX. **Листовые конструкции (технология изготовления)** . . . 561
§ 1. Негабаритные емкости и сооружения 561
§ 2. Сосуды, работающие под давлением 588
§ 3. Изготовление сварных труб 616
§ 4. Сварка труб и трубопроводов 629
§ 5. Корпусные листовые конструкции 640
Глава XXI. **Сварные детали машин (расчет и конструирование)** . . 658
§ 1. Типы сварных деталей машин 658
§ 2. Барабаны 665
§ 3. Корпуса редукторов 671
§ 4. Шестерни и шкивы 675
Глава XXII. **Сварные детали машин (технология изготовления)** . . . 680
§ 1. Детали тяжелого и энергетического машиностроения . . . 680
§ 2. Детали общего машиностроения 698
§ 3. Сварка деталей приборов 710
Глава XXIII. **Сварные соединения стержней и рельсов** 715
§ 1. Сварные соединения арматуры железобетона 715
§ 2. Изготовление арматурных сварных конструкций 718
§ 3. Сварка стыков рельсов 722
Глава XXIV. **Механизация и автоматизация сварочного производства** 725
§ 1. Механизация транспортных операций 725
§ 2. Механизация заготовительных операций 739
§ 3. Механизация и автоматизация сборочно-сварочных операций 745
Литература 756