

蓮井 淳・森垣 脩 共著

肉盛溶接・溶射

ХАСУИ А., МОРИГАКИ О.

НАПЛАВКА
И НАПЫЛЕНИЕ

«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

溶接全書

15 肉盛溶接・溶射

蓮井 淳・森垣 脩 共著

ХАСУИ А., МОРИГАКИ О.

НАПЛАВКА И НАПЫЛЕНИЕ

Перевод с японского *В. Н. Попова*

Под редакцией
В. С. Степина, канд. техн. наук *Н. Г. Шестеркина*

産報出版



МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1985

ББК 34.641
X12
УДК 621.792+621.793.7

621.791

ПРЕДИСЛОВИЕ

В целях популяризации знаний в области сварочной техники Японский институт сварки в сотрудничестве с издательством «Сампо сьуппан» предпринял в послевоенный период выпуск 20-томной серии книг по сварке под названием «Библиотека сварщика», внесшей большой вклад в дело повышения технического уровня в различных областях сварочного производства. С тех пор издание неоднократно пересматривалось и дополнялось в соответствии с новыми техническими достижениями, однако за срок около 20 лет, прошедших со времени публикации «Библиотеки сварщика», ее содержание изрядно устарело, и многие разделы перестали отвечать современным требованиям. В связи с этим было решено выпустить новую серию под названием «Энциклопедия сварки», которая должна была соответствовать современному уровню развития техники.

В настоящей книге приведены некоторые сведения, которыми располагают современная наука и техника по наплавке и напылению.

В процессе эксплуатации машин и механизмов их детали зачастую работают в жестких условиях контактирования с высокотемпературными газами, различными агрессивными средами и абразивными веществами, вызывающими интенсивную коррозию или износ поверхности. По мере повышения скорости действия машин и механизмов, увеличения их размеров и производительности условия работы поверхности деталей становятся все более жесткими. В связи с этим возникает необходимость применения специальных мер, обеспечивающих радикальное повышение жаропрочности, коррозионной стойкости, износостойкости и других важных свойств поверхности материалов. Эта задача может быть успешно решена применением наплавки и напыления как способов поверх-

Хасуи А., Мorigаки О. Наплавка и напыление/Пер. с яп.
X12 В. Н. Попова; Под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина.— М.:
Машиностроение, 1985.— 240 с., ил.

В пер. 1 р. 40 к.

Приведены новые сведения о технологии и практике применения в Японии процессов наплавки и напыления. Изложены методы нанесения покрытий наплавкой и напылением, обеспечивающие повышение износостойкости, коррозионной и эрозийной стойкости рабочих поверхностей деталей. Приведены сведения о наплаваемых и напыляемых материалах, указаны возможные области использования описываемых методов, а также преимущества и недостатки последних, подробно рассмотрены вопросы подготовки поверхности деталей перед нанесением покрытий.

Для инженерно-технических работников сварочного производства, специализирующихся в области наплавки и напыления материалов.

X 2704060000-117 117-85
038(01)-85

ББК 34.641
6П4.3

© Printed in Japan, 1978

© Перевод на русский язык, «Машиностроение», 1985 г.

Библиотечка
ИТЭ «ЗАРС»

ностного упрочнения материалов. Современные достижения в разработке и совершенствовании оборудования позволили значительно улучшить эксплуатационные свойства наносимых покрытий. Это особенно важно в условиях экономии сырья и повышения эффективности использования энергии.

Материал книги написан авторами в соответствии с их практической деятельностью: главы, относящиеся к наплавке, — О. Мorigаки, главы, посвященные напылению — А. Хасуи. В тексте есть ссылки на публикации, вышедшие в Японии и других странах, авторам которых следует выразить глубокую благодарность.

ГЛАВА 1

СПОСОБЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

К рабочим поверхностям деталей машин в зависимости от условий их эксплуатации предъявляют определенные требования по различным свойствам: износостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости и др. Прочность деталей достигается путем использования соответствующих материалов с необходимыми исходными свойствами. Иными словами, при проектировании машин необходимо исходить из прочности современных материалов.

Важнейшими факторами, определяющими эксплуатационную надежность и срок службы деталей и конструктивных элементов машин, являются также свойства материалов поверхностей этих деталей и элементов. Например, наземные здания и сооружения подвергаются разрушению под воздействием дождя, ветра и солнечных лучей, суда — от постоянного контакта с морской водой, химическое оборудование интенсивно изнашивается в результате агрессивного действия различных химикатов, жидкостей и газов, строительные машины изнашиваются от абразивного действия грунта и песка, изнашивание деталей машин общего назначения происходит в результате взаимного трения их рабочих поверхностей.

Увеличение размеров оборудования, повышение его быстродействия и производительности сопровождаются ужесточением условий работы его узлов и механизмов. Увеличение срока службы деталей машин можно обеспечить путем образования на поверхности этих деталей и элементов слоев или покрытий, обладающих высоким уровнем требуемых свойств — коррозионной стойкости при высоких температурах, износостойкости, твердости, жаростойкости и др.

Такой путь представляет значительные резервы экономии сырьевых ресурсов. Применение технологии улучшения свойств поверхности материалов расширяет перспективу проектирования и производства различного оборудования с более высоким уровнем эксплуатационных показателей, что, в свою очередь, позволяет сократить потребление энергии и повысить производительность труда в различных отраслях промышленности. Существуют разнообразные способы поверхностной обработки, из которых основные, имеющие промышленное применение, перечислены в табл. 1.1 [1—4].

1.1. Способы поверхностной обработки

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
<i>Химические и электрохимические способы</i>		
Электролитическое металлопокрытие	Осаждение металла с образованием покрытия на поверхности изделия при пропускании тока между анодом (пластиной из металла, наносимого на изделие) и катодом (обрабатываемым изделием)	Никелирование осуществляют для повышения коррозионной стойкости. Никелевое покрытие, обладающее твердостью HV 140—240, используют в декоративных целях или для реставрации изношенных деталей машин Хромирование обеспечивает получение твердого или мягкого покрытия. Хромовое покрытие, обладающее высокой коррозионной стойкостью, используют для декоративных целей, а твердое (твердость HV 800—1000), с высокой износостойкостью — для повышения износостойкости деталей машин, реставрации изношенных деталей и поверхностного упрочнения штампов и пресс-форм для обработки металлов и пластмасс
Химическое металлопокрытие	Образование покрытия на поверхности металлических изделий за счет осаждения ионов металла из водного раствора хлорида металла без применения электрического тока	Используют для покрытия латуни, кадмием, медью, золотом, никелем, оловом и другими металлами
Химическое покрытие	Образование фосфатного, оксалатного, оксидного или иного химического неметаллического покрытия на поверхности металлических изделий, погруженных в раствор требуемого состава и выдерживаемых в нем при температуре до 200°C	Применяют при обработке изделий из алюминия, меди, магния, стали и других металлов для повышения коррозионной стойкости, в декоративных целях или как грунтовку перед окраской, в частности как способ повышения коррозионной стойкости высокопрочных болтов, автомобильных деталей и др.
<i>Физические способы</i>		
Горячее металлопокрытие погружением	Образование покрытия путем погружения металлического изделия в ванну расплавленного металла	Горячее алюминирование — погружение стальных изделий в ванну расплавленного алюминия с температурой не ниже 680°C, с образованием поверхностного слоя сплава железа с

Продолжение табл. 1.1

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
		алюминием толщиной до 0,1 мм для повышения их стойкости к окислению и коррозионной стойкости при высоких температурах Горячее цинкование — погружение стальных изделий в ванну расплавленного цинка с температурой 450°C для образования металлопокрытия, состоящего из слоя чистого цинка и твердого слоя сплава железа с цинком
Диффузионное насыщение	Диффузионное насыщение поверхностного слоя изделия металлом или сплавом при высокой температуре с использованием насыщающего состава, основным компонентом которого является металл, сплав или металлическое соединение	Диффузионное насыщение алюминием осуществляют в смеси алюминиевого порошка с небольшим количеством хлористого аммония при температуре 850—1000°C. На поверхности изделия образуется слой сплава железа с алюминием, обладающий высокой стойкостью к окислению и коррозионной стойкостью при высокой температуре Диффузионное насыщение хромом осуществляют в смеси феррохрома, йодистого аммония и порошкового каолина при температуре нагрева 950—1100°C при обработке углеродистой стали, содержащей до 0,3% С, и 800—950°C — при обработке высокоуглеродистой стали. Первую из сталей обрабатывают для повышения коррозионной стойкости, вторую — для повышения твердости
Сульфидирование	Образование сульфидного слоя на поверхности стальных изделий в результате диффузии свободной серы, образующейся при температуре обработки (до 600°C) за счет распада сульфуратора, состоящего из нейтральной соли, карбоната или другого неорганического вещества с добавлением сернистого соединения	Сульфидный слой предотвращает заедание, повышает износостойкость

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
Цементация	Диффузионное насыщение углеродом поверхности изделий из низкоуглеродистой или низколегированной стали при температуре 800—950°C. По виду карбюризатора цементация бывает газообразной (среда — оксид углерода, метан или иной восстановительный газ, содержащий углерод), твердой (среда — древесный уголь, углекислые натрий, кальций и барий или их смесь), жидкой (среда — соляная ванна на основе цианистого натрия)	Для упрочнения поверхностного слоя до твердости <i>HV</i> 700—850. Используют для обработки автомобильных и других деталей машин, инструментов
Азотирование	Образование нитридного слоя на поверхности изделий из стали, содержащей алюминий, хром, молибден и другие легирующие элементы, при нагреве до 475—580°C в среде аммиака. Азотирование бывает жидким и газовым	Для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и усталостной прочности поверхностного слоя зубчатых колес и других деталей машин с твердостью <i>HV</i> 500—1200
Нитроцементация	Одновременное насыщение поверхности изделий из углеродистой стали азотом и углеродом при нагреве до температуры 750—900°C в атмосфере, состоящей из газообразного карбюризатора с добавлением нескольких процентов аммиака, с последующей закалкой изделия от температуры обработки	Для повышения износостойкости и коррозионной стойкости поверхности изделий
Газопламенная закалка	Образование упрочненного слоя закалкой после нагрева поверхности стальных изделий пламенем горючей смеси (ацетилена, пропана или светильного газа с кислородом)	Для повышения износостойкости за счет повышения твердости
Индукционная закалка	Упрочнение закалкой посредством нагрева поверхности стального изделия током высокой частоты (ТВЧ)	Для повышения износостойкости за счет повышения твердости

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
Вакуумное осаждение	Нанесение слоя путем осаждения атомов или молекул металла или соединения на поверхность изделия при их возгонке в условиях высокого вакуума (остаточное давление 13,3—1,3 мПа)	Для улучшения металлического блеска и повышения оптических свойств поверхности изделий
Эмалирование	Нанесение на поверхность металлических изделий стеклянной глазури и обжиг	Для повышения коррозионной стойкости, жаропрочности, износостойкости, электроизоляционных свойств
Электроискровое упрочнение	Образование упрочненного слоя за счет диффузионного переноса вещества электрода в поверхностный слой изделия в условиях высокотемпературного искрового разряда между изделием и электродом при передаче колебательных движений от магнитного вибратора на электрод, вибрация которого сопровождается периодическим размыканием цепи, соединяющей электрод с изделием с помощью конденсатора, подключенного к источнику тока через сопротивление	Применяют как способ повышения износостойкости за счет поверхностного упрочнения. Используют для упрочнения штампов и пресс-форм
Наплавка	Нанесение слоя расплавленного металла на оплавленную металлическую поверхность путем плавления присадочного материала теплотой кислородно-ацетиленового пламени, электрической или плазменной дуги и др.	Для восстановления изношенных деталей и создания на поверхности изделия слоя, обладающего повышенной износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью и другими свойствами
<i>Механические способы</i>		
Плакирование	Изготовление листа из двух и большего числа металлических слоев, соединенных между собой способом прокатки, сварки взрывом или литьем	В качестве плакирующего материала используют коррозионно-стойкую сталь, никель, монель-металл, медь, сплав «хастеллой», титан и другие металлы, обладающие высокой коррозионной стойкостью

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
Дробеструйная обработка	Образование механически упрочненного слоя (наклеп) путем бомбардирования поверхности изделия металлической дробью	Для повышения усталостной прочности изделий с упрочнением поверхностного слоя на глубину 0,3—0,5 мм
Напыление	Образование на поверхности изделия покрытия из нагретых до плавления или близкого к нему состояния частиц распыляемого материала с использованием теплоты сжигания горючей смеси или теплоты дугового разряда в газовых средах	Для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, жаропрочности или для восстановления изношенных деталей. В качестве напыляемого материала используют металлы, сплавы, соединения металлов и другие материалы

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНИКИ НАПЛАВКИ

2.1. Общие сведения. При длительной эксплуатации машин изнашивание деталей сопровождается снижением эксплуатационных показателей, что в частности вызывает ухудшение качества изготавливаемых изделий. Изнашивание рабочих поверхностей деталей нередко требует их полной замены. Это повышает себестоимость производства из-за больших амортизационных отчислений.

В ряде случаев изготовление деталей целиком из износостойкой легированной стали нерационально в связи с трудностью обработки и высокой стоимостью стали. Поэтому для решения задач повышения эксплуатационных показателей и увеличения срока службы деталей машин используют различные способы поверхностного упрочнения, в частности наплавку, нашедшую широкое применение в производстве разнообразных изделий — от крупногабаритных, таких как сосуды высокого давления атомных реакторов, установки для десульфурации мазута (для повышения коррозионной стойкости), валки прокатных станков в металлургии (для упрочнения), до мелких деталей типа выхлопных гнезд и клапанов двигателей внутреннего сгорания (с целью повышения жаропрочности и износостойкости). В последующих главах рассмотрены примеры применения технологии наплавки при производстве строительных машин, землесосных снарядов, металлургического оборудования, железнодорожного подвижного состава и сосудов высокого давления.

В промышленности применяют разнообразные способы сварки: ручную (газовую, дуговую покрытыми электродами), полуавтоматическую (дуговую в среде защитного газа или без защитной среды) и автоматическую (дуговую под флюсом). Для наплавки выбирают экономически целесообразный способ сварки, при котором на поверхность основного металла наносят равномерный слой сплава, обладающий высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью или жаропрочностью [1].

Появление технологии наплавки относится к 1896 г., когда Спенсер получил патент на изобретение [1]. Однако промышленное применение началось несколько позже. В частности, в 1922 г. братья Студи впервые осуществили в США наплавку коронок нефтяного бура способом газовой сварки с использованием присадочного материала в виде стальной трубки, заполненной хромовым

сплавом [2]. Примерно в это же время была осуществлена наплавка клапанов двигателей внутреннего сгорания с помощью изобретенного Хейнзом сплава — стеллита (кобальтохромовольфрамового сплава) [2]. Первое время для наплавки использовали газовую сварку, но впоследствии по мере развития технологии сварки стали использовать и другие способы.

Начало автоматической наплавки относится к 1939 г., когда советские специалисты Михайлов и Ларионов осуществили наплавку с помощью покрытых электродов прямоугольного сечения [3]. В Японии исследования в области технологии наплавки были начаты в 1955 г. [4]. В настоящее время ее широко используют для нанесения коррозионно-стойкого покрытия на сосуды высокого давления атомных реакторов, для упрочнения валков прокатных станов и других крупногабаритных изделий.

Наплавка сыграла большую роль в деле увеличения производительности труда, повышения качества продукции и экономии сырья при производстве промышленного оборудования, его эксплуатации и ремонте. В дальнейшем предстоит освоение новых разработок по созданию сварочных материалов, обладающих более высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками, а также более производительного оборудования.

По сравнению с другими способами поверхностной обработки металла технология наплавки обладает рядом преимуществ и недостатков.

2.2. Преимущества технологии наплавки. 1. Возможность нанесения металлического покрытия большой толщины. Это позволяет изготавливать сосуды высокого давления из обычной стали с последующей наплавкой коррозионно-стойкой стали на внутреннюю поверхность, что более экономично по сравнению с применявшейся ранее технологией изготовления сосудов из плакированной стали, получаемой прокаткой. Наплавка приносит также большой эффект при восстановлении деталей с большой величиной износа.

2. Высокая производительность. При наплавке валков прокатных станов или сосудов высокого давления с помощью ленточных электродов производительность процесса достигает 15—25 кг/ч.

3. Относительная простота конструкции и транспортабельность оборудования, приспособленного для выполнения работ вне помещений. Например, наплавка покрытыми электродами или полуавтоматическая позволяет ремонтировать изношенные детали землеройных и других строительных машин в полевых условиях.

4. Отсутствие ограничений по размерам наплавляемых поверхностей изделий. Наплавку можно применять для таких крупногабаритных объектов, как сосуды высокого давления атомных реакторов и конусы засыпных аппаратов доменных печей, тогда как другие способы поверхностной обработки (горячее или электролитическое металлопокрытие, цементация и т. д.) имеют существенные ограничения по размерам обрабатываемых изделий. Например, толстостенные сосуды высокого давления можно изготавливать из технологического стального листа с последующей износостойкой

наплавкой внутренней поверхности, что значительно проще, чем изготовление таких сосудов из плакированного стального листа, не обладающего достаточной технологичностью.

5. Простота выполнения, не требующая высокой квалификации сварщика. Достаточно высокая квалификация сварщика необходима только при ручной наплавке покрытыми электродами, тогда как при механизированной наплавке (например, при наплавке под флюсом) процесс значительно упрощается. Сварщик, хорошо овладевший сваркой, например, при строительстве зданий и мостов, производстве химического оборудования и других отраслях, может достаточно квалифицированно выполнять наплавку.

6. Возможность нанесения износостойкого покрытия на основной металл любого состава. При упрочнении закалкой, азотированием и другими аналогичными способами высокий эффект поверхностного упрочнения достигается лишь для металла определенного состава, тогда как при наплавке состав и свойства основного металла не имеют большого значения. В случаях, когда основной металл имеет низкую свариваемость, предварительно наносят подслои низкоуглеродистой стали, а затем наплавляют слой твердого металла. Отсутствие ограничений по составу (типу) стали для наплавляемых изделий позволяет снизить себестоимость производства и упростить технологию изготовления изделий.

7. Возможность повышения эффективности наплавки путем ее сочетания с другими способами поверхностной обработки. После наплавки изделие иногда подвергают пламенной закалке или азотированию. Например, для облегчения обработки резанием валы, ролики, валки и другие изделия можно наплавлять материалом с твердостью $HV < 400$ и после механической обработки упрочнять пламенной закалкой.

2.3. Недостатки технологии наплавки. 1. Ухудшение свойств наплавленного слоя из-за перехода в него элементов основного металла. При ручной наплавке покрытыми электродами или автоматической наплавке под флюсом деталей из низкоуглеродистой или низколегированной стали монель-металлом вследствие интенсивного разбавления первого слоя наплавленного металла основным металлом и значительного увеличения содержания в составе наплавленного слоя железа коррозионная стойкость его заметно снижается.

2. Деформация изделия, вызываемая высокой погонной энергией наплавки. Неправильный выбор режима наплавки может привести к чрезмерной деформации изделия после наплавки и браку. Для сохранения точности формы и размеров наплавляемого изделия приходится принимать особые меры: наплавку изделия вести в зажатом состоянии, исключая его деформацию; создавать предварительную деформацию изделия с таким расчетом, чтобы деформация, вызываемая наплавкой, направленная в противоположную сторону, обеспечивала возврат к исходной правильной форме изделия; осуществлять последующую механическую обработку до окончательных размеров.

НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3. Некоторая неравномерность свойств наплавленных изделий, обусловленная тем, что наплавленный слой, в отличие от плакированного, имеет характерные свойства и особый состав, присущие металлу сварных швов. В этой связи исключается возможность использования при наплавке неквалифицированного сварщика, так как он не сможет обеспечить получения изделий стабильного качества. В этом случае обязательно обучение сварщиков. Следует учитывать также, что и опытный сварщик может допускать ошибки из-за недостаточной теоретической подготовки.

В частности, следует знать, что при наплавке аустенитной коррозионно-стойкой стали для предотвращения образования горячих трещин необходимо применение такой стали, в структуре которой содержится несколько процентов феррита, что не позволяет получить в наплавленном слое полностью аустенитную структуру, какая бывает обычно в плакированном слое.

4. Более ограниченный, чем, например при напылении, выбор сочетаний основного и наплавленного металла. Наплавка допускает разнообразные сочетания основного и наплавочного материалов, однако в отличие от напыления имеются определенные ограничения. Например, при изготовлении стальных сосудов с титановым покрытием используют напыление или плакирование прокаткой либо взрывом. Титан обладает удовлетворительной свариваемостью, однако при наплавке стали титаном на границе основного металла и наплавленного слоя образуется хрупкая прослойка интерметаллических соединений, что практически исключает возможность применения методов наплавки титаном.

5. Трудность наплавки мелких изделий сложной формы. Наплавка сопровождается оплавлением поверхностного слоя основного металла и протекает в условиях непрерывного перемещения сварочной ванны, состоящей из смеси основного и наплавляемого металлов. При наплавке мелких изделий условия для нормального формирования такой ванны ухудшаются. При сложной форме изделий также затруднено ее плавное перемещение, что исключает образование ровного качественного наплавленного слоя.

Изложенные выше преимущества и недостатки процесса наплавки следует учитывать при выборе оптимального способа ее осуществления, требуемого сварочного оборудования и материалов.

В процессах наплавки в зависимости от назначения используют следующие наплавочные материалы.

1. Покрытые электроды для дуговой наплавки используют в виде стержней с нанесенным на них покрытием, продукты сгорания и разложения которого обеспечивают защиту дуги и ванны жидкого металла от окружающего воздуха. Электродный стержень изготавливают обычно из проволоки диаметром 3,2—8 мм или литьем. Если невозможно изготовить проволоку, наплавляемый материал (например, карбид вольфрама) используют в виде порошка, которым заполняют стальные трубки.

В японском промышленном стандарте Z3251 определены следующие три вида покрытий электродов, предназначенных для износостойкой наплавки: основного типа (фтористокальциевое) В, высокорутиловое R и карбонатно-рутиловое BR. Главным компонентом состава основного покрытия служит карбонат, к которому добавляют флюорит (плавиковый шпат) и ферросилиций.

Благодаря низкому содержанию водорода в наплавленном металле, получаемом при наплавке электродами с покрытием основного типа, значительно снижается опасность возникновения трещин при наплавке деталей из высокоуглеродистой и легированной стали, а также крупногабаритных стальных отливок без предварительного подогрева. Однако это покрытие уступает двум другим видам покрытия по технологичности при наплавке. Наплавка электродами с высокорутиловым покрытием, содержащим до 35% диоксида титана, отличается высокой технологичностью, характеризуемой, в частности, стабильностью горения дуги, отсутствием разбрызгивания, хорошим отделением шлаковой корки от поверхности валика при небольшом проплавлении основного металла, образованием ровного валика наплавленного металла, а следовательно, простотой последующей механической обработки. Вместе с тем металл, наплавленный электродами с этим покрытием, отличается повышенным содержанием водорода, поэтому при наплавке крупногабаритных отливок или основного металла, подвергающегося закалке с охлаждением на воздухе, существует опасность возникновения трещин. Электроды с карбонатно-рутиловым покрытием занимают по технологическим характеристикам промежуточное положение: отличаются сравнительно хорошей технологич-

ностью при наплавке, обеспечивая стойкость наплавленного металла к возникновению трещин.

2. Проволоку сплошного сечения для автоматической и полуавтоматической наплавки под флюсом и в среде защитного газа используют обычно диаметром 0,8—6,4 мм. С целью получения требуемых свойств и качества наплавленного слоя металла в состав проволоки при выплавке стали обычно вводят марганец, кремний, алюминий, титан и другие раскислители, а также никель, хром, молибден и ванадий в качестве легирующих элементов.

При наплавке в среде защитного газа используют проволоку, состав и свойства которой обеспечивают отсутствие разбрызгивания и высокую технологичность, тогда как при выборе проволоки для наплавки под флюсом такие соображения технологичности учитывают меньше.

3. Ленточные электроды в Японии применяют в основном толщиной 0,4 мм при ширине 25; 37,5; 50; 75 мм и в отдельных случаях шириной 100 и 150 мм.

Наплавку ленточными электродами осуществляют обычно способом дуговой сварки под флюсом. Для наплавки антикоррозионных покрытий применяют ленты из легированных сталей и сплавов, а для износостойкой наплавки слоев твердого сплава, ввиду невозможности изготовления из такого сплава холоднокатаной ленты, в основном используют порошковую ленту, представляющую собой оболочку из низкоуглеродистой стали с сердцевиной, заполненной шихтой из легирующих и шлакообразующих компонентов.

В СССР разработана порошковая лента (рис. 1), широко применяемая для наплавки под флюсом, в среде углекислого газа и открытой дугой [1].

4. Флюсы, применяемые для автоматической наплавки, подобно электродному покрытию способствуют стабилизации дуги, обеспечивают защиту ее от окружающего воздуха, протекание химических реакций и выполнение ряда металлургических функций в процессе наплавки.

При наплавке используют флюсы трех видов: керамические, плавные и смешанные. Плавные флюсы получают путем плавления минерального сырья при температуре выше 1300°C с последующим охлаждением, измельчением, просеиванием и классификацией по крупности. Плавные флюсы, в состав которых входят окислы и фториды, отличаются однородностью и стабильностью структуры, низкой влагопоглощающей способностью. Наплавка высокоуглеродистой и высоколегированной стали с использованием плавных флюсов отличается высокой технологичностью, выража-

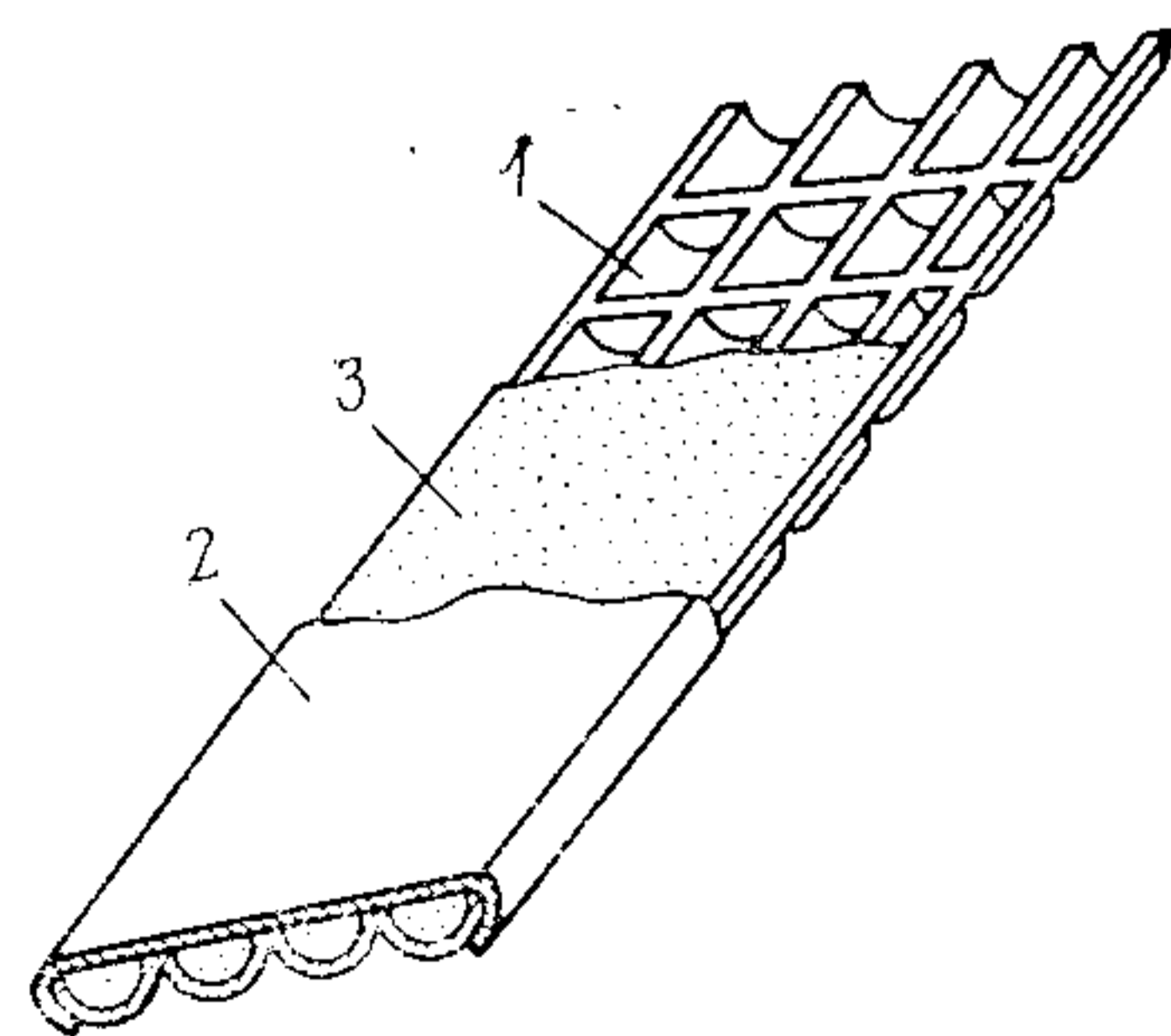


Рис. 1. Порошковая лента:
1 — нижняя гофрированная стальная лента; 2 — верхняя стальная лента; 3 — шихта: легирующие и шлакообразующие компоненты

ющейся, в частности, в хорошем отделении шлака при наплавке.

Керамические флюсы получают путем смешения минерального сырья с металлическим порошком и связующим веществом с последующим гранулированием до заданной крупности. Керамические флюсы, несколько превосходящие плавные по тугоплавкости, успешно используют для наплавки с большой погонной энергией, а возможность добавления легирующих элементов к этим флюсам создает предпосылку их широкого применения для наплавки и сварки коррозионно-стойкой и специальной стали. Смешанные флюсы (флюсовые смеси) получают путем смешения плавных и керамических флюсов и порошкового сырья разного состава в необходимой пропорции.

5. Порошковую проволоку получают путем заполнения флюсующими и металлическими порошками тонкостенной металлической оболочки с последующей обработкой ее для придания формы проволоки.

При автоматической дуговой наплавке под флюсом используют проволоку, сердцевина которой заполнена порошковым сплавом, а при автоматической и полуавтоматической наплавке в среде углекислого газа и открытой дугой применяют проволоку, сердцевина которой содержит раскислители, шлакообразующие компоненты, стабилизаторы дуги и порошковые сплавы.

3.1. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗНОСОСТОЙКОЙ НАПЛАВКИ

Японский промышленный стандарт Z3251 определяет покрытие электроды для дуговой наплавки твердыми сплавами. Типичным примером зарубежных стандартов в этой области является стандарт AWSA5.13 американского общества сварочной техники.

Ниже рассмотрены свойства и назначение материалов для износостойкой наплавки, классифицируемых по виду структуры наплавленного металла.

Перлитно-сорбитные материалы. Состав перлитно-сорбитных материалов — сталей, включающих небольшие добавки углерода, хрома, молибдена, ванадия и других легирующих элементов, подбирают с таким расчетом, чтобы после наплавки и охлаждения на

3.1. Состав и твердость наплавленного металла с перлитно-сорбитной структурой (наплавка покрытыми электродами)

Марка электродов	Состав, %				Твердость HV
	C	Si	Mn	Cr	
DF2A-R	0,12	0,39	0,59	0,81	230
DF2A-B	0,07	0,88	1,03	0,5	257
DF2B-B	0,22	0,7	0,93	0,75	292
DF2A-B	0,15	0,9	1,25	1,3	354

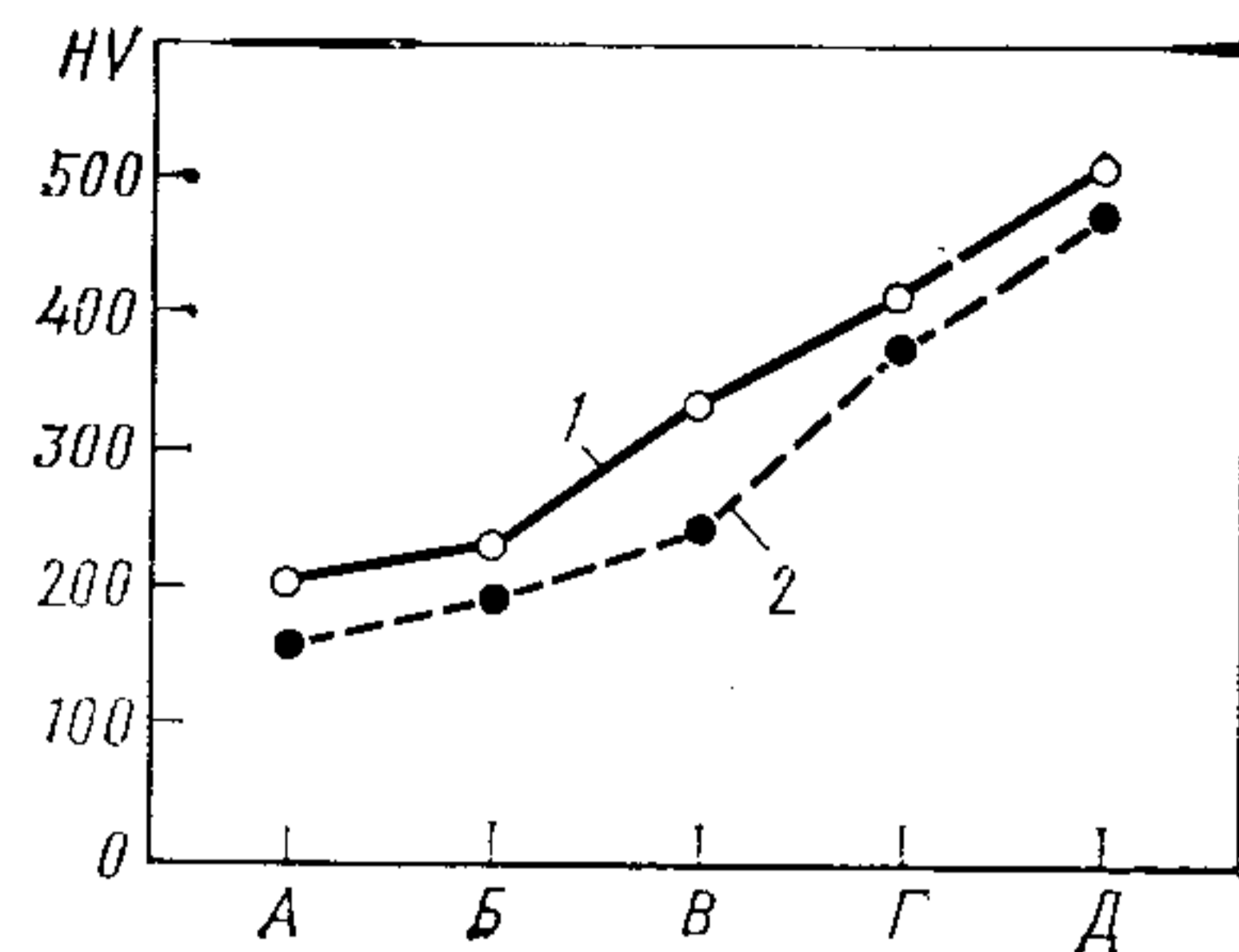


Рис. 2. Изменение твердости металла, наплавленного низколегированными материалами, в зависимости от скорости охлаждения от температуры 860°C:

A — охлаждение в печи; B — охлаждение на воздухе; B' — закалка в масле; D — закалка в воде. Состав наплавленного металла, %:

	C	Si	Mn	Mo
1	0,09	0,69	1,98	0,61
2	0,07	0,88	1,03	—

воздухе структура наплавленного металла при нормальной температуре состояла преимущественно из перлита или сорбита. Из числа материалов, утвержденных Японским промышленным стандартом, к этой группе относятся электроды DF2A и DF2B. В табл. 3.1 приведены примерные данные по химическому составу и твердости металла с перлитно-сорбитной структурой, наплавленного покрытыми электродами некоторых промышленных марок.

Наплавка этими электродами обеспечивает образование в металле в основном перлитной структуры со сравнительно высоким содержанием доэвтектоидного феррита. Твердость наплавленного металла составляет HV 200—300, что значительно ниже твердости мартенсита, поэтому наплавленный слой не обладает достаточной износостойкостью при трении скольжения и качения. В связи с этим наплавку электродом DF2A рекомендуют использовать для восстановления первоначальных размеров изношенных деталей, нанесения подслоя, на который затем наплавляют слой более твердого и износостойкого металла, а также в других случаях с целью простого наращивания. Наплавленный металл с перлитной структурой (рис. 2) склонен к некоторому дополнительному упрочнению (повышению твердости) при закалке, поэтому наплавку перлитными материалами можно использовать для повышения износостойкости деталей. В этом случае после наплавки вначале осуществляют ме-

ханическую обработку резанием, а затем выполняют закалку газовым пламенем или ТВЧ.

На рис. 3 показана микроструктура металла, наплавленного электродами DF2B, который, отличаясь сравнительно малым содержанием легирующих элементов, обеспечивает образование структуры сорбита с небольшим количеством доэвтектоидного феррита. Твердость наплавленного слоя в большинстве случаев составляет HV 300—400. Наплавку электродами DF2B используют для катков и других

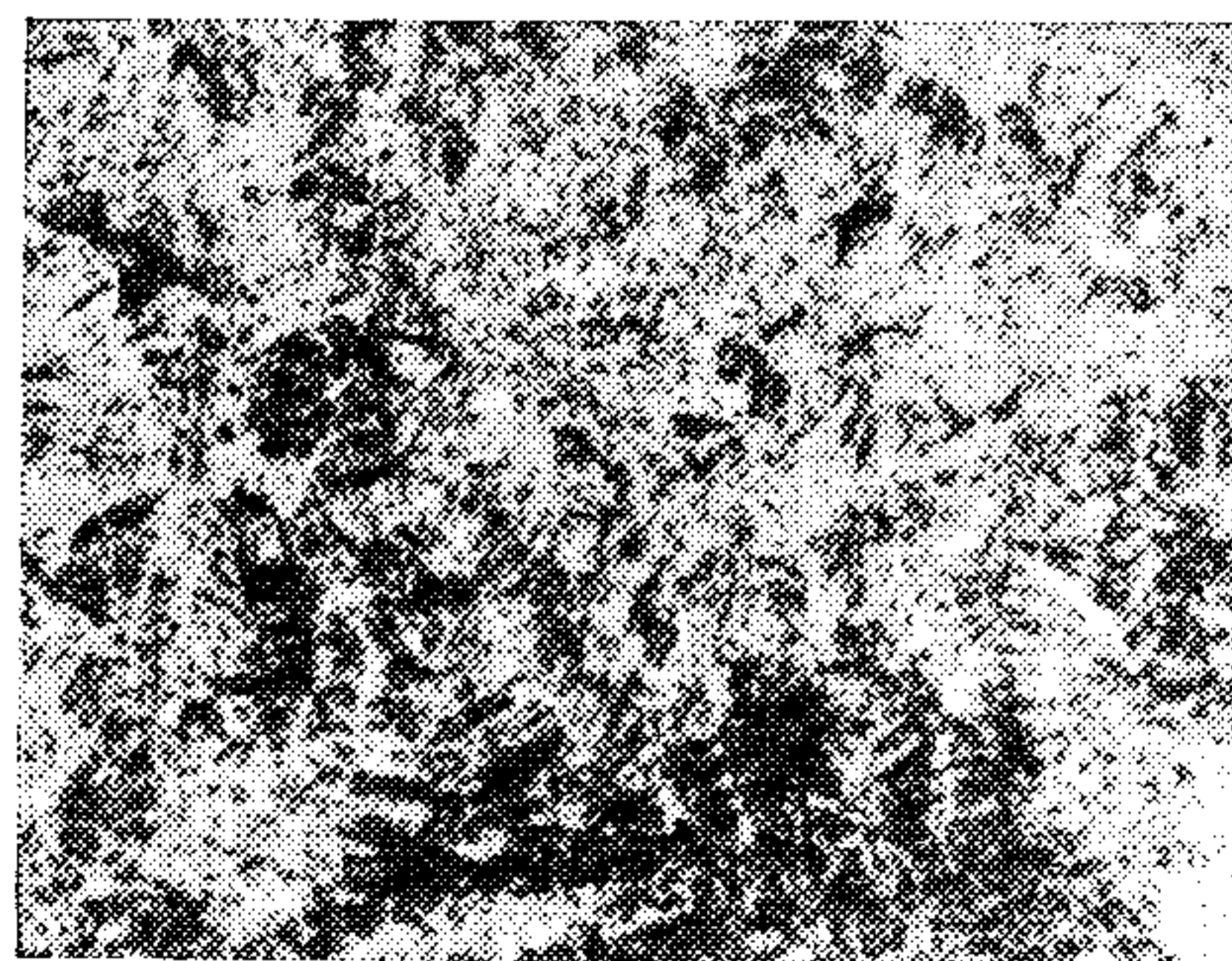


Рис. 3. Сорбитная микроструктура металла, наплавленного электродами DF2B (×10×3/5)

деталей ходовой части тракторов и бульдозеров. После наплавки детали подвергают механической обработке и последующей закалке газовым пламенем или ТВЧ.

Мартенситные материалы. Мартенситными называют наплавочные материалы, обеспечивающие образование мартенситной структуры в состоянии после наплавки. Мартенсит как структура закалки является одним из самых твердых структурных образований в стали, обладает высокой стойкостью при абразивном (песок, гравий) изнашивании и задирации. Вместе с тем мартенситный металл, будучи хрупким, склонен к образованию трещин. Следует также учитывать, что наплавленный слой, полученный с помощью мартенситных наплавочных материалов, при работе в условиях ударно-динамической нагрузки склонен к отрыву от основного металла.

Поскольку к мартенситным причислены наплавочные материалы, обладающие, как видно из табл. 3.2, самым разнообразным составом, ниже рассмотрены четыре группы материалов: низколе-

3.2. Состав и твердость наплавленного металла с мартенситной структурой (наплавка покрытыми электродами)

Марка электродов	Состав, %							Структурный класс материала	Твердость HV
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	B		
DF2B	0,25	1,38	0,92	2,86	0,46	—	—	Низколегированный мартенсит	250
DF2C	0,64	0,8	1,16	2,72	—	0,25	—	То же	705
DF3A	0,3	1,47	0,46	3,91	0,5	—	—	»	580
DF3B	0,46	0,94	1,18	4,01	0,5	—	—	»	640
DF3C	0,9	0,95	0,75	8,25	0,52	—	0,27	Боросодержащий мартенсит	805
DF3C	0,74	1	0,59	7,1	0,85	—	—	Лустенитно-мартенситный	580
DF4A	0,25	0,83	2,46	10,78	—	—	—	Хромистая сталь	550
DF4C	1,01	0,35	0,85	12,75	0,50	—	—	То же	370

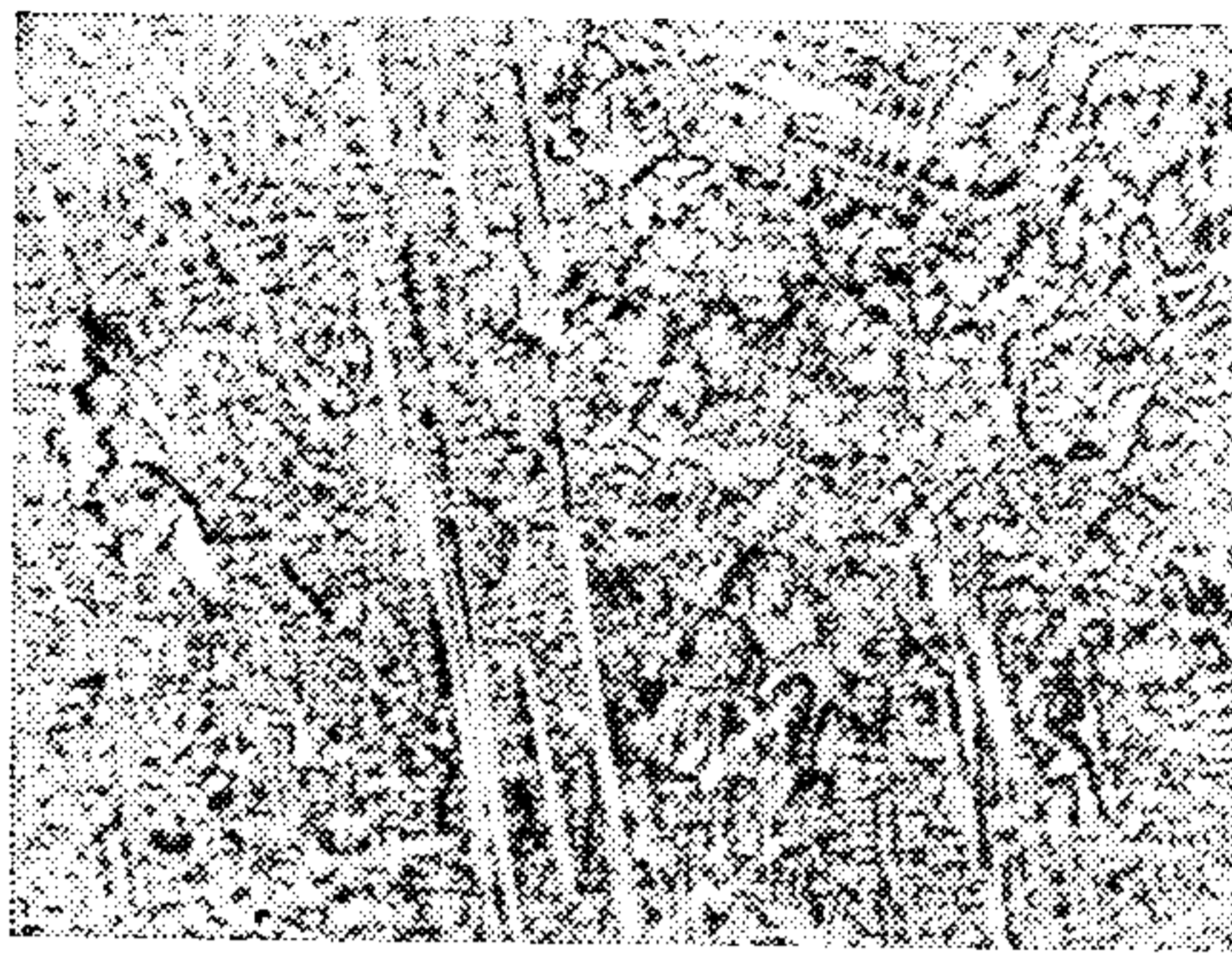


Рис. 4. Мартенситная микроструктура металла, наплавленного электродами DF2B ($\times 100 \times 3/5$)

шается. К этой группе наплавочных материалов с мартенситным упрочнением относятся сплавы, выполняемые наплавкой покрытыми электродами DF2B, DF3A, DF3B. Микроструктура металла, наплавленная этими электродами, показана на рис. 4.

Твердость наплавленного металла (рис. 5) снижается при повышении температуры его разогрева в процессе наплавки и снижении скорости охлаждения после наплавки. На рис. 6 показано соотношение между температурой отпуска и твердостью такого наплавленного металла. Низколегированные мартенситные материалы обычно не склонны к вторичному твердению и существенно снижают свою твердость при отпуске. Аналогичный эффект обнаруживается при многослойной наплавке.

На рис. 7 показаны кривые распределения твердости металла по толщине наплавленного покрытия, выполненного в несколько слоев. Вследствие образования мартенситной структуры твердость

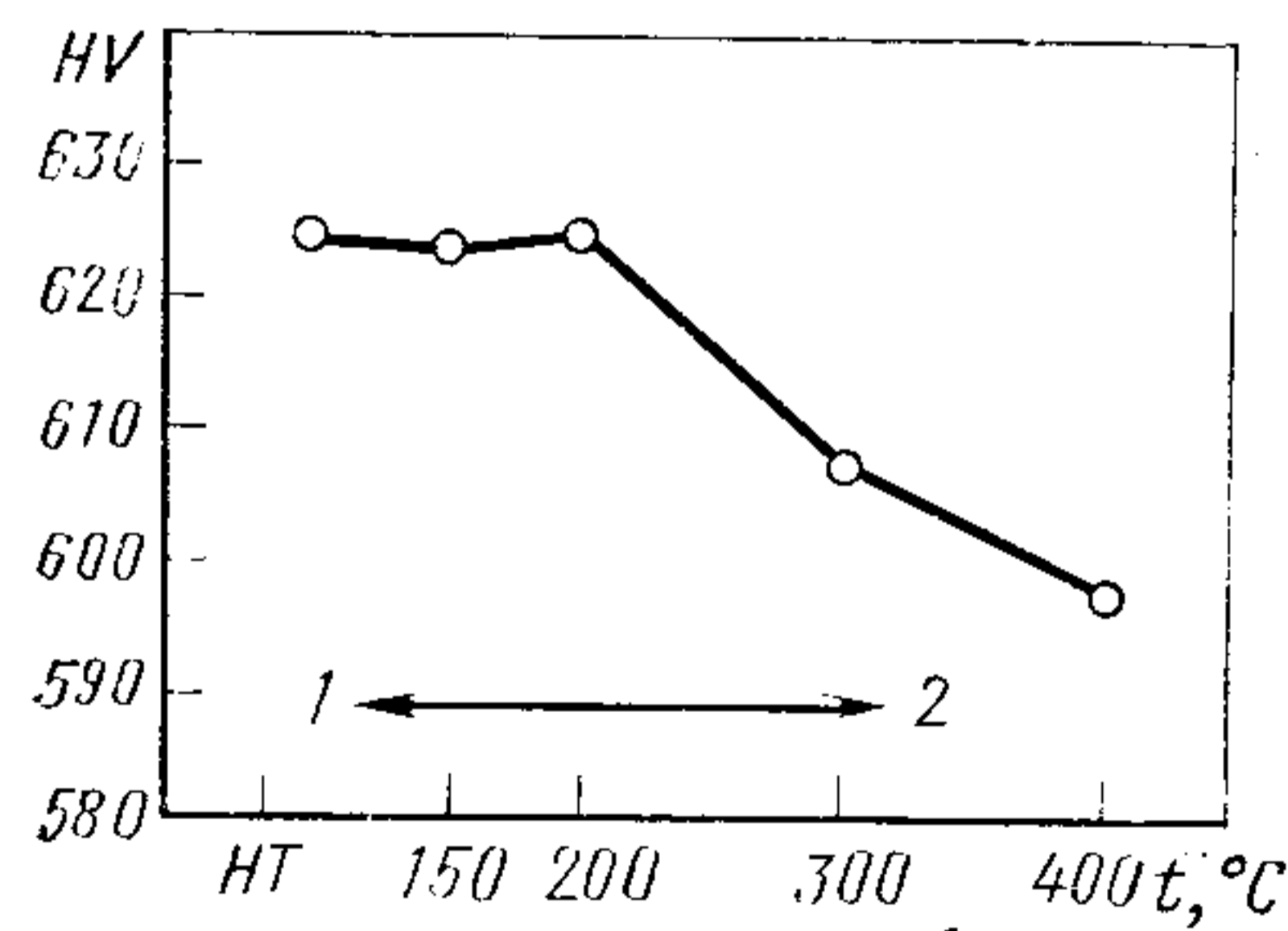


Рис. 5. Изменение твердости металла, наплавленного электродами DF2B, в зависимости от температуры его разогрева при наплавке:

HT — нормальная температура; 1 — высокая и 2 — низкая скорости охлаждения наплавленного металла. Состав наплавленного металла: 0,25% C; 1,38% Si; 0,52% Mn; 2,86% Cr; 0,46% Mo

гированные мартенситные, боросодержащие мартенситные, аустенитно-мартенситные и хромистые, содержащие 13% Cr.

1. Низколегированные мартенситные материалы отличаются сравнительно малым содержанием легирующих элементов, требуемый уровень их свойств достигается в основном путем введения углерода и хрома. Наплавленный металл с относительно низкой твердостью содержит в своей структуре мартенсит, бейнит и сорбит; по мере увеличения доли мартенсита твердость его повы-

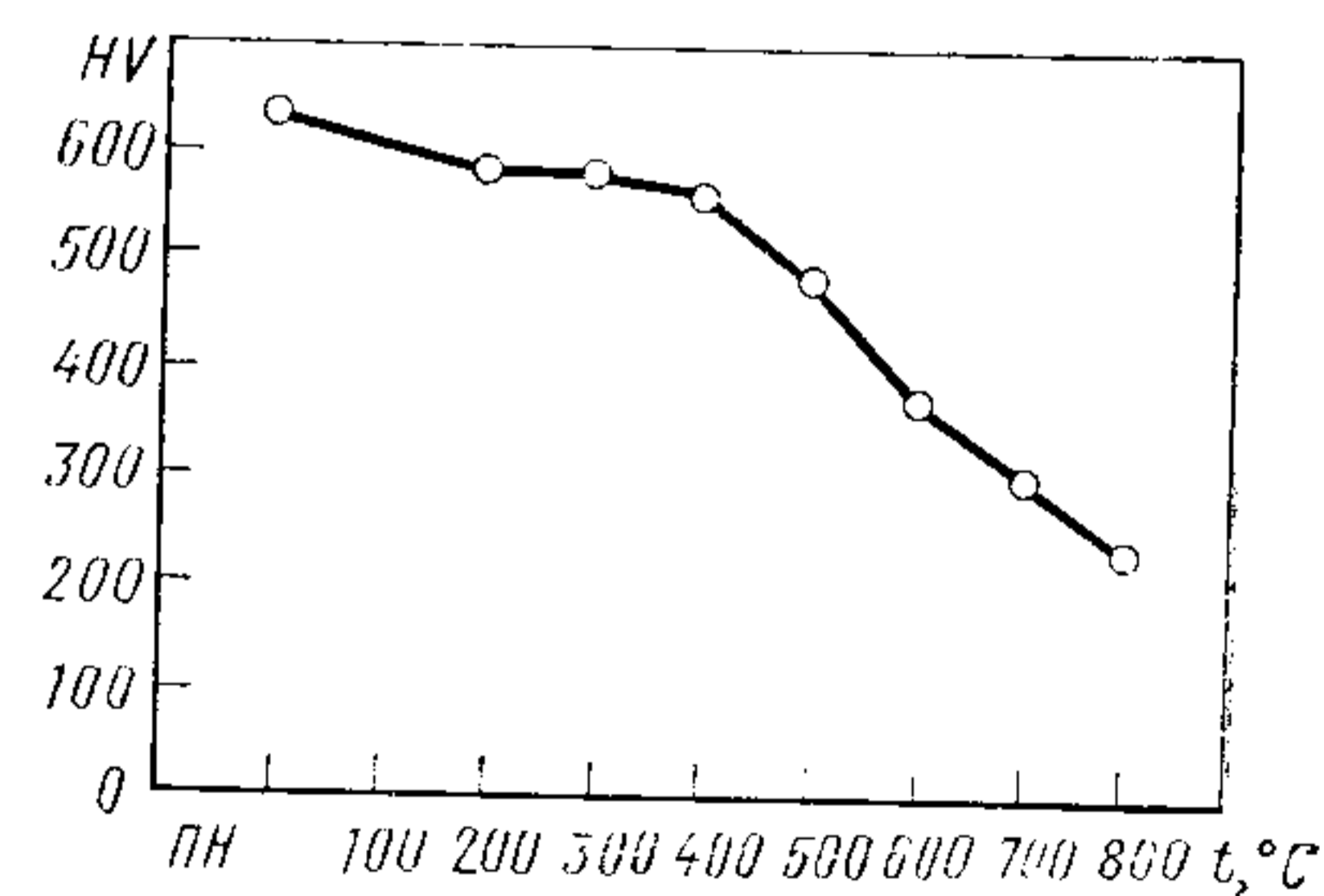
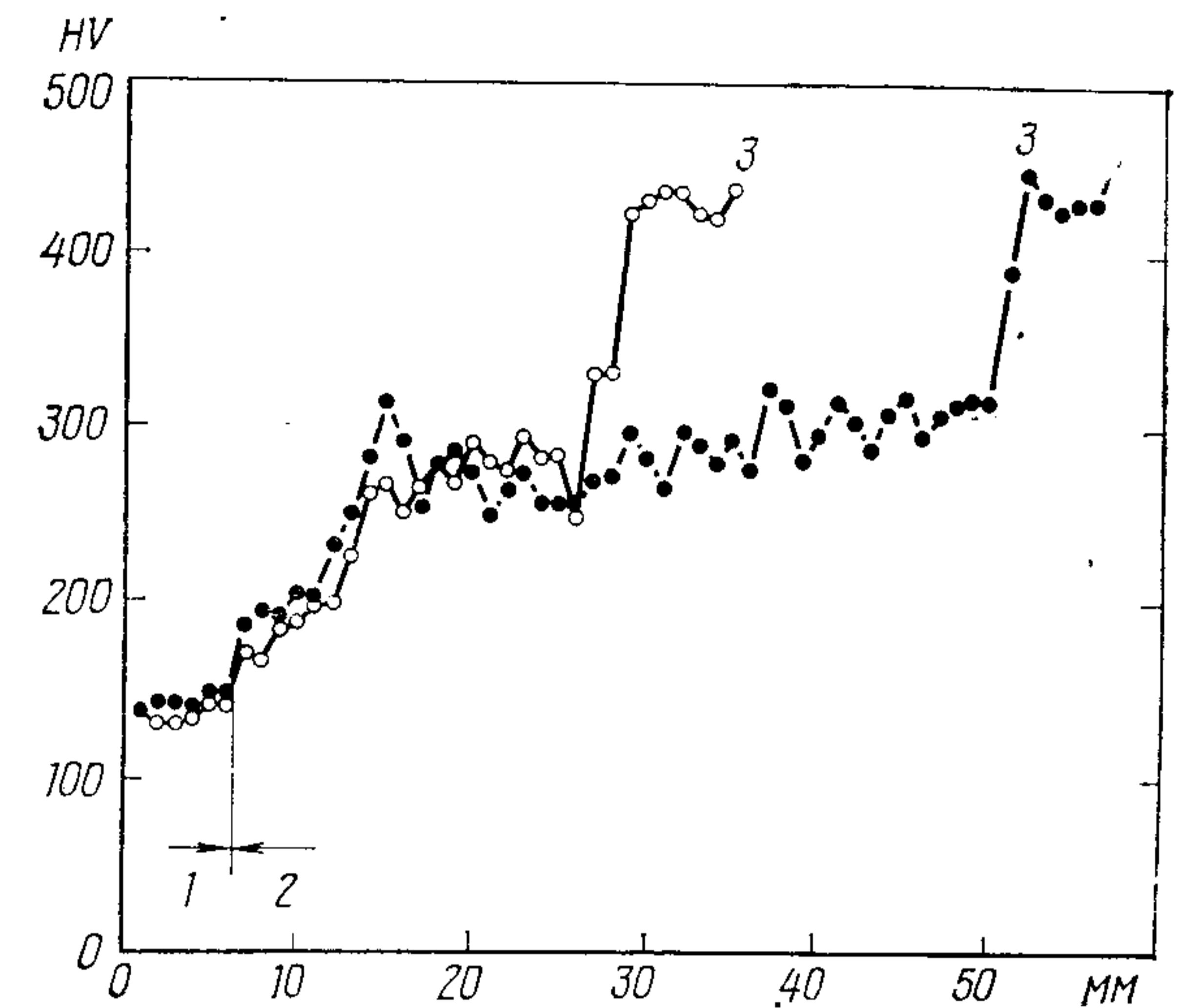


Рис. 6. Влияние температуры отпуска на твердость металла, наплавленного электродами DF3B; ПН — после наплавки. Состав наплавленного металла:

0,35% C; 1,47% Si; 0,53% Mn; 4,13% Cr; 0,51% Mo

Рис. 7. Кривые распределения твердости металла по толщине многослойного наплавленного покрытия (наплавка под флюсом):

1 — основной металл; 2 — наплавленный металл; 3 — верхний слой. Состав наплавленного металла: 0,22% C; 0,88% Si; 1,94% Mn; 1,76% Cr



наплавленного металла вблизи поверхности может достигать высоких значений, однако по мере приближения к основному металлу она снижается из-за отпуска, вызываемого термическим воздействием процесса многослойной наплавки. Снижение твердости выявляется с особой отчетливостью при дуговой наплавке под флюсом и других способах, отличающихся большой погонной энергией. Если наплавочный материал, кроме хрома, содержит молибден, ванадий, вольфрам и другие карбидообразующие элементы, то вследствие образования двойных карбидов происходит вторичное твердение наплавленного металла. Наплавленный металл, полученный с помощью материала, содержащего 3% Cr, 2—4% Mo и 1,5% V, исследован на предмет изучения твердости после отпуска (табл. 3.3). Результаты показали, что при температуре $\sim 500^\circ\text{C}$ происходит вторичное твердение металла (рис. 8). Явление вторичного твердения используют в технологических процессах изготовления инструментов для горячего деформирования металла и прокатных валков.

Наплавленный металл с относительно низкой твердостью отличается малой чувствительностью к образованию трещин, но по ме-

3.3. Состав основного и наплавленного металлов, %

Марка наплавленного материала	Состав, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni
UA-6	1,4	0,64	1,81	0,045	0,017	0,88	0,31	—	—
UA-70A	0,24	0,81	1,98	0,02	0,023	3,18	2,24	1,45	2,2
UA-70B	0,31	0,59	1,86	0,019	0,032	2,91	4	1,36	—
Основной металл	0,48	0,39	0,82	0,015	0,026	0,51	0,31	—	0,49

ре повышения доли мартенсита в структуре увеличивается хрупкость металла и снижается его трещиностойчивость, поэтому при наплавке средне- и высокоуглеродистых сталей необходимо принимать меры для предотвращения образования трещин, включая нанесение подслоя из металла с более высокой вязкостью, повышение температуры разогрева металла наплавки путем предварительного подогрева и др.

Рассматриваемые наплавочные материалы, обладающие относительно низкой твердостью и повышенной вязкостью, могут быть предназначены для деталей, работающих в условиях трения поверхностей под высокой нагрузкой и динамического изнашивания (трения с ударно-динамической нагрузкой). Увеличение доли мартенсита в структуре наплавленного металла сопровождается повышением его стойкости к абразивному изнашиванию.

2. Боросодержащие мартенситные материалы при наплавке обеспечивают получение покрытий высокой твердости (HV 700—900). Структура этого металла (рис. 9) содержит высокоуглеродистый мартенсит, твердые карбиды и бориды по границам кристаллического зерна. Такой наплавленный металл обладает высокой стойкостью к абразивному изнашиванию и задиранию в условиях низких нагрузок, однако из-за хрупкости и высокой чувствительности к образованию трещин он не может работать в условиях динамических нагрузок. К числу боросодержащих мартенситных материалов относятся покрытые электроды DF3C, в состав которых входит бор. При наплавке этими электродами достигают высокой стойкости к абразивному изнашиванию, однако за счет повышения чувствительности к образованию трещин. Для устранения этого недостатка необходимы особые меры: наплавка подслоя металлом высокой вязкости, повышение температуры подогрева и применение многослойной наплавки (не менее трех слоев).

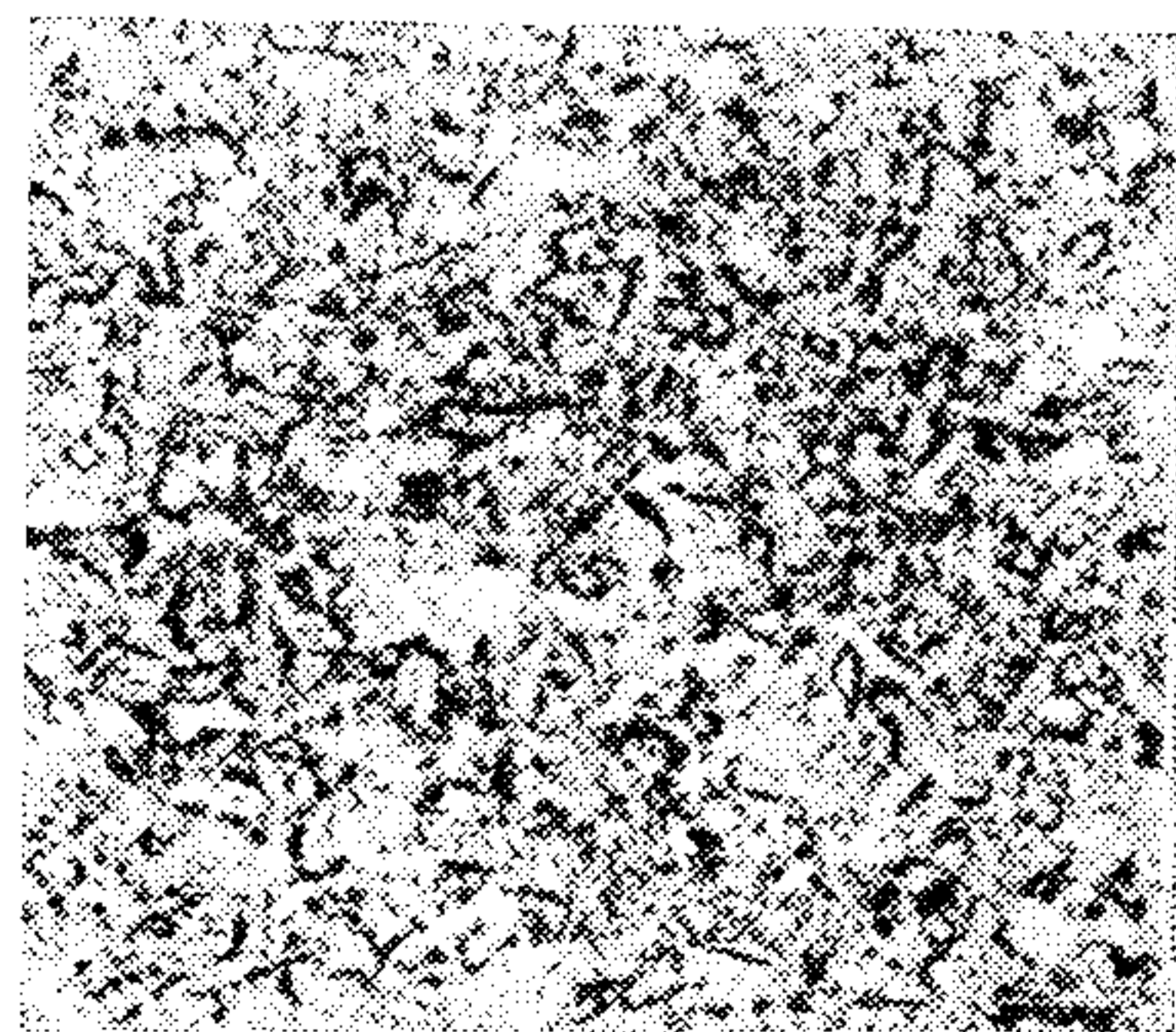


Рис. 9. Микроструктура металла, наплавленного электродами DF3C ($\times 100 \times 3/5$)

На участках действия динамической нагрузки наплавку боросодержащим мартенситным материалом следует исключать из-за опасности отрыва наплавленного металла от основного.

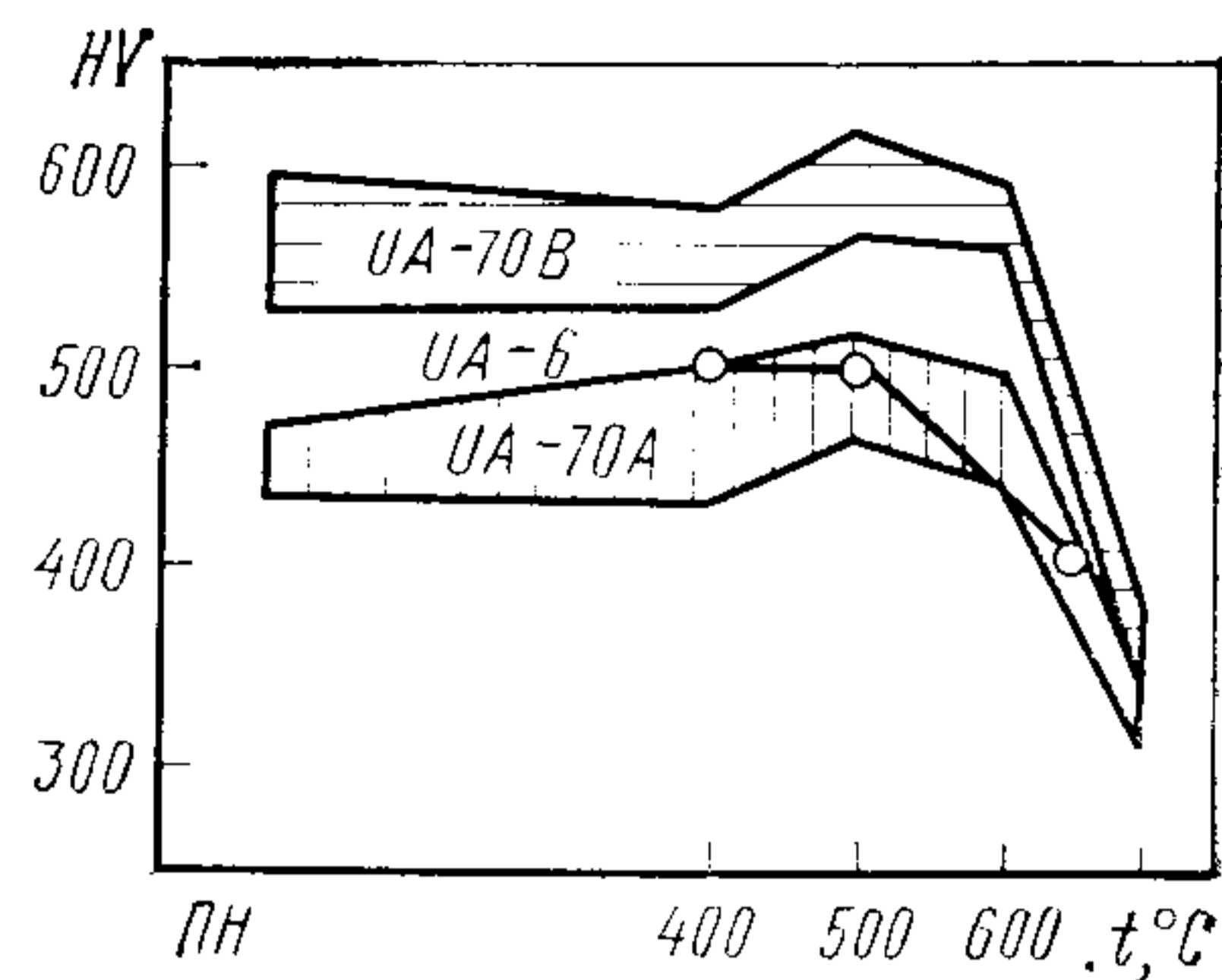


Рис. 8. Влияние температуры отпуска на твердость металла, наплавленного электродами UA-70A, UA-6 и UA-70B; ПН — после наплавки

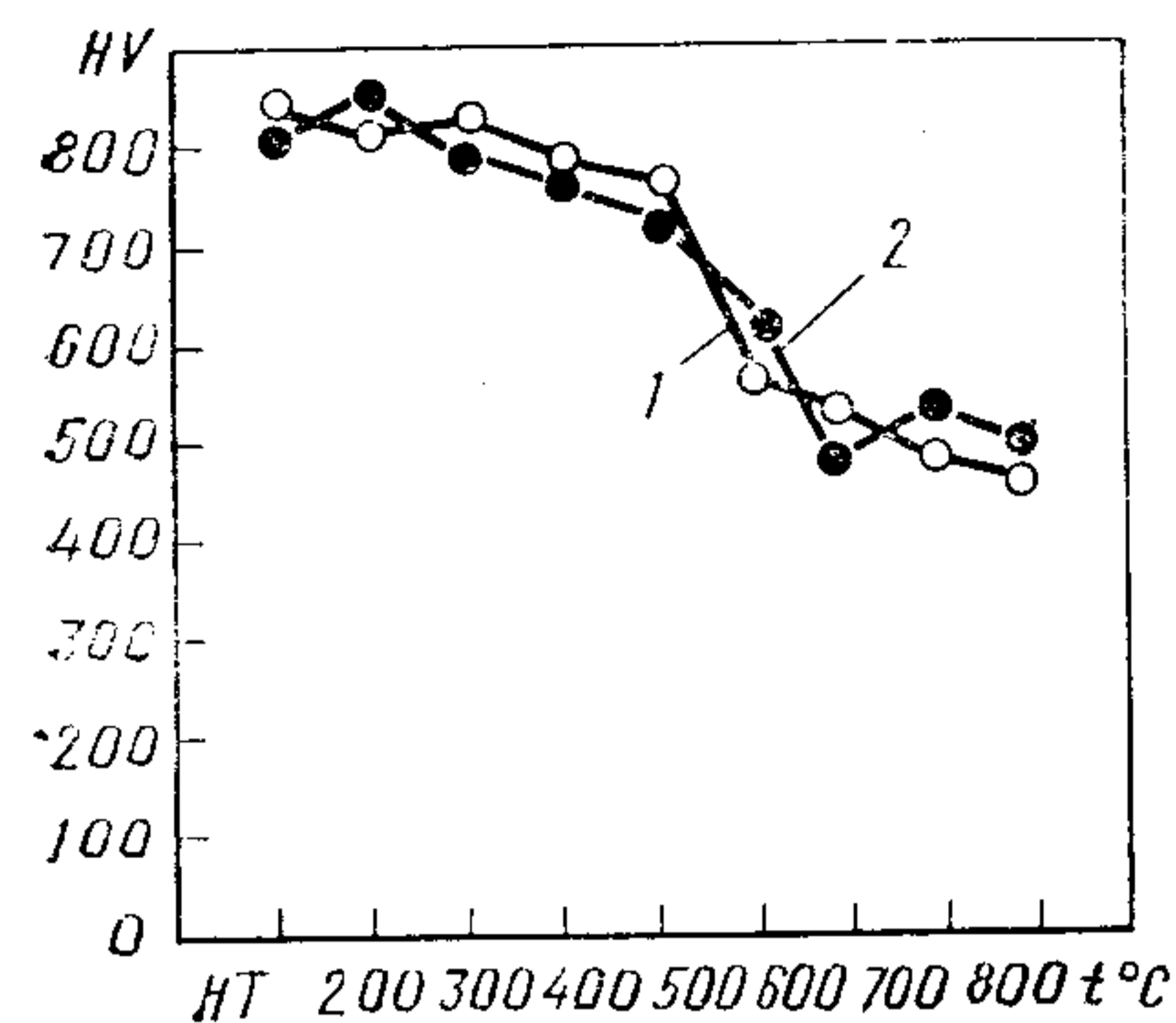


Рис. 10. Влияние температуры отпуска на твердость металла, наплавленного электродами DF3C:

1 — охлаждение в печи; 2 — охлаждение на воздухе; HT — нормальная температура. Состав наплавленного металла: 0,9% C; 0,95% Si; 0,75% Mn; 8,25% Cr; 0,52% Mo; 0,27% B

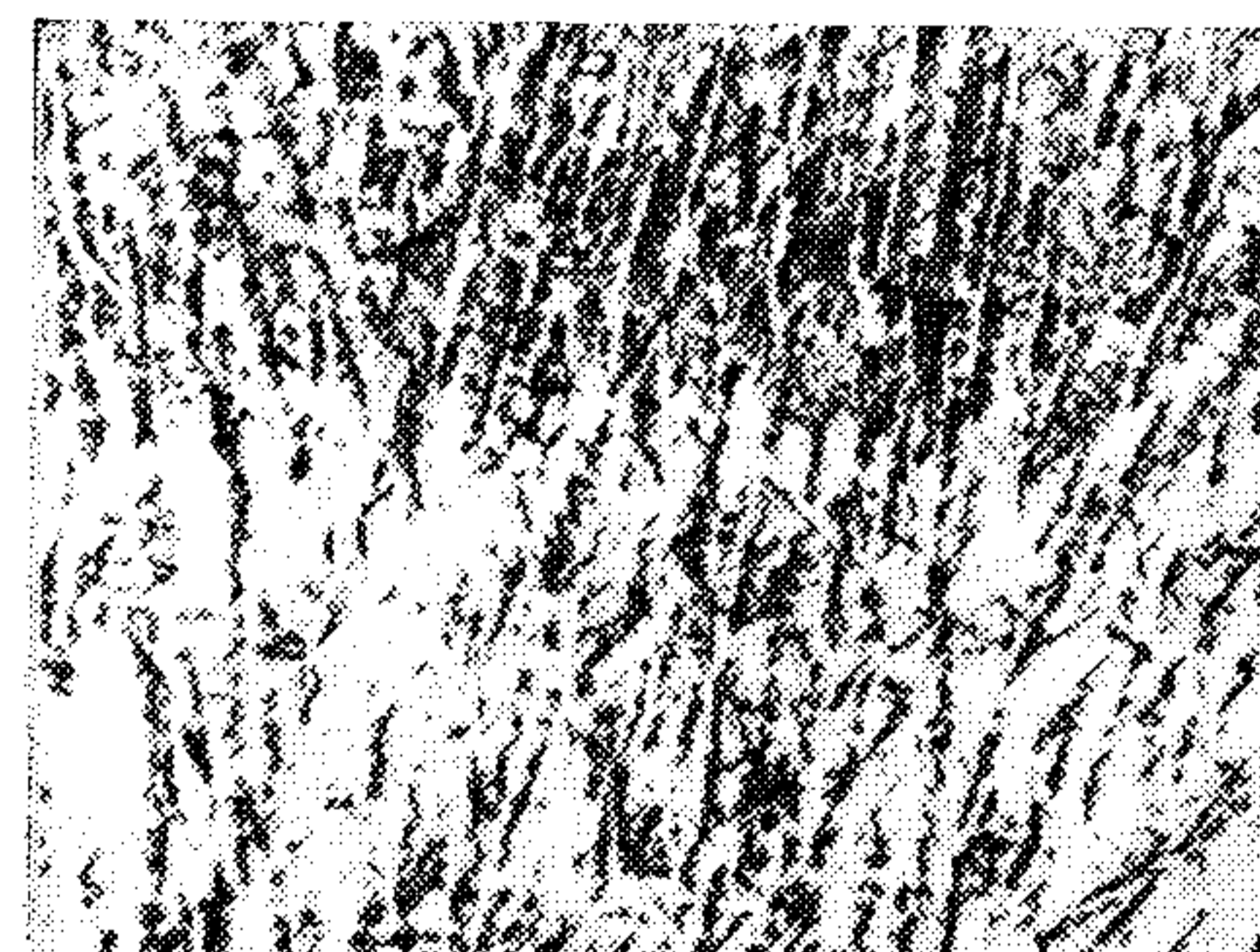
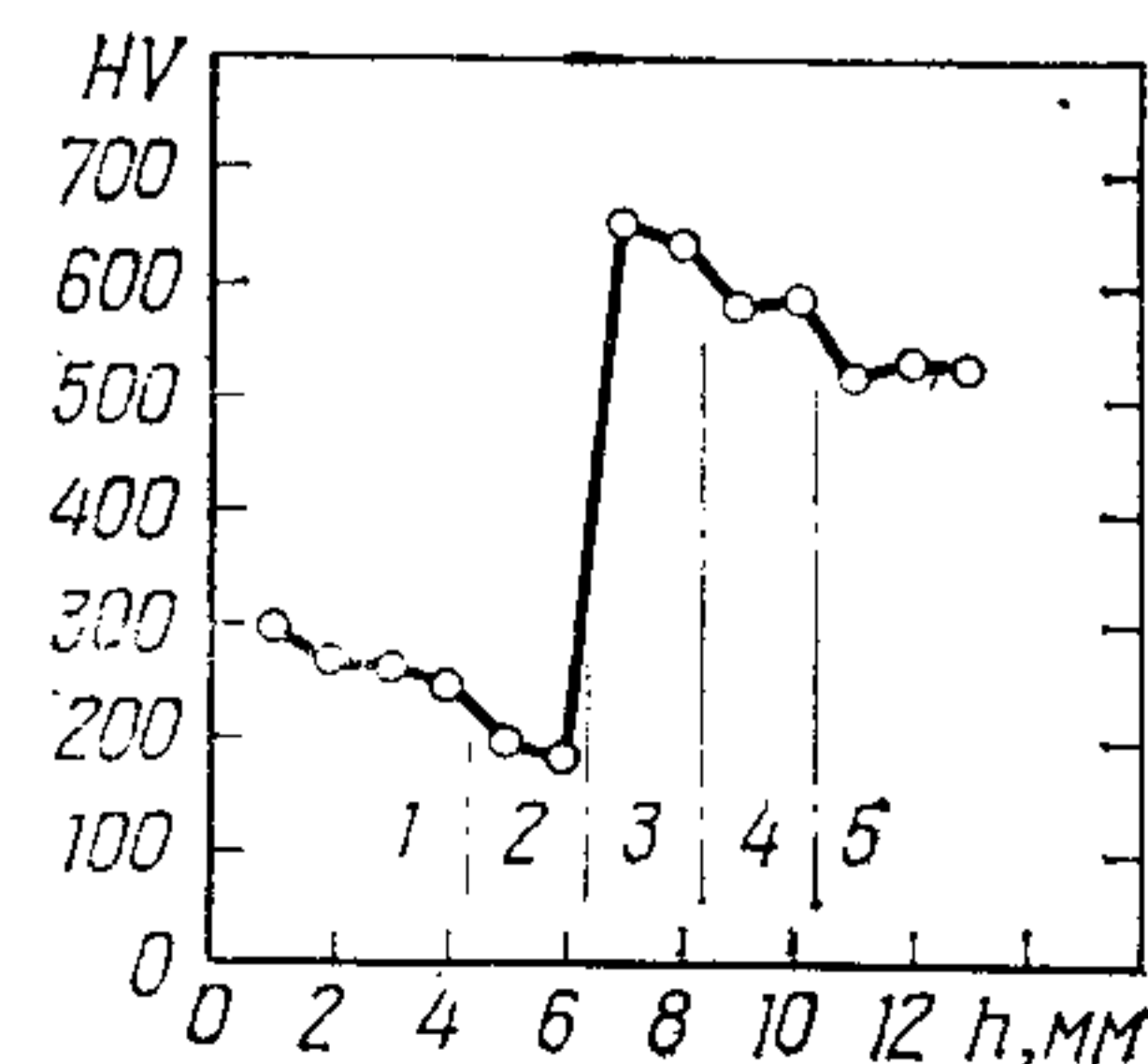


Рис. 11. Мартенситная структура металла, наплавленного электродами DF3C ($\times 100 \times 3/5$)

первого слоя из-за повышения содержания в них остаточного аустенита в связи с уменьшением степени разбавления их металлом подслоя. Это явление используют для упрочнения металла однослойной наплавки, т. е. для создания твердого слоя наплавленного

Рис. 12. Кривая распределения твердости металла по толщине многослойного покрытия, наплавленного электродами DF3C:

1 — основной металл (SCM-4); 2 — подслоя (D4316); 3 — первый слой; 4 — второй слой; 5 — третий слой. Состав наплавленного металла: 0,74% C; 1,0% Si; 0,59% Mn; 7,1% Cr; 0,85% Mo



При высоком содержании карбидов и боридов происходит некоторое самоупрочнение наплавленного металла, твердость которого мало зависит от скорости охлаждения при наплавке. Отпуск вызывает незначительное снижение его твердости (рис. 10).

3. Аустенитно - мартенситные материалы при высоком содержании остаточного аустенита обеспечивают наплавленный металл с низкой твердостью и высокой вязкостью даже при высоком содержании легирующих элементов (рис. 11). Такая структура уступает мартенситу по стойкости к абразивному изнашиванию и эрозии, но превосходит его по противозадирной стойкости.

На рис. 12 показано изменение твердости металла по толщине трехслойного покрытия, наплавленного электродами DF3C на хромомolibденовую сталь SCM-4 через подслоя из низкоуглеродистой стали (D4316), наплавленный электродами с покрытием основного типа. Первый слой твердой наплавки под влиянием состава подслоя отличается малым содержанием остаточного аустенита и высокой твердостью. Твердость последующих (верхних) слоев уступает твердости

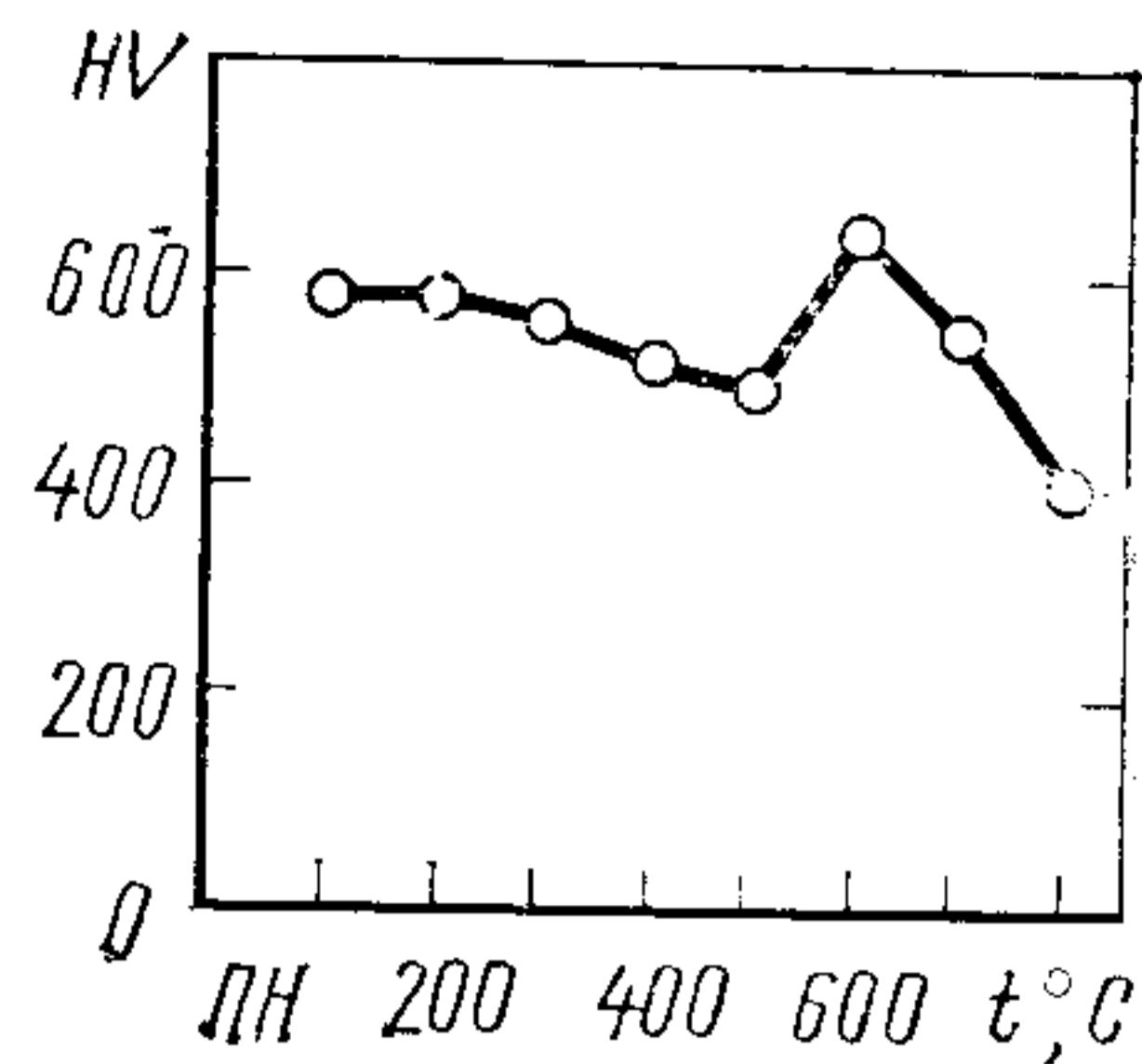


Рис. 13. Влияние температуры отпуска на твердость металла, наплавленного электродами DF3C; ПН — после наплавки. Состав наплавленного металла: 0,63% С; 0,97% Si; 1,17% Mn; 7,12% Cr; 1,1% Mo

металла с мартенситной структурой. В данном случае для предотвращения появления трещин вблизи границы с основным металлом применяют наплавку подслоя из вязкого (пластичного) металла, предварительный подогрев детали и другие меры повышения температуры нагрева наплавленного металла между проходами.

Наплавленный металл, полученный с использованием аустенитно-мартенситных материалов, испытывает вторичное твердение при температуре отпуска 500—600°С (рис. 13). Эту особенность аустенитно-мартенситных наплавочных материалов используют для упрочнения изделий, работающих при высоких температурах.

4. Хромистая сталь, содержащая 13% Cr, после наплавки имеет преимущественно мартенситную структуру, хотя при наплавке электродами DF4A с низким содержанием углерода в структуре наплавленного металла дополнительно появляется феррит, а при наплавке высокоуглеродистыми электродами DF4C — ледебурит (рис. 14).

При высоком содержании углерода наплавленный металл обладает высокой износостойкостью, поэтому высокоуглеродистые электроды DF4C широко используют для износостойкой наплавки изделий из инструментальной стали SKD-11, к которой предъявляют требование высокого сопротивления изнашиванию и деформации при высокой температуре. Низкоуглеродистые электроды обеспечивают получение при наплавке жаропрочного и коррозионно-стойкого металла, что предполагает их использование для наплавки лопастей турбин, крыльчаток смесителей, ножей для горячей резки и других изделий, к которым предъявляются требования по износостойкости в сочетании с коррозионной стойкостью или износостойкости при высоких температурах.

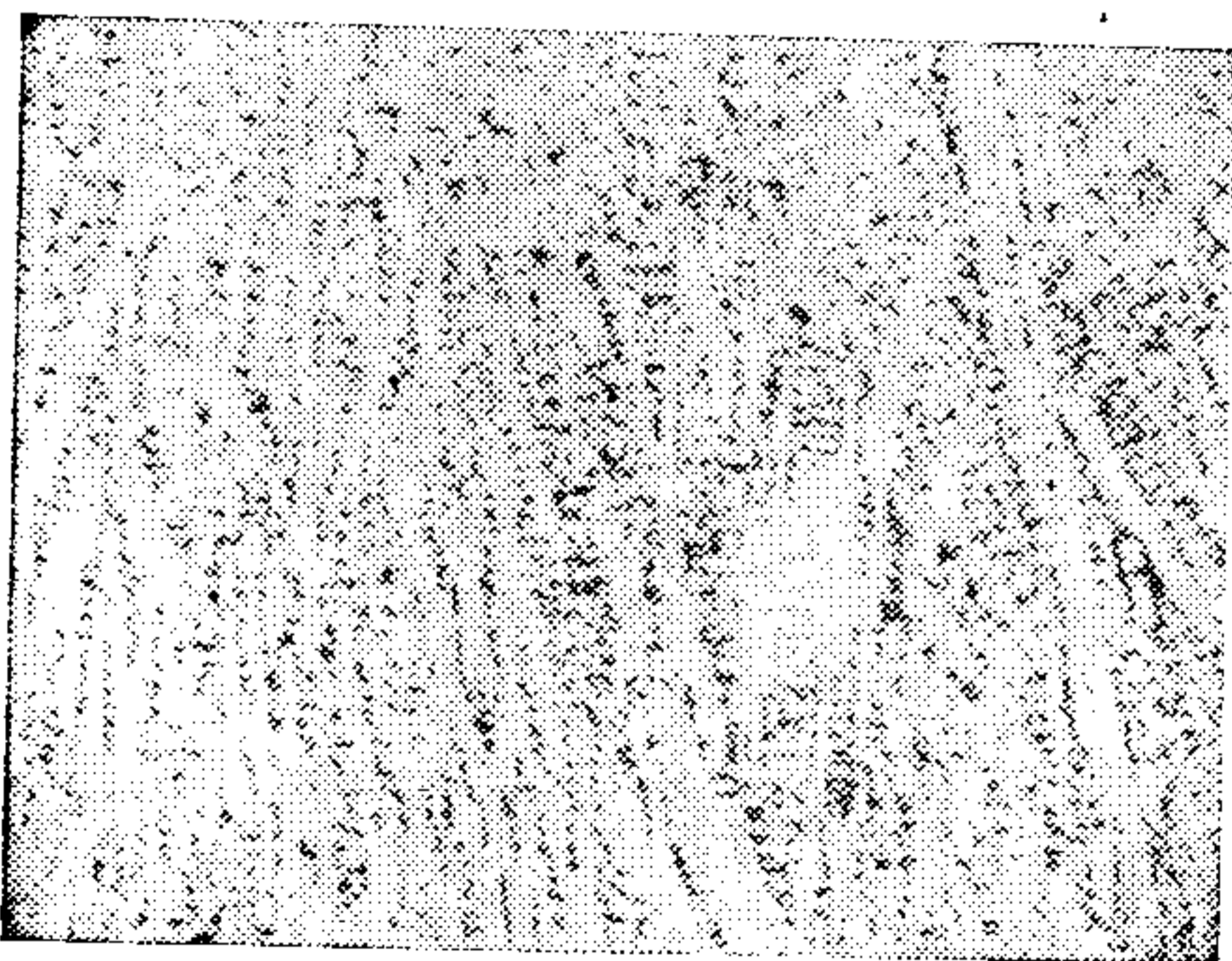


Рис. 14. Микроструктура металла, наплавленного электродами DF4C (×100×3/5)

При наплавке покрытыми электродами DF4B, для наплавленного металла которых характерна малая доля ледебурита или феррита в структуре, в связи с малой погонной энергией процес-

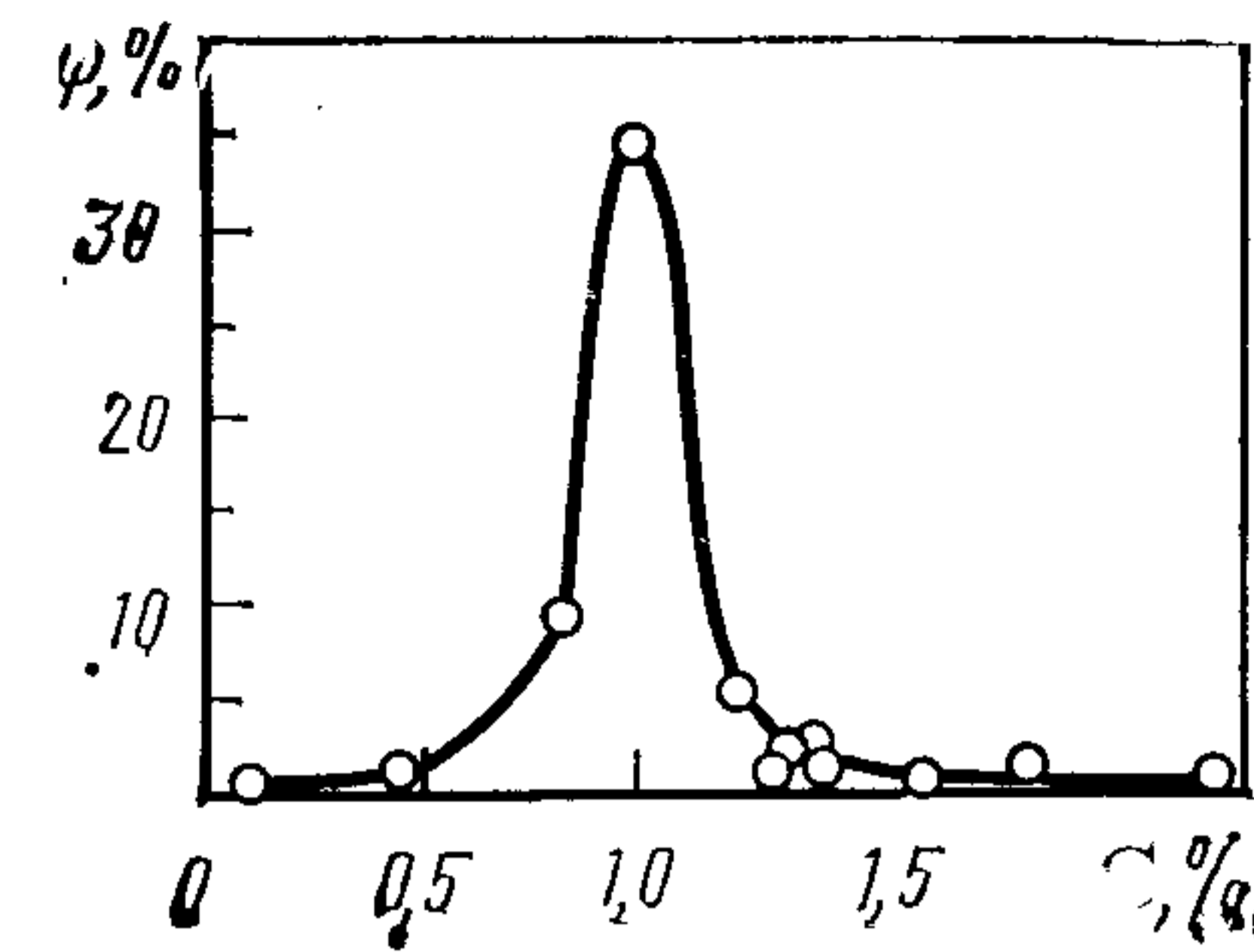


Рис. 15. Влияние содержания углерода на степень образования трещин (ψ) в наплавленном металле (9,1% Cr) при высокой температуре

са наплавки и высокой скоростью охлаждения наплавленного металла появляется опасность возникновения трещин (рис. 15) [3]. Этот недостаток наплавки покрытыми электродами в сочетании с трудностью выполнения самой наплавки исключает ее широкое применение.

В связи с этим наплавку хромистой стали чаще осуществляют с использованием ленточных электродов, допускающих наплавку при большой погонной энергии.

Высокомарганцовистые аустенитные материалы. К этой группе относятся следующие наплавочные материалы.

1. Высокомарганцовистые аустенитные материалы, к которым принадлежит так называемая сталь Гатфильда с содержанием 1,2% С и 13% Mn. Эти стали обычно наплавляют на детали, работающие в условиях интенсивной ударно-динамической нагрузки, поскольку такой наплавленный слой придает деталям высокую стойкость к динамическому изнашиванию.

Сталь Гатфильда стандартного состава не обладает высокими сварочными свойствами, поэтому для наплавки в большинстве случаев используют сталь с невысоким содержанием углерода, легированную никелем, хромом, молибденом и другими элементами. Японским промышленным стандартом утверждены электроды DFMB, DFMC и DFMD, в состав которых соответственно введено небольшое количество никеля, хрома и молибдена. Металл, наплавленный электродами DFMB, обладая высокой пластичностью, уступает наплавленному металлу, выполненному электродами DFMC и DFMD по уровню прочности. Последний отличается высокой твердостью, однако имеет пониженную пластичность.

Закалка стали такого состава от температуры выше 1000°С с

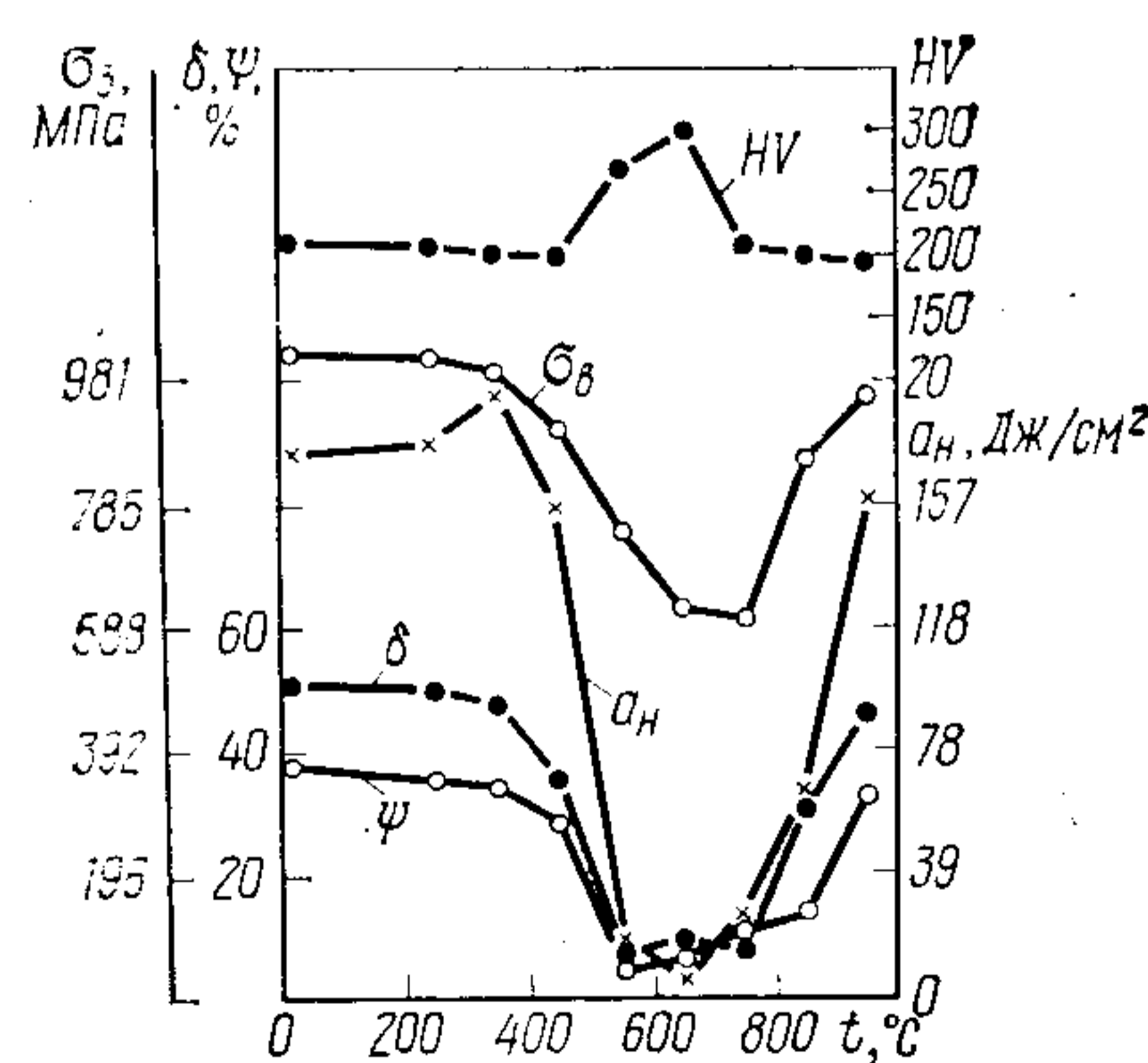


Рис. 16. Влияние температуры подогрева на механические свойства высокомарганцовистой (13%) стали, предварительно подвергнутой специальной термообработке для повышения вязкости

охлаждением в воде обеспечивает образование полностью аустенитной структуры металла с повышением его вязкости и пластичности. Вместе с тем выдержка стали с такой структурой при температуре выше 300—400°C сопровождается образованием по границам зерна карбидов и вторичной фазы типа перлита, что приводит, как видно на рис. 16, к снижению пластичности металла [4]. Поскольку тенденция к образованию вторичных фаз снижается при уменьшении содержания углерода, для наплавки часто используют сталь не стандартного состава, а с пониженным содержанием углерода. Процесс наплавки сопровождается многократным нагревом наплавленного металла, создающим опасность его охрупчивания, для ограничения которого следует повышать температуру разогрева.

При использовании рассматриваемых электродов для наплавки низкоуглеродистой и низколегированной стали следует иметь в виду, что влияние состава основного металла на наплавленный приводит к возникновению мартенсита в зоне их сплавления и повышению твердости, а разность коэффициентов линейного расширения для основного и наплавленного металлов создает опасность растрескивания и отрыва наплавленного слоя от подложки при быстром охлаждении после наплавки. В таких случаях во избежание растрескивания в качестве наплавочного материала следует использовать аустенитную коррозионно-стойкую сталь (D-309) либо рассматриваемый ниже материал, содержащий 16% Mn, 16% Cr и 1% Ni. Этими материалами наплавляют подслои, а на него наносят слой твердого металла в условиях всемерного снижения температуры разогрева наплаваемого металла между проходами и применения проковки (нагартовки) валиков в раскаленном состоянии.

На рис. 17 представлены данные испытаний образцов напла-

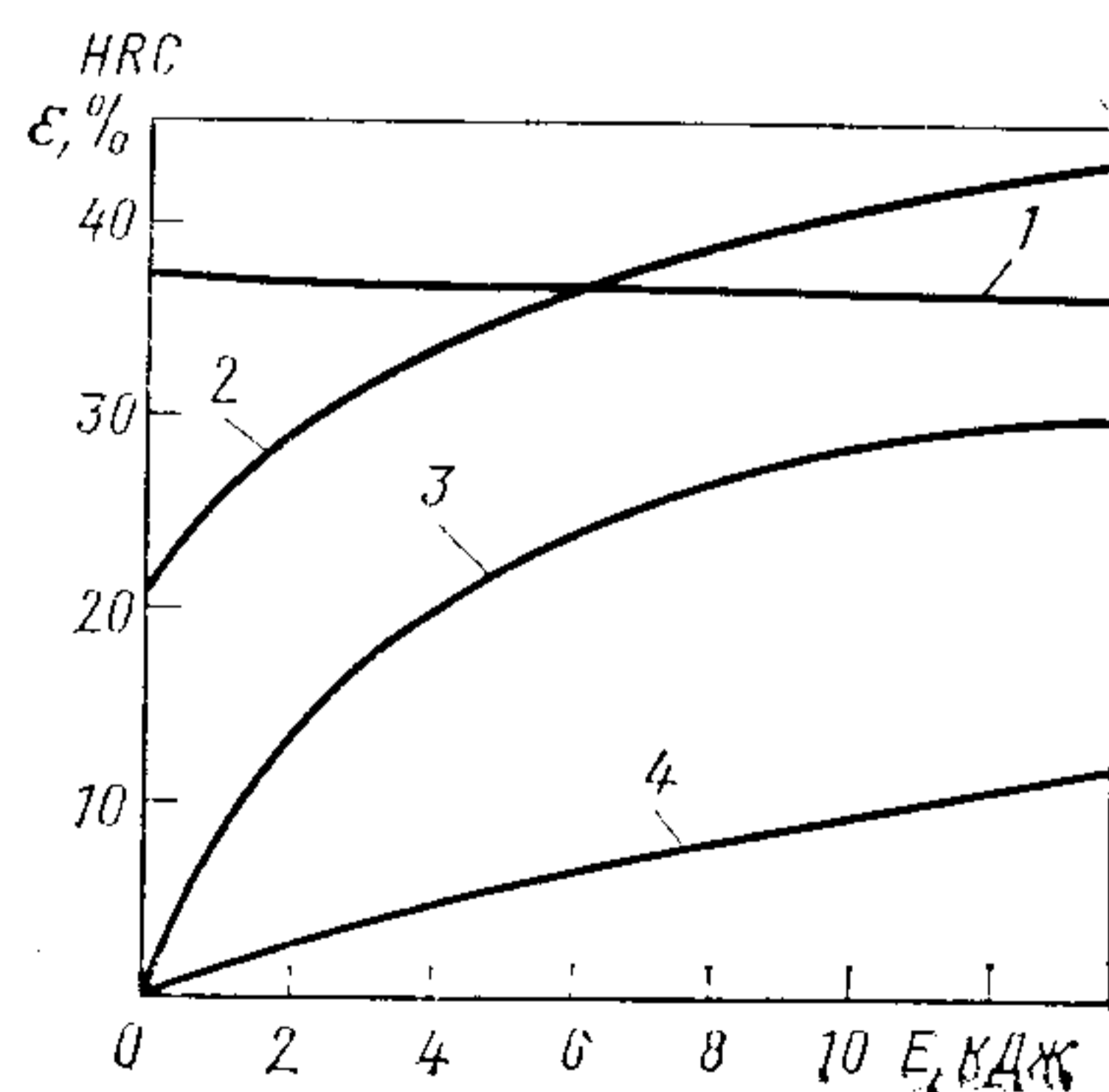


Рис. 17. Влияние энергии многократного ударного воздействия E на общую степень деформации ϵ по толщине слоя и поверхностную твердость HRC металла, наплавленного высокомарганцевистым аустенитным материалом А, по сравнению с углеродистой низколегированной сталью В, закаляющейся на воздухе (материал А подвергали закалке в воде от 1010°C, а материал В после выдержки при 1010°C охлаждали на воздухе, вновь нагревали до 650°C и охлаждали на воздухе):

1 — твердость HRC стали В; закаляющейся на воздухе; 2 — твердость HRC аустенитной высокомарганцевистой стали А; 3 — степень деформации ϵ аустенитной высокомарганцевистой стали А; 4 — степень деформации ϵ стали В, закаляющейся на воздухе. Состав наплавленного металла, %:

Сталь	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
А	1,17	0,46	12,8	—	—	—
В	0,74	0,3	0,88	0,75	1,4	0,3

ленного высокомарганцевистого аустенитного металла на склонность к механическому деформационному упрочнению в сопоставлении с данными, полученными при соответствующих испытаниях образцов стали, закаляющейся на воздухе. Значительное преимущество этого наплавочного материала, связанное с его сильным механическим упрочнением (наклепом) под действием ударной нагрузки [5], с успехом используют при упрочнении деталей, работающих в условиях изнашивания под динамической нагрузкой.

2. Высокомарганцевистые хромистые аустенитные материалы, к которым принадлежит стандартная аустенитная сталь, содержащая 0,3% С, 16% Mn, 16% Cr и 1% Ni. Впервые эту сталь использовали как заменитель хромоникелевой коррозионно-стойкой стали, в составе которой из экономических соображений никель заменили марганцем. В настоящее время указанная сталь получила широкое распространение. В Японском промышленном стандарте эта сталь определена как наплавочный материал DFME. На рынках сбыта имеется ряд наплавочных материалов данной группы с содержанием 2—3% Ni.

При использовании высокомарганцевистых хромистых аустенитных материалов мартенситная структура наплавленного металла образуется даже при наплавке на низкоуглеродистую и низколегированную стали. Наплавочные материалы этой группы с низким содержанием углерода широко используют при сварке рельсов, а также для наплавки подслоя на детали из высокомарганцевистой стали. В состоянии после наплавки твердость металла составляет HV 150—350, а способность к сохранению твердости при высокой температуре предполагает применение наплавочных материалов рассматриваемой группы для износостойкой наплавки деталей металлургического оборудования, в частности ножниц для горячей резки, работающих при ударной нагрузке в условиях высокой температуры, а также рабочих органов дробилок различного назначения.

Высокохромистые сплавы на основе железа. Типичным наплавочным материалом этой группы является AWS-EFeCr-Al, содержащий 3—5% С и 26—32% Cr. Наплавленный металл такого состава имеет структуру, в матрице которой, состоящей из аустенита и мелкодисперсного карбида, рассеяны игольчатые частицы карбида хрома $(Cr, Fe)_7C_3$. Высокую износостойкость наплавленному металлу придает карбид хрома, обладающий высокой твердостью.

Твердость наплавленного металла, полученного с использованием высокохромистых сплавов, определяется карбидообразованием; следовательно, твердость наплавленного упрочненного слоя практически не зависит ни от температуры разогрева металла при наплавке, ни от скорости его охлаждения после наплавки. С этой же причиной связано незначительное снижение твердости наплавленного металла при отпуске (рис. 18) [6].

Материалы этой группы используют для износостойкой наплавки крыльчаток и корпусов насосов и других деталей землесосных снарядов, подвергающихся интенсивному абразивному износу твер-

дыми частицами грунта. Вместе с тем чувствительность наплавленного металла к трещинам требует осуществления наплавки при температуре предварительного подогрева деталей выше 300°C и проведения последующей термообработки непосредственно после наплавки. Для предотвращения растрескивания наплавленного металла используют и другие меры, например многослойную наплавку и наплавку подслоя из низкоуглеродистой или аустенитной коррозионно-стойкой стали (электродами с покрытием основного типа). Оптимальным способом наплавки высокохромистых сплавов на основе железа является электрошлаковая сварка, отличающаяся большой погонной энергией и низкой скоростью охлаждения металла, что создает предпосылку для предотвращения образования трещин в наплавленном слое.

Высокохромистые сплавы на основе железа с добавками ниобия, ванадия, вольфрама, молибдена и других сильных карбидообразующих элементов обеспечивают повышение твердости металла при высокой температуре в связи с его склонностью к вторичному твердению. Микроструктура такого наплавленного металла показана на рис. 19. В табл. 3.4 приведены данные по твердости входящих в его состав карбидов и матрицы. Карбиды хрома и ниобия способствуют повышению износостойкости наплавленного металла.

Карбид вольфрама. Рабочие органы машин, подвергающиеся

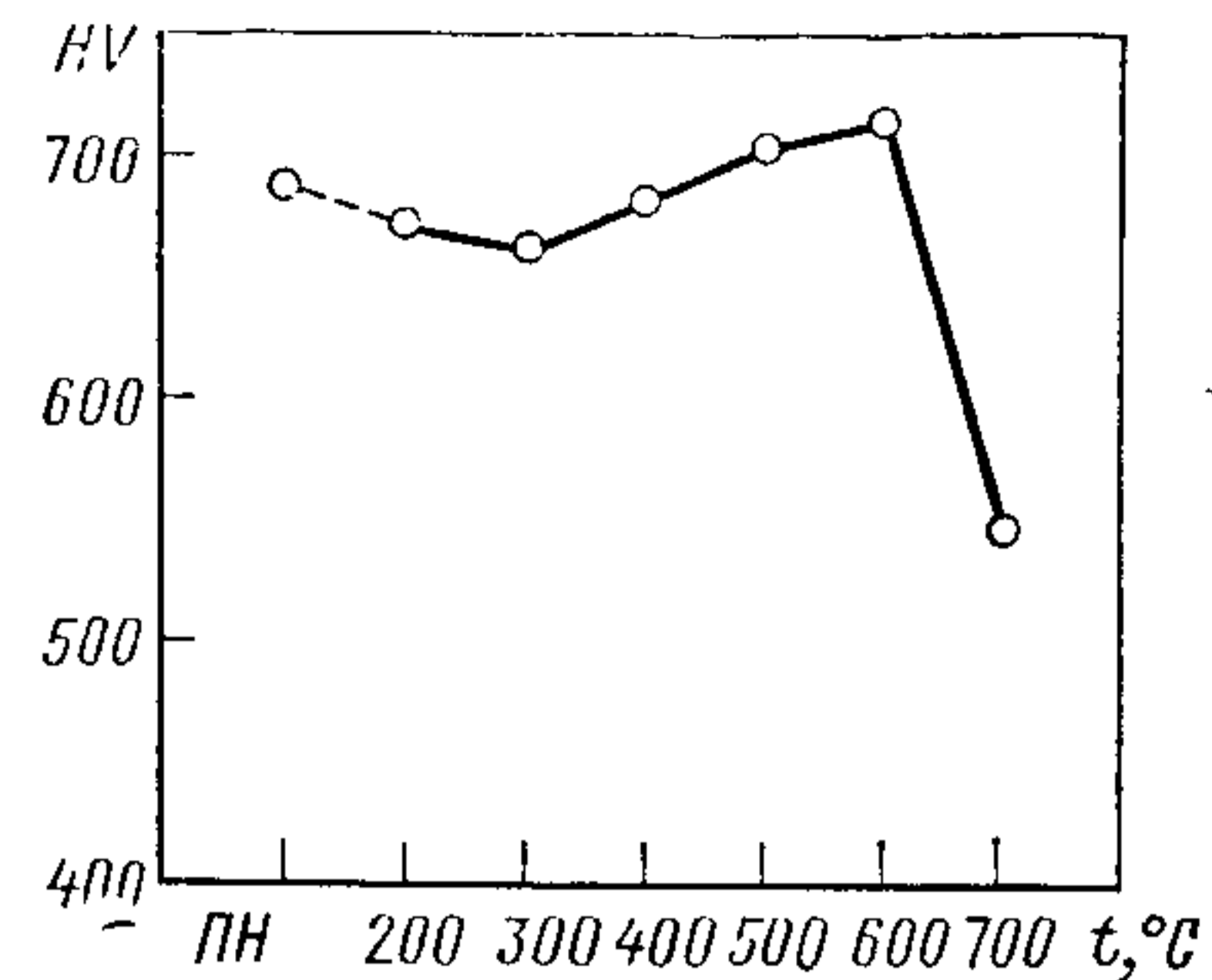


Рис. 18. Влияние температуры отпуска на твердость металла, наплавленного высокохромистым сплавом на основе железа, ПН — после наплавки. Состав наплавленного металла: 3,8% С; 1,84% Si; 1,48% Mn; 28,7% Cr; 2,84% Co



Рис. 19. Микроструктура металла, наплавленного высокохромистым Fe-C-Cr-Nb-V-W-Mo-сплавом

3.4. Микротвердость структурных составляющих высокохромистого Fe-C-Cr-Nb-V-W-Mo наплавленного сплава (наплавка под флюсом)

Структурные составляющие	Твердость HV (нагрузка 100 г)
Карбид ниобия	1735 ⁺¹¹⁹ ₋₁₀₂
Карбид хрома	1234 ⁺¹⁶⁸ ₋₁₀₂
Матрица	690 ⁺²⁷ ₋₂₅
Средняя твердость металла (нагрузка 30 кг)	989

абразивному изнашиванию при контактировании с грунтом и скальными породами, должны обладать по возможности высокой твердостью. Вместе с тем, как известно, повышение твердости сопровождается снижением пластичности (вязкости), повышением чувствительности к трещинообразованию и склонности к отколам наплавленного металла. В поисках путей преодоления этого явления разработаны новые наплавочные материалы, к числу которых относятся карбид вольфрама и рассмотренные выше высокохромистые сплавы на основе железа. Вязкая матрица с распределенными в ней чрезвычайно твердыми частицами карбида вольфрама обеспечивает рассматриваемому материалу высокую стойкость к абразивному изнашиванию.

Наплавку карбидом вольфрама прежде осуществляли способом газовой сварки, однако в настоящее время преобладает дуговая наплавка покрытыми электродами. При дуговой наплавке, когда наплавочный материал находится в высокотемпературной области горения дуги, происходит частичное разложение карбида вольфрама на углерод и вольфрам, растворение которых в матрице сопровождается образованием двойных карбидов железа и вольфрама, вызывающих снижение вязкости металла.

Карбид вольфрама как наплавочный материал состоит из эвтектики W₂C+WC. По уровню твердости, превышающей HV 2400, карбид вольфрама, как видно на рис. 20, превосходит карбиды большинства других металлов [7].

На рис. 21 показана структура карбидовольфрамового сплава (рэлита), полученного наплавкой покрытыми электродами. При дуговой наплавке путем снижения силы тока и уменьшения длины дуги следует добиваться отсутствия разложения карбида вольфрама.

Материал этого типа используют для износостойкой наплавки зубьев экскаваторов, ножей режущих приспособлений и других из-

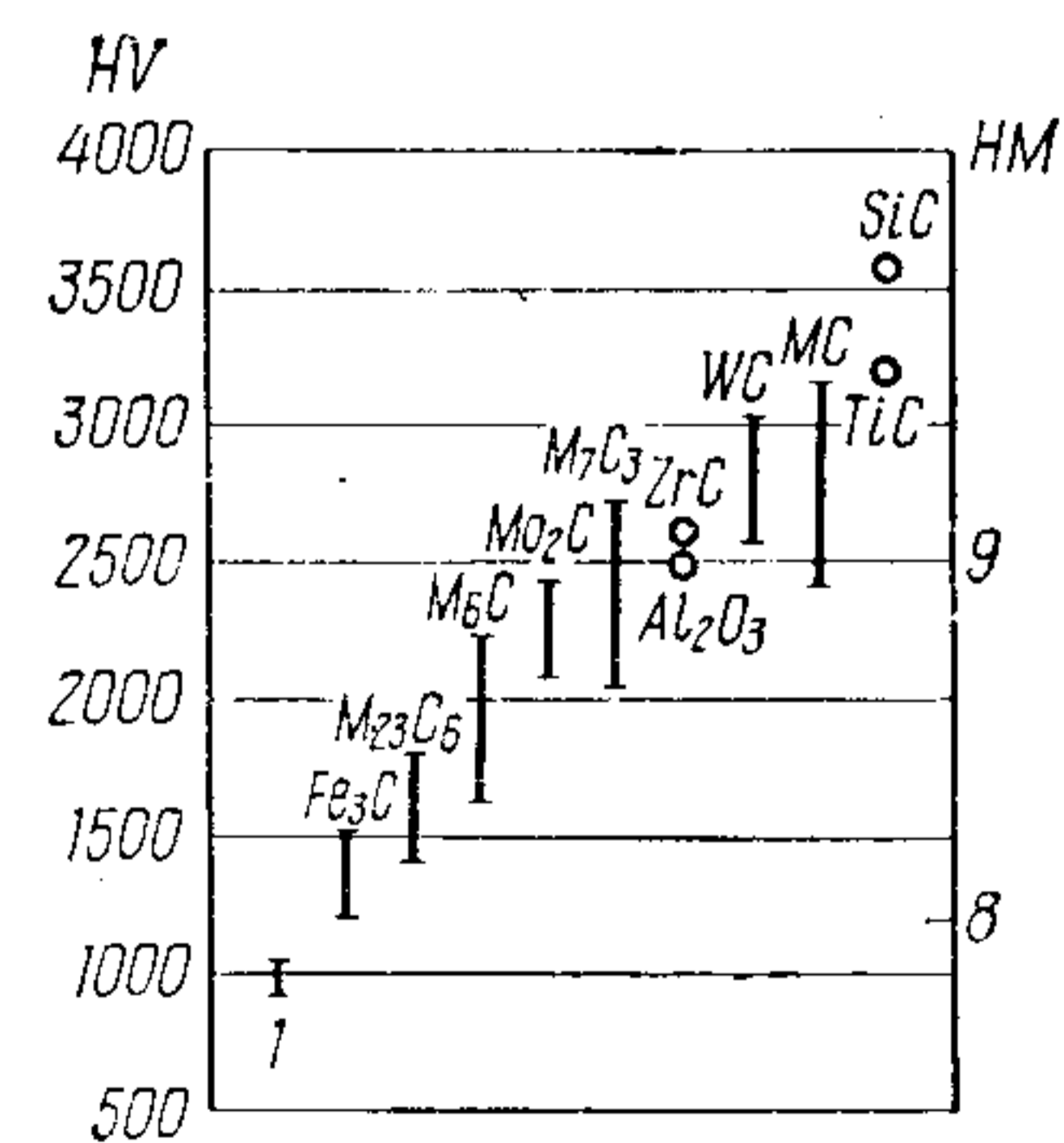


Рис. 20. Твердость карбидов в стали по Виккерсу (HV) и Моосу (НМ):

1 — твердый раствор быстрорежущей стали

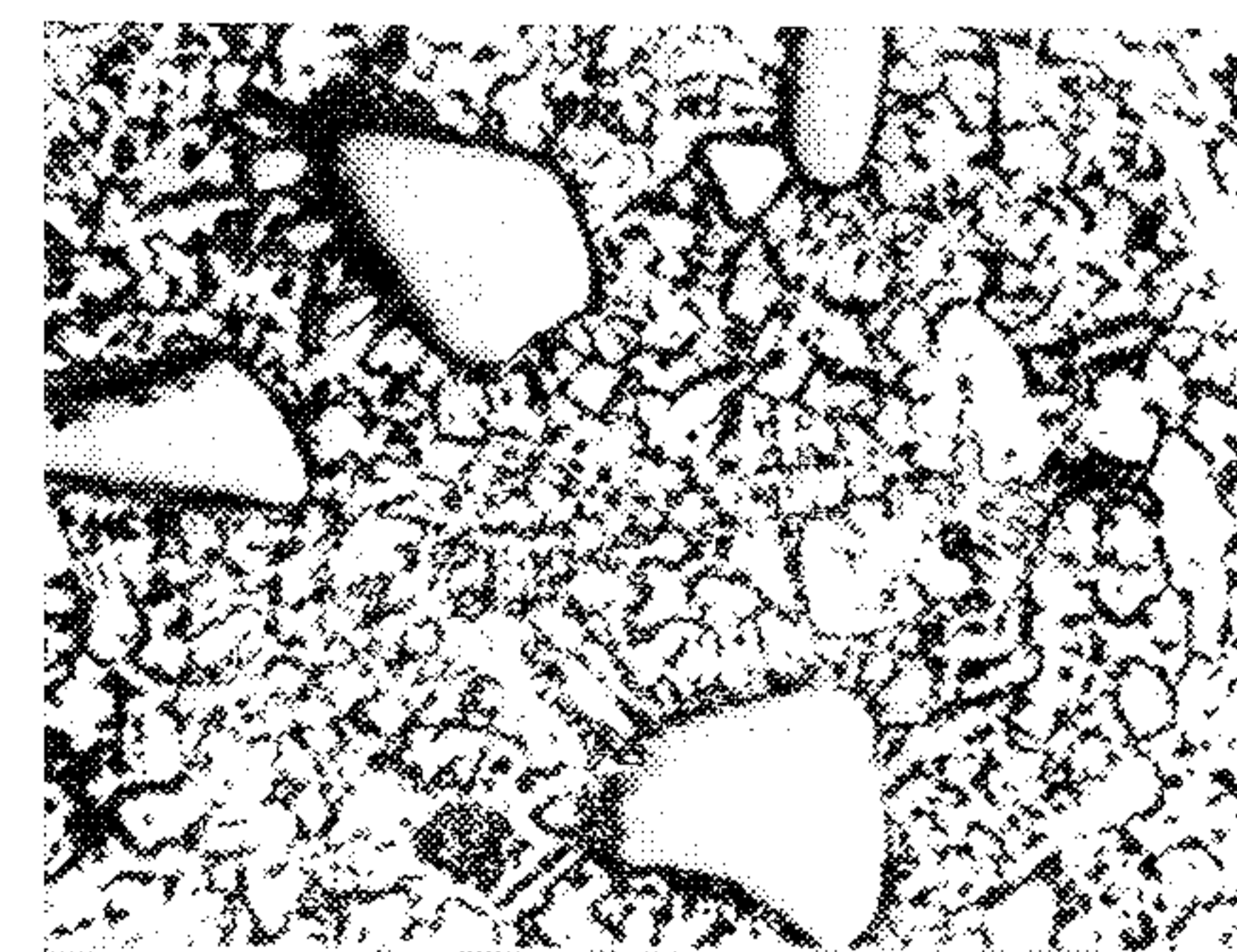


Рис. 21. Микроструктура наплавленного карбидовольфрамового сплава (×100×3/5)

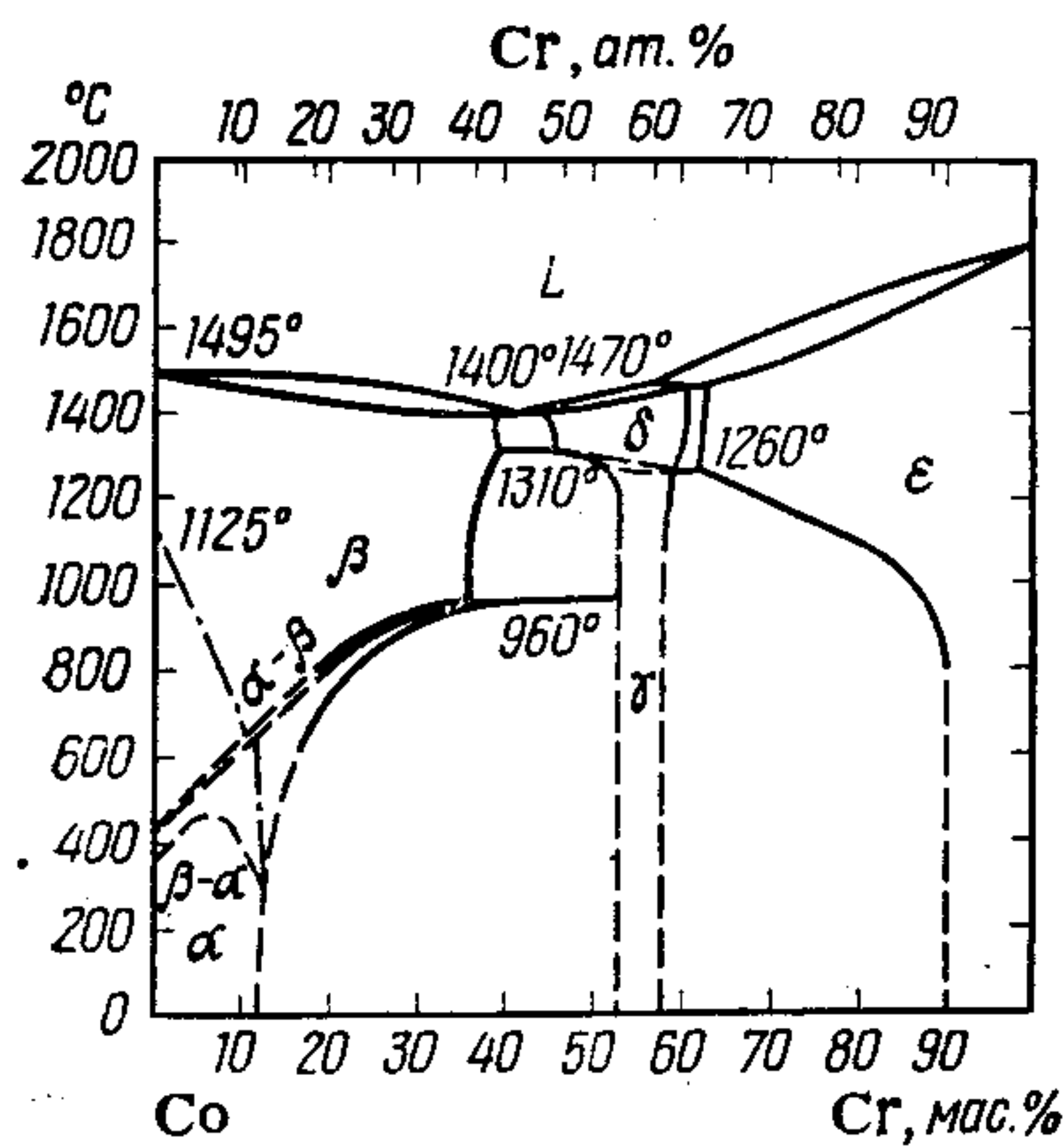


Рис. 22. Диаграмма состояния сплавов системы Co—Cr

делий, подвергающихся интенсивному абразивному действию под умеренной нагрузкой.

Стеллит. На рис. 22 показана диаграмма состояний системы Co—Cr [8]. При добавлении к кобальту 25—30% Cr получают состав, имеющий при температуре 800—900°C область структурных превращений $\alpha \rightarrow \beta$, крайне малая скорость которых открывает возможность получения сплавов, обладающих высокой стабильностью при повышенных температурах. Стеллит как сплав, основанный на использовании этой особенности системы Co—Cr, содержит 0,5—3,0% C, 40—60% Co, 25—33% Cr и 3—17% W. Кроме того, в

состав этого сплава может входить никель и молибден.

Стеллит в качестве наплавочного материала изготавливают в виде прутков для газовой наплавки, покрытых электродов и электродов для дуговой наплавки в среде инертного газа. В табл. 3.5 приведены данные по составу и твердости стеллита, наплавленного покрытыми электродами и изготовленного в виде литых наплавочных прутков.

С увеличением содержания углерода твердость стеллита повы-

3.5. Состав и твердость стеллита, наплавленного покрытыми электродами, и литых прутков того же состава

Марка материала	Состав, % (Co — остальное)								Твердость HV
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	W	Прочие	
Покрытые электроды: ECoCr — A	0,8	—	0,8	29,6	—	—	4	0,9	415
	0,3	1	0,6	26,1	6,1	3,1	—	0,6	520
	1,1	0,6	1,3	31,9	—	—	7,9	0,8	435
	2,4	1	—	29,7	—	—	10,3	Fe1	580
ECoCr — C	2,5	—	—	30	—	—	8	—	550
Литые прутки: RCoCr — A	1	1,2	—	28,3	—	—	4,2	Fe0,3	440
	0,3	0,7	0,6	26,2	6	3	—	—	356
	1,5	—	—	30,6	—	—	7,5	Fe0,5	460
	До	—	—	30	—	—	10,5	До Fe3	—
	2,8	—	—	32,5	—	—	17,5	—	655

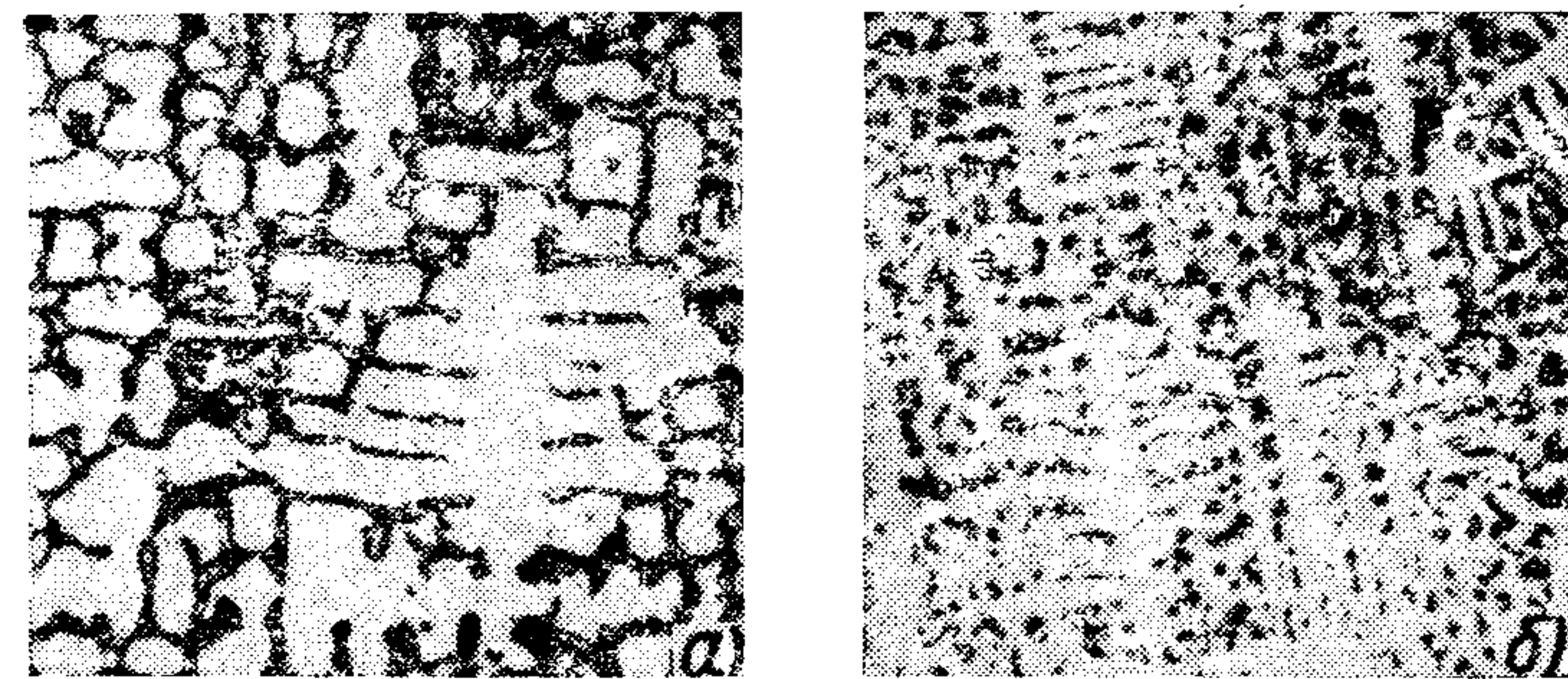


Рис. 23. Микроструктура наплавленного стеллита с различным содержанием углерода ($\times 100 \times 3/5$):

a — низкоуглеродистый (1,15% C); б — высокоуглеродистый (2,49% C)

шается, при этом снижается вязкость. В стандарте A5.13 американского общества сварочной техники классификация наплавочных материалов этой группы проведена по содержанию углерода (CoCr—A, CoCr—B и CoCr—C).

На рис. 23 показана микроструктура наплавленного стеллита с низким и высоким содержанием углерода [9]. Светлый дендритный рисунок на снимках соответствует твердому раствору вольфрама и хрома в кобальте, а окружающие его темные участки — эвтектике — смеси твердого раствора и двойного карбида, содержащего хром и вольфрам. По мере повышения содержания углерода возрастает доля эвтектики в структуре, зернистость которой снижается.

Стеллит обладает высоким уровнем жаропрочности, износостойкости и коррозионной стойкости. Это предполагает его использование для упрочнения ножей, применяемых в целлюлозно-бумажной промышленности, гнезд выхлопных клапанов двигателей внутреннего сгорания, клапанов высокотемпературных систем высокого

3.6. Температура подогрева деталей при наплавке стеллита, °C

Основной металл. Сталь	Температура подогрева при наплавке [1, 2]	
	газовой литыми прутками	покрытыми электродами
Низкоуглеродистая Углеродистая (0,45% C) Хромомолибденовая (2,25 Cr — 1 Mo) Аустенитная коррозионно-стойкая Мартенситная коррозионно-стойкая	400—450	300—350
	400—450	300—350
	450—550	300—400
	300—350	250—300
	450—550	300—350

Примечания: 1. Во время наплавки температура поверхности основного металла должна быть не ниже указанной.

2. Изделия с площадью наплавляемой поверхности менее 50×50 мм можно подвергать подогреву ацетилено-кислородным пламенем непосредственно перед наплавкой.

давления, матриц для экструзионных прессов и т. п. Хорошая обрабатываемость стеллита резанием и высокий уровень твердости при температурах 400—750°C предполагают возможность его использования для упрочнения деталей машин, работающих в условиях высокотемпературного нагрева.

При наплавке стеллита поверхность основного металла необходимо тщательно очистить от масла, окалины и других загрязнений. Невысокая пластичность стеллита не исключает образования в нем трещин, для предотвращения которых следует применять предварительный подогрев изделий (табл. 3.6) и медленное охлаждение после наплавки (в печи или под слоем теплоизоляционного материала) [10].

3.2. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В качестве коррозионно-стойких наплавочных материалов применяют коррозионно-стойкую сталь, никель, медь и их сплавы.

Коррозионно-стойкая сталь. Наиболее распространены хромистые и аустенитные коррозионно-стойкие стали. Хромистая коррозионно-стойкая сталь, в свою очередь, бывает мартенситной и ферритной. Коррозионно-стойкую мартенситную сталь используют в основном для износостойкой наплавки и почти не применяют для наплавки поверхностей деталей с целью повышения их коррозионной стойкости.

Японский промышленный стандарт предусматривает три вида электродов для наплавки покрытий из коррозионно-стойкой стали: покрытые электроды (стандарт Z3221), наплавочные прутки и проволока (Z3321), ленточные электроды (Z3322). В стандартах на покрытые и ленточные электроды указаны нормы химического состава наплавленного металла, полученного с использованием этих электродов, а в стандарте на пруток и проволоку — нормы химического состава самих наплавочных материалов, т. е. прутка и проволоки. Стандарт на прутки и проволоку предусматривает их использование для дуговой наплавки плавящимся и вольфрамовым неплавящимся электродами в среде инертного газа. Применение этих наплавочных материалов для дуговой наплавки под флюсом в указанном стандарте не предусмотрено.

1. Ферритная коррозионно-стойкая сталь при высоком содержании хрома сохраняет структуру феррита в широком диапазоне температур. Ферритная сталь не имеет структурных превращений при высокой температуре, но ее выдержка при этой температуре сопровождается укрупнением кристаллического зерна и охрупчиванием стали.

Содержание хрома, при котором сталь приобретает полностью ферритную структуру, зависит от содержания углерода и азота, а также марганца и других элементов, способствующих образованию аустенита. Как видно на рис. 24, для высокочистых сплавов системы железо — хром (0,004% C, 0,002% Ni) такое содержание хрома составляет 11,5% [11].

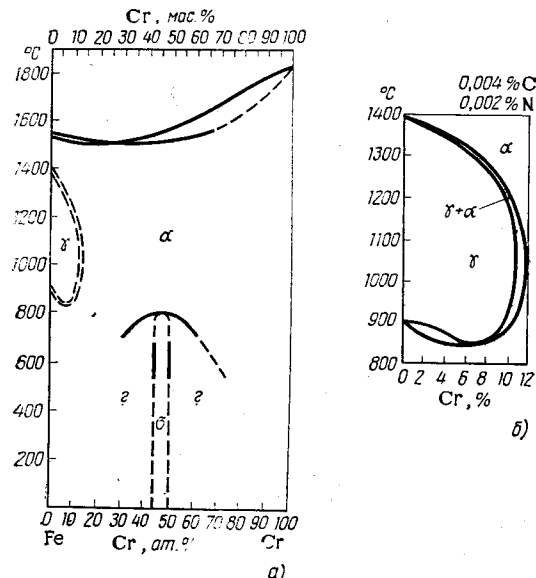


Рис. 24. Диаграмма состояния сплавов системы Fe—Cr по Хансену (а) и Берлекену (б)

Японский промышленный стандарт определяет ферритную наплавочную сталь D410 (13% Cr) и D430 (17% Cr). При наплавке ферритной стали с содержанием 13% Cr задача получения полностью ферритной структуры и пластичного наплавленного металла требует содержания углерода менее 0,12% и введения в состав стали ниобия, алюминия и титана.

При наплавке на детали из углеродистой и хромомолибденовой стали ферритной коррозионно-стойкой стали с содержанием 13% Cr для первого слоя применяют сталь D430, для двух последующих — сталь D410. В случае применения стали D410 для первого слоя в наплавленном металле этого слоя, вследствие разбавления его основным металлом, возможно образование мартенситной структуры, что создает опасность возникновения трещин. В табл. 3.7 приведены данные, относящиеся к наплавке деталей из хромомолибденовой стали (2,25% Cr, 1% Mo) ленточными электродами из ферритной коррозионно-стойкой стали с содержанием 13% Cr.

3.7. Режим автоматической наплавки деталей под флюсом электродной лентой из ферритной коррозионно-стойкой стали с содержанием 13% Cr

Сечение ленты, мм	Ток	I_d , А	U_d , В	Скорость наплавки, см/мин	Высота наплавки, мм	Температура металла при наплавке, °C	Охлаждение после наплавки
0,4×50	Постоянный	800	25—27	16	10	150	В печи до 150°C

Состав стали A387G22, %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,09	0,25	0,5	0,006	0,004	2,2	0,99

Состав электродных лент, а также металла первого и второго слоев, наплавленных соответственно лентами с 16 и 13% Cr на сталь A387G22, %

Лента				Слой	Наплавленный металл, %						
C	Si	Mn	Cr		C	Si	Mn	Cr	Nb	Al	Ti
0,025	0,25	0,65	16,08	1	0,052	0,72	0,57	13,37	0,84	0,05	0,13
0,027	0,22	0,66	13,3	2	0,057	0,74	0,61	13,07	0,84	0,04	0,12

Первый слой наплавляют ленточным электродом, содержащим 16% Cr, но под влиянием состава основного металла содержание хрома в наплавленном металле снижается до 13%. При таком изменении состава наплавленного металла в нем образуется мартенсит, укрупняется кристаллическое зерно, в результате чего снижается пластичность металла.

Ферритная коррозионно-стойкая сталь уступает аустенитной по стойкости к общей коррозии, однако в последнее время она находит применение как материал, стойкий к коррозионному растрескиванию под напряжением. При выборе наплавочного материала следует иметь в виду, что увеличение содержания углерода и азота, а также микродобавок кобальта, никеля и меди снижает стойкость ферритной стали к коррозионному растрескиванию под напряжением [12].

При наплавке ферритной коррозионно-стойкой стали для предотвращения образования трещин замедленного разрушения, возникающих под влиянием диффузионного водорода, необходим предварительный и сопутствующий подогрев. Температура предварительного подогрева составляет обычно 100—250°C, а сопутствующего — 300°C. Рекомендуется последующая термообработка непосредственно после окончания наплавки.

2. Аустенитная коррозионно-стойкая сталь, используемая для наплавки, имеет различные составы. В табл. 3.8 приведены обозначения наплавочных материалов этой группы по японскому промышленному стандарту, содержание в них основных элементов и особенности применения. При ручной наплавке в большинстве случаев используют электроды с карбонатно-рутиловым или основным покрытием. При автоматической наплавке под флюсом используют проволоку сплошного сечения (из аустенитной коррозионно-стойкой стали) или ленточные электроды в сочетании с керамическим флюсом. Для компенсации потерь хрома и других легирующих элементов, окисляющихся при наплавке, в состав керамического флюса вводят обычно легирующие элементы. Для автоматической или полуавтоматической наплавки плавящимся

3.8. Наплавочные аустенитные коррозионно-стойкие стали

Марка стали	Примерный состав, %			Назначение характеристики
	Cr	Ni	Прочие	
D308	19	9	—	Используют для наплавки покрытий из стали типа 18-8 (SUS304)
D308L низкоуглеродистая	19	9	—	Превосходит сталь D308 по стойкости к межкристаллитной коррозии
D309	25	12	—	Широко используют для наплавки вязкого подслоя
D309L низкоуглеродистая	25	12	—	Превосходит сталь D309 по стойкости при изгибе в термообработанном состоянии
D309Mo	25	12	2Mo	При наплавке одного слоя на низкоуглеродистую сталь получают наплавленный металл, имеющий состав стали D316
D310	25	20	—	Обладает высокой коррозионной стойкостью и стойкостью к окислению
D316	18	12	2Mo	Стойкая к кавитационной коррозии и в неокислительных кислотах
D316L низкоуглеродистая	18	12	2Mo	Превосходит сталь D316 по коррозионной стойкости
D316j1L низкоуглеродистая	18	12	3Mo, Cu	Стойка в неокислительных кислотах, таких как серная
D317	18	12	3Mo	Превосходит сталь D316 по стойкости к кавитационной коррозии
D317L низкоуглеродистая	18	12	3Mo	Превосходит сталь D316L по стойкости к кавитационной коррозии
D347	19	9	Nb	Превосходит сталь D308L по стойкости к межкристаллитной коррозии

или вольфрамовым неплавящимся электродом в среде инертного газа применяют наплавочные материалы согласно японскому промышленному стандарту Z3321. Стандарт AWS A5.22 утверждает наплавочную порошковую проволоку, предназначенную для дуговой наплавки открытой дугой в среде углекислого и инертного газов.

К числу широко используемых наплавочных сталей данной группы относятся стали D308, D309, D316, D310 и D347, из которых первое место принадлежит, безусловно, стали D308, соответствующей по составу коррозионно-стойкой стали типа 18-8 (SUS 304). Сталь D309 широко используют для наплавки подслоя хрома, обладает повышенной стойкостью к окислению при высокой жаропрочностью и стойкостью к кавитационной коррозии, а сталь D310 с высоким содержанием легирующих элементов, особенно хрома, обладает повышенной стойкостью окислению при высокой температуре. Кроме того, сталь D310 используют для наплавки подслоя, поскольку она, подобно стали D309, не охрупчивается даже при изменении состава под влиянием углеродистой стали (основного металла). Наплавочная сталь D347 стойка к межкристаллитной коррозии в связи со стабилизацией углерода ниобием. Содержание ниобия, находящееся в пределах от 8×% C до 1%, обычно в 7,7 раза превышает содержание углерода (в пересчете на ат. %). На практике ниобий добавляют в большем количестве, поскольку часть его потребляется на образование нитрида ниобия, однако при введении ниобия следует проявлять осторожность, так как при большом его содержании возникает опасность охрупчивания стали при последующей термообработке.

Наплавочные стали D308, D309 и D316 имеют соответствующие им низкоуглеродистые модификации D308L, D309L и D316L с повышенной коррозионной стойкостью. На рис. 25 показаны результаты испытания на межкристаллитную коррозию образцов наплавленного металла из стали D308 с различным содержанием углерода, из которых следует, что углерод оказывает крайне неблагоприятное влияние на стойкость стали к межкристаллитной коррозии [13].

Кроме стандартных наплавочных сталей для специальных целей используют стали с высоким содержанием кремния и добавкой меди, обладающие повышенной стойкостью к коррозионному растрескиванию под напряжением, а при необходимости повышения стойкости к коррозии в морской воде и кавита-

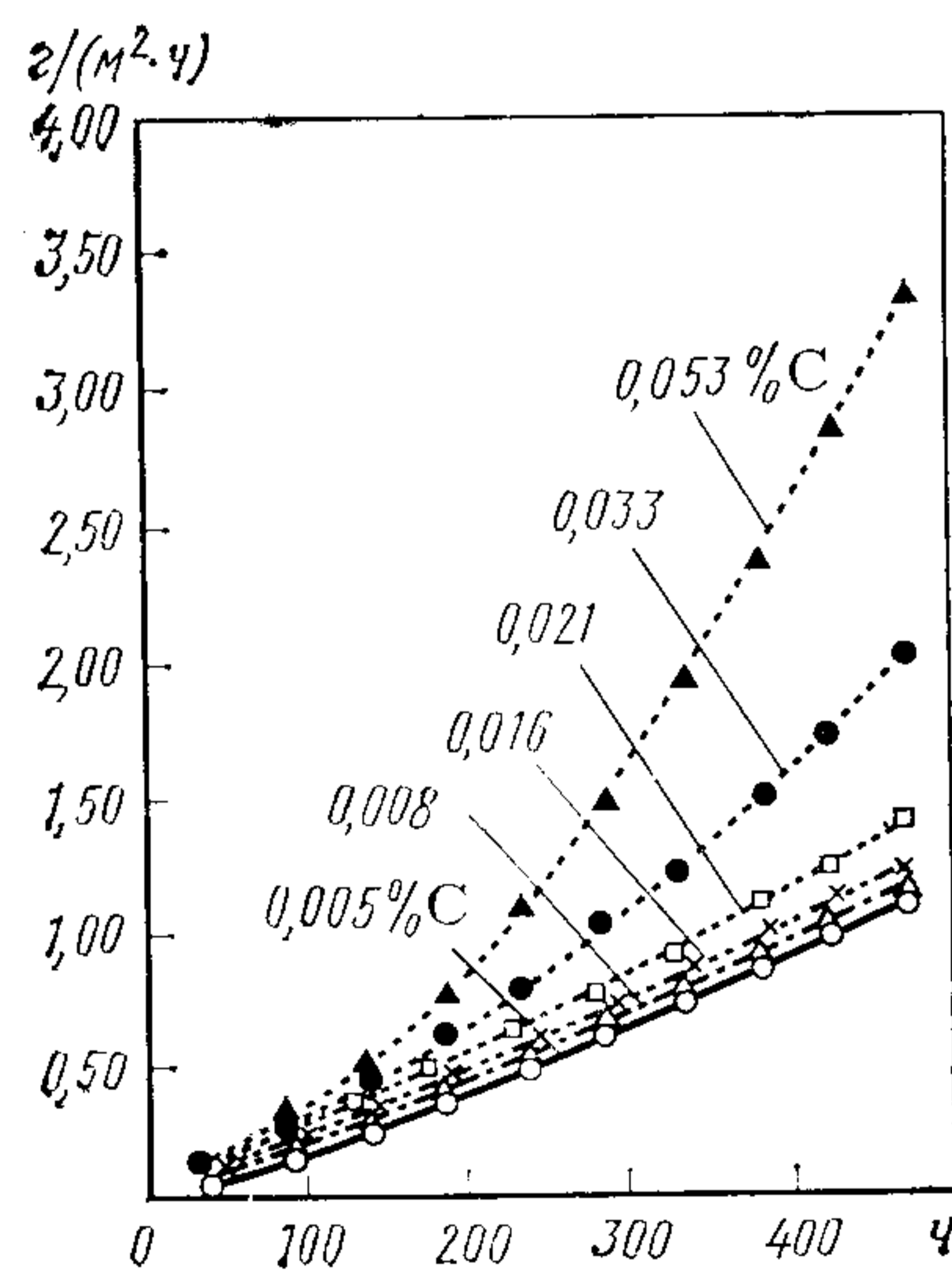


Рис. 25. Влияние содержания углерода в стали и продолжительности выдержки в агрессивной среде на потери массы образцов в состоянии после наплавки при испытаниях по Хью

3.9. Наплавочные стали специального назначения

Сталь	Состав, %								Характеристика
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	
А	0,05	3,17	1,84	20,4	10,8	—	0,68	—	Стойка к коррозионному растрескиванию под напряжением Стойка к коррозии в морской воде и кавитационной коррозии
Б	0,05	0,61	1,64	24,7	13,4	1,47	—	0,34	

ционной коррозии применяют наплавочные стали, содержащие молибден и азот (табл. 3.9).

Аустенитная коррозионно-стойкая сталь значительно превосходит ферритную по сварочно-технологическим свойствам. Для предотвращения охрупчивания аустенитного наплавленного металла принимают меры, противоположные соответствующим мерам для ферритной стали: снижают температуру предварительного подогрева и температуру разогрева металла при наплавке (ниже 150°C).

3.10. Типичные наплавочные сплавы на основе никеля

Сплав	Примерный состав, %					Характеристика
	Ni	Cu	Mo	Cr	Fe	
Никель	99	—	—	—	—	Устойчив в едком натре и щелочах
Монель-металл	70	30	—	—	—	Устойчив в морской воде, серной кислоте и едком натре
«Инконель»	75	—	—	15	10	Устойчив к коррозионному растрескиванию под напряжением, в воде при высоких температурах и давлениях
«Хастеллой В»	65	—	30	—	5	Устойчив в соляной кислоте и к окислению при высокой температуре
«Хастеллой С»	65	—	15	15	5	То же

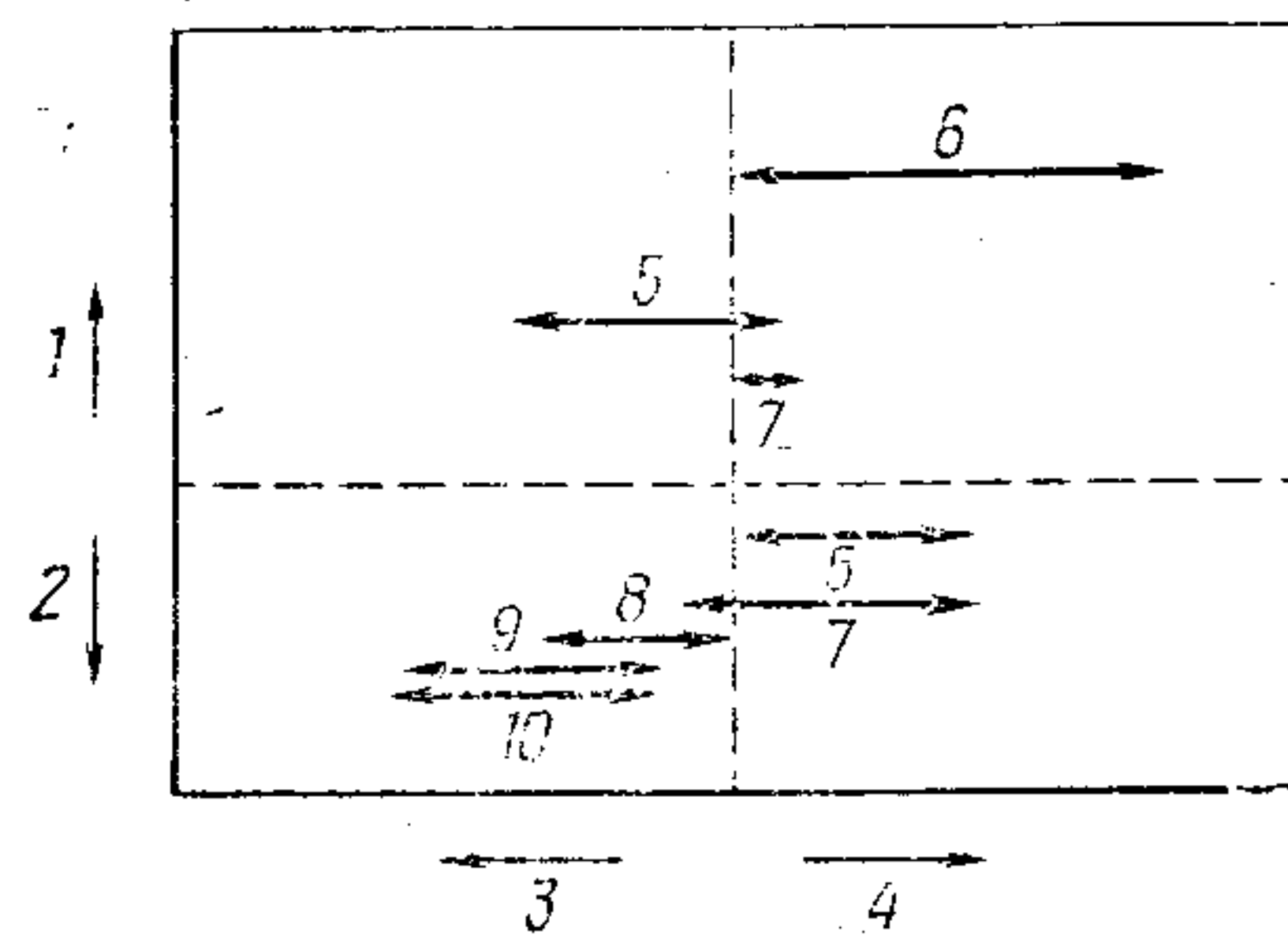


Рис. 26. Оценка коррозионной стойкости никелевых сплавов (по М. Стерну):

1 — хлориды; 2 — отсутствие хлоридов; 3 — окислительные свойства среды; 4 — восстановительные свойства среды; 5 — «хастеллой С»; 6 — «хастеллой В»; 7 — монель-металл; 8 — «инконель»; 9 — коррозионно-стойкая сталь SUS316; 10 — коррозионно-стойкая сталь SUS304

Никель и его сплавы. Типичными наплавочными материалами этой группы являются чистый никель, монель-металл, сплавы «инконель» и «хастеллой» (табл. 3.10).

Коррозионная стойкость никелевых сплавов и коррозионно-стойкой стали схематически характеризуется рис. 26. Коррозионно-стойкая сталь пригодна для работы в окислительных средах, не содержащих хлоридов, тогда как никелевые сплавы обладают коррозионной стойкостью в щелочах, а монель-металл и сплав «хастеллой В» отличаются стойкостью в серной и других неокислительных кислотах. В качестве наплавочного материала этой группы используют покрытые электроды для дуговой наплавки, утвержденные японским промышленным стандартом Z3224.

В стандарте AWS A5.14 кроме покрытых электродов предусмотрена наплавочная проволока из никеля, монель-металла и сплавов «инконель», «хастеллой». Монель-металл и сплав «инконель» широко используют в форме ленточных электродов.

Коэффициент линейного расширения никелевых сплавов близок к соответствующему коэффициенту для низкоуглеродистой стали, что позволяет проводить наплавку без предварительного подогрева. Для предотвращения образования пор при наплавке никелем и монель-металлом в состав наплавочных материалов следует вводить титан и алюминий. Одна из проблем наплавки никелем и его сплавами связана с образованием в сварных швах горячих трещин, что требует снижения содержания фосфора, серы и других вредных примесей в наплавочных материалах. Следует особо отметить, что при чрезмерном содержании алюминия возникает опасность растрескивания металла. Для предотвращения горячих трещин, возникающих при наплавке «инконеля» под влиянием кремния, в состав наплавочного материала рекомендуется вводить ниобий и тантал.

Медь и ее сплавы. Типичные наплавочные материалы этой группы приведены в табл. 3.11.

Японский промышленный стандарт предусматривает прутки для газовой наплавки (стандарт Z3202) и покрытые электроды для дуговой наплавки (Z3231).

При дуговой наплавке покрытыми электродами можно использовать электроды DCuSiA и DCuSiB из кремнистой бронзы. Наплавке этими электродами, повышающей стойкость металла к кор-

Сплав	Примерный состав, %							Характеристика
	Cu	Zn	Sn	Al	Ni	Si	Fe	
Медь	99,9	—	—	—	—	—	—	Электроды и т. п.
Бронза кремнистая	96*	—	—	—	—	3	—	Устойчива в морской воде и кислотах (кроме азотной)
Бронза алюминиевая	92	—	—	8	—	—	—	Устойчива в морской воде, износостойчива
Бронза адмиралтейская	88	—	—	8	2	—	2	—
Латунь	70	30	—	—	—	—	—	—
Латунь судостроительная	60	39	1	—	—	—	—	—
Латунь алюминиевая	80	18	—	2	—	—	—	—
Медно-никелевый сплав	70	—	—	—	30	—	—	Устойчив в морской воде

розии в морской воде и многим неорганическим и органическим кислотам (кроме азотной), подвергают детали химического оборудования и трубопроводы.

Наплавочный сплав DCuAlA, представляющий собой алюминиевую бронзу с 7—10% Al, подобно DCuSi обладает коррозионной стойкостью при высоком уровне механических свойств и износостойкости, что предполагает его использование для восстановления изношенных судовых винтов. Сплав DCuAlNi, сходный со сплавом DCuAlA, но превосходящий его по уровню твердости в связи с содержанием железа и никеля, используют для наплавки деталей насосов, цилиндров и клапанов, работающих в воде при высоком давлении, а также для восстановления изношенных судовых винтов.

СПОСОБЫ НАПЛАВКИ

Из числа разнообразных способов сварки, имеющих промышленное применение, для наплавки используют только сварку плавлением, удовлетворяющую перечисленным требованиям: 1) обеспечение неглубокого и равномерного проплавления основного металла; 2) образование ровного валика с хорошим внешним видом; 3) отсутствие склонности к возникновению дефектов: несплавлений в местах перекрытия соседних валиков, застреваний шлака в наплавленном металле, подрезов, пор и трещин; 4) высокая технологичность процесса, малая чувствительность к состоянию поверхности и форме наплавляемой поверхности детали; 5) высокая скорость процесса.

С целью повышения производительности и уменьшения глубины проплавления основного металла применяют ряд перечисленных ниже технологических приемов, используемых как при обычной сварке плавлением, так и при наплавке. К этим приемам относятся многоэлектродная сварка (наплавка), использование подогрева наплавочной электродной проволоки электросопротивлением, применение присадочных материалов и поперечных колебаний электрода.

1. Многоэлектродную наплавку выполняют несколькими электродами, что повышает производительность процесса за счет увеличения поступления металла в наплавляемый слой.

Варианты многоэлектродной наплавки:

Многоэлектродная наплавка	{	Одна многоэлектродная головка	{	Один источник питания
		Несколько многоэлектродных головок	{	Несколько источников питания

При наплавке широко применяют многоэлектродные головки, получающие питание от нескольких источников. Многоэлектродную наплавку обычно осуществляют под флюсом или в среде различных защитных газов.

2. Нагрев наплавочной электродной проволоки теплотой электросопротивления за счет увеличения вылета электрода способст-

вует повышению скорости подачи электродного наплавочного материала и уменьшению глубины проплавления основного металла.

3. Применение присадочных материалов в виде прутков, проволоки или порошка наплавляемого металла увеличивает поступление их в наплавленный слой, способствует уменьшению глубины проплавления основного металла. Этот технологический прием можно использовать также для введения дополнительных легирующих элементов в наплавленный металл. Указанный способ применяют главным образом при наплавке вольфрамовым неплавящимся электродом в среде инертного газа.

4. Поперечные колебания электрода, осуществляемые перпендикулярно направлению перемещения головки, способствуют образованию ровного широкого валика при малой глубине проплавления основного металла. При сварке обычно используют колебания малой амплитуды при большой частоте, а при наплавке — колебания большой амплитуды при малой частоте.

4.1. ГАЗОВАЯ НАПЛАВКА

Газовая наплавка — один из способов сварки плавлением, протекающей в условиях частичного оплавления основного металла при использовании высокотемпературного пламени, получаемого при сжигании смеси горючего газа с кислородом. Горючий газ, используемый при газовой наплавке, должен удовлетворять следующим трем требованиям: 1) высокая температура пламени при сгорании; 2) высокая скорость горения; 3) высокая теплота сгорания. Ацетилено-кислородное пламя, обеспечивающее нагрев до высоких температур, наиболее приемлемо для газовой наплавки (или сварки), поэтому само понятие газовой сварки обычно ассоциируется именно со сваркой этим пламенем.

При наплавке, в отличие от сварки, желательна малая глубина проплавления основного металла, поэтому наплавку выполняют способом скоростной сварки (способом Линда). При сварке (наплавке) таким способом используют горелку с соплом большого диаметра, нагревая основной металл науглероживающим пламенем. На рис. 27, б показан способ сварки Линда [1, 2]. При сварке с использованием горючей смеси, обогащенной ацетиленом, на поверхности металла оседают частицы восстановленного углерода, образуя тонкий науглерожженный слой толщиной ~0,02 мм. Вследствие снижения точки плавления металла науглерожженного слоя происходит расплавление только в тонком поверхностном слое. Возникновение этого явления, называемого запотеванием, свидетельствует о готовности основного металла к газовой наплавке. Запотевание основного металла в сочетании с применением присадочного материала создает особо благоприятное условие для газовой наплавки с незначительным проплавлением основного металла. Появление запотевания позволяет также определить момент нагрева до температуры наплавки и точнее выбрать время подачи наплавочного материала.

специализированных машин, применение которых обеспечивает резкое повышение производительности и устраняет необходимость в квалифицированном ручном труде.

4.2. ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Наплавку этим способом, основанным на использовании электродов в виде стержней с покрытием, осуществляют обычно вручную, поэтому такой способ называют также ручной дуговой наплавкой.

Электродное покрытие служит для защиты ванны жидкого металла от кислорода и азота воздуха, стабилизации дуги, повышения технологичности процесса наплавки и введения легирующих элементов в состав наплавленного металла. Применяют следующие виды электродного покрытия: ильменитное, содержащее более 30% ильменита ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$); высокоцеллюлозное с содержанием 20—30% целлюлозы; карбонатно-рутиловое; основное (фтористо-кальциевое), основными компонентами которого являются карбонат кальция и флюорит (плавиковый шпат) при минимальном содержании влаги; высокорутиловое с содержанием до 35% TiO_2 ; покрытие системы железный порошок — рутил с высоким содержанием первого компонента; порошковое основное, содержащее железный порошок; покрытие системы железный порошок — оксид железа; некоторые специальные покрытия, содержащие, в частности, графит. Широкое применение в практике дуговой наплавки имеют покрытия карбонатно-рутиловое, основное и высокорутиловое. В состав электродного покрытия вводят также шлакообразующие и газообразующие компоненты, раскислители, стабилизирующие и легирующие добавки.

Дуговая наплавка покрытыми электродами отличается низкой стоимостью оборудования, возможностью выполнения наплавки вручную, что обеспечивает этому способу самое широкое применение для наплавки не только черных, но и цветных металлов.

Ручная наплавка уступает автоматическим и полуавтоматическим способам по скорости выполнения процесса, однако она имеет ряд преимуществ, обеспечивающих ей наиболее широкое распространение среди всех известных способов наплавки черных и цветных металлов: 1) возможность наплавки изделий сложной формы; 2) возможность выбора наплавочного материала, наиболее пригодного для конкретного назначения, из широкого ассортимента покрытых наплавочных электродов; 3) транспортабельность оборудования, позволяющая выполнять наплавку в полевых условиях.

4.3. ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ПОД ФЛЮСОМ

Преимущества и недостатки дуговой наплавки под флюсом. Название этого способа связано с тем, что дуга при наплавке электродными материалами (проволокой, лентой и др.) скрыта под

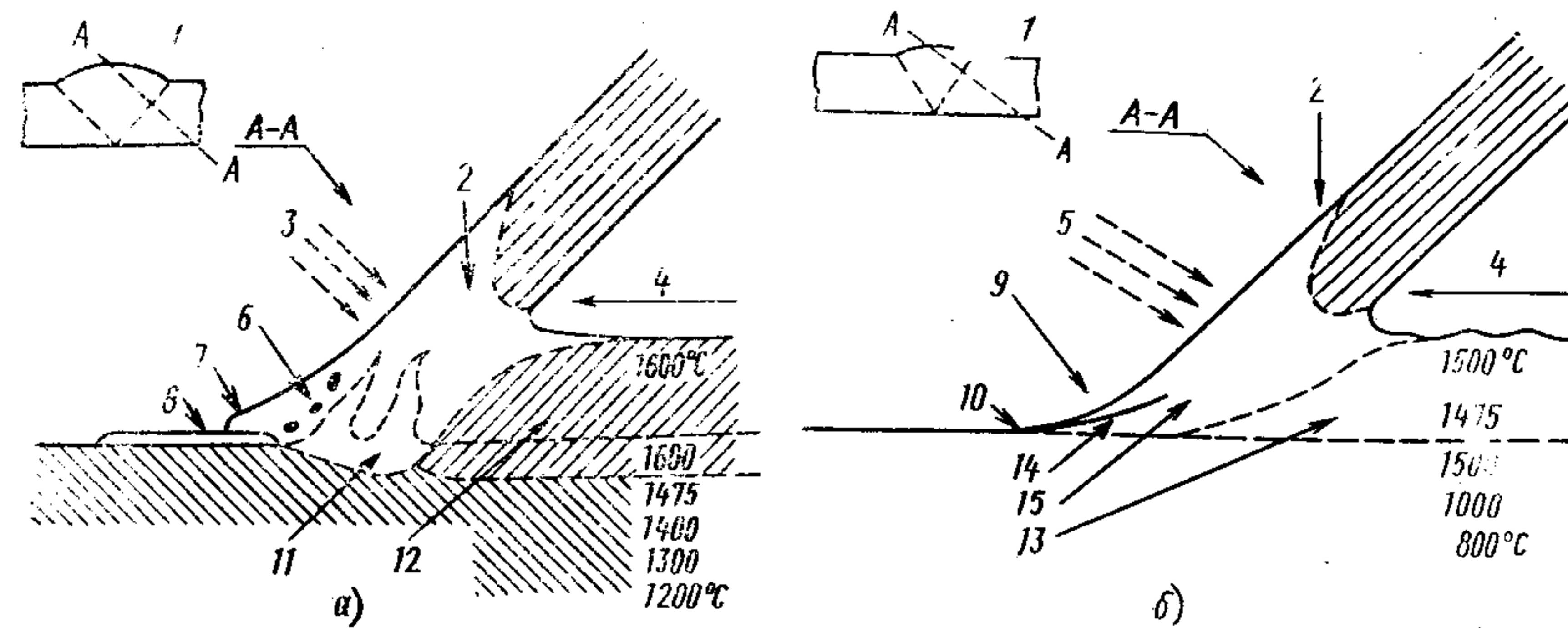


Рис. 27. Схема дуговой сварки (наплавки) стали:

а — нормальное пламя; б — науглероживающее пламя (с избытком ацетилен); 1 — сечение по А-А; 2 — присадочный материал; 3 — нормальное пламя; 4 — направление сварки; 5 — науглероживающее пламя; 6 — оксиды, попадающие в наплавленный металл; 7 — выпуклый мениск; 8 — поверхностная оксидная пленка; 9 — вогнутый мениск; 10 — высокоуглеродистый шлак (выполняет роль флюса); 11 — подвергаемый плавлению основной металл; 12 — наплавленный металл (сплав основного и присадочного металлов); 13 — закристаллизовавшийся наплавленный металл; 14 — плавящийся шлак; 15 — плавящийся присадочный материал

Вместе с тем науглероживание поверхности при наплавке этим способом вызывает повышение содержания углерода в наплавленном металле, что оказывает неблагоприятное влияние на его механические свойства и коррозионную стойкость. В связи с этим в настоящее время рассмотренный способ применяют только при наплавке высокохромистого сплава на основе железа, стеллита и других высокоуглеродистых наплавочных материалов, тогда как при нанесении покрытий из коррозионно-стойкой стали, для которой науглероживание противопоказано, применяют способы дуговой наплавки плавящимся и вольфрамовым электродами в среде инертного газа.

Газовая наплавка обеспечивает следующие преимущества: 1) незначительное проплавление основного металла; 2) возможность наплавки мелких деталей сложной формы; 3) уменьшение опасности возникновения трещин, поскольку процесс наплавки включает предварительный подогрев и последующее замедленное охлаждение изделия; 4) низкая стоимость сварочного оборудования.

Вместе с тем для газовой наплавки характерны и недостатки:

1. Низкая производительность при наплавке массивных деталей, требующих продолжительного предварительного подогрева;
2. Высокая квалификация сварщика.

Газовую наплавку в настоящее время применяют только в специальных областях (при изготовлении клапанов высокотемпературных систем высокого давления, двигателей внутреннего сгорания и т. д. Вместе с тем при наплавке мелких деталей одинаковой формы возможна автоматизация такого процесса путем внедрения

слоем гранулированного флюса, предварительно насыпаемого на поверхность основного металла.

Возможность наплавки при большой силе тока и высокой погонной энергии обеспечивает этому способу высокую производительность при хорошем качестве наплавляемого металла, и благодаря этому данный способ занимает господствующее положение в области автоматической наплавки. Дуговая наплавка под флюсом имеет следующие преимущества: 1) высокая производительность процесса при наплавке изделий простой формы с большой площадью наплавляемой поверхности; 2) простота осуществления процесса, не требующего высокой квалификации сварщика; 3) возможность получения хорошего внешнего вида валика; 4) хорошие условия труда, связанные с отсутствием разбрызгивания электродного металла (поскольку дуга скрыта под слоем флюса).

Вместе с тем этому способу наплавки присущи следующие недостатки: 1) более высокая стоимость оборудования, чем для ручной дуговой наплавки покрытыми электродами; 2) непригодность для наплавки мелких изделий сложной формы.

Наплавка электродной проволокой под флюсом может быть осуществлена во многих вариантах с использованием наплавочной проволоки различного состава и различных флюсов. При наплавке этим способом в полную меру используют названные выше технологические приемы повышения производительности, включая применение многоэлектродных сварочных головок, нагрев наплавочной проволоки электросопротивлением и применение присадочных материалов.

Многоэлектродную наплавку осуществляют обычно способом, при котором дуга возникает между двумя электродами. Преимущество этого способа связано с косвенным дуговым нагревом основного металла, обеспечивающим небольшое его проплавление в сочетании с высокой скоростью плавления электродной проволоки.

Использование нагрева проволоки электросопротивлением при дуговой наплавке под флюсом характеризуется тем, что увеличение вылета электродной проволоки (рис. 28 и 29) сопровождается повышением скорости наплавки и снижением степени влияния основного металла на состав наплавленного слоя [3]. Значительное увеличение производительности наплавки, получение широкого валика наплавленного металла при малой глубине проплавления основного металла достигаются посредством дополнительной подачи присадочного порошкового материала в сочетании с колебанием электродной проволоки перпендикулярно направлению наплавки. При этом равномерная дозированная засыпка присадочного порошка на наплавляемую поверхность основного металла согласуется со скоростью подачи проволоки.

При обычной одноэлектродной наплавке под флюсом во избежание чрезмерного проплавления основного металла необходимо применение следующих мер: 1) тщательный выбор наплавочного материала с учетом влияния основного металла на состав наплавленного слоя; 2) ограничение глубины проплавления путем более

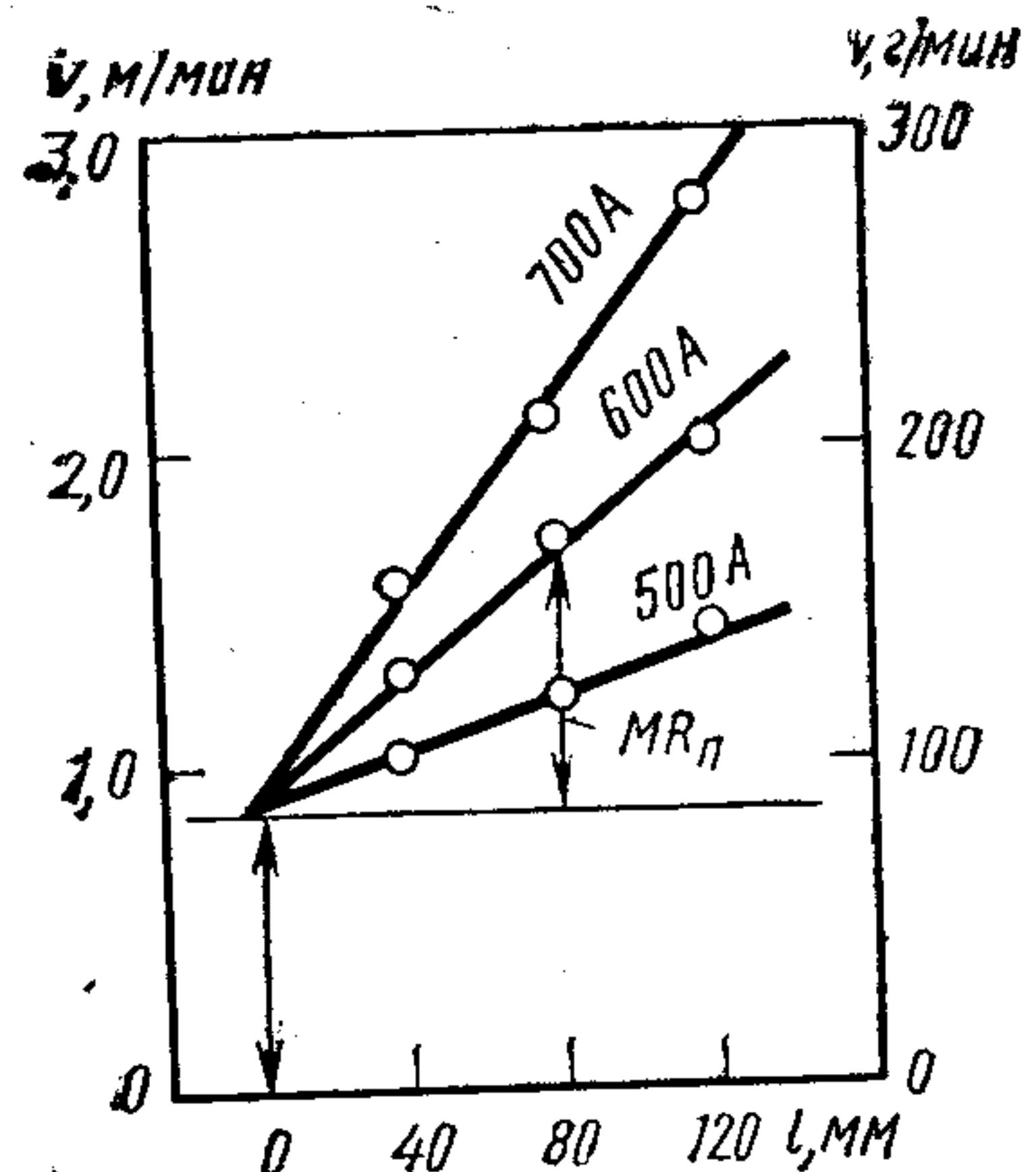


Рис. 28. Зависимость скорости v плавления электродной проволоки и производительности V наплавки от длины l вылета электродной проволоки и силы тока (наплавка переменным током с использованием проволоки $\varnothing 4$ мм, скорость наплавки 50 см/мин)

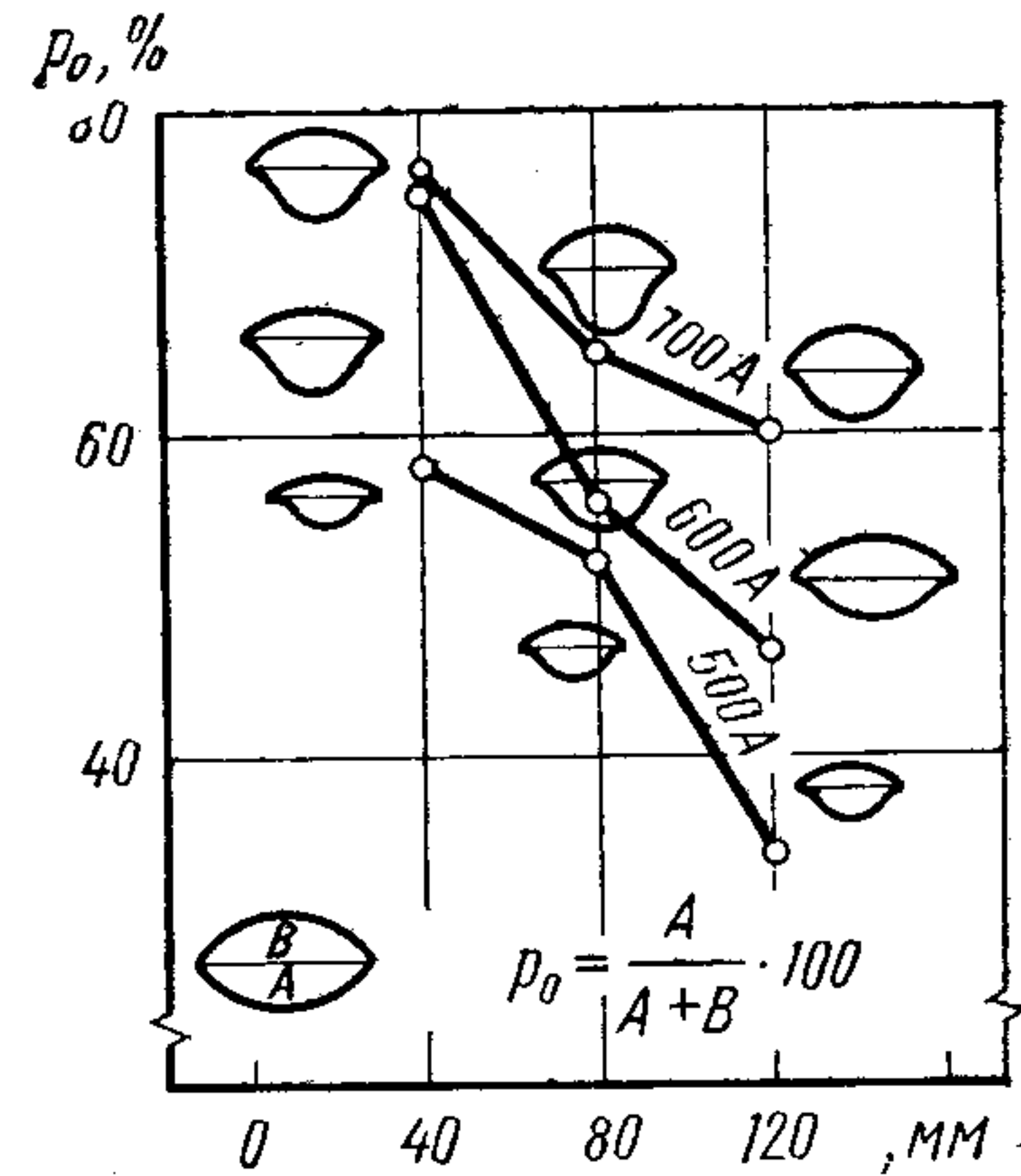


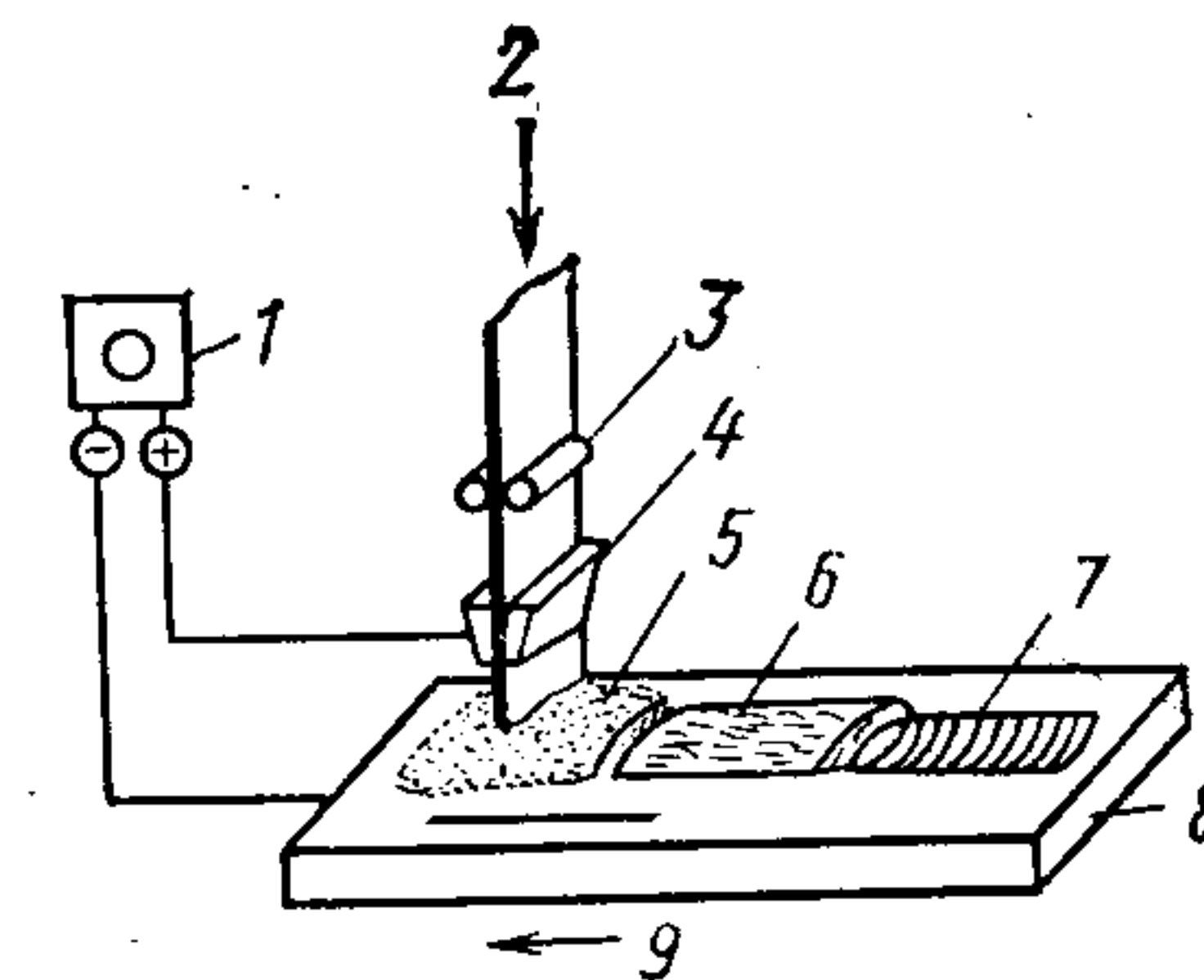
Рис. 29. Зависимость между длиной вылета электрода и долей участия P_0 основного металла в составе наплавленного слоя

плотной укладки наплавляемых валиков; 3) обеспечение должной толщины наплавленного слоя за счет многослойной наплавки.

Наплавка электродной лентой под флюсом. В 50-х годах в СССР был разработан способ наплавки ленточным электродом, согласно которому дуговую наплавку под флюсом, как показано на рис. 30, осуществляют с помощью электрода в виде широкой стальной ленты, располагаемого в процессе наплавки практически под прямым углом к основному металлу [4]. Наплавка ленточным электродом обладает следующими преимуществами: 1) получение плоского валика наплавленного металла, достаточно большой ширины (примерно равной ширине ленточного электрода); 2) возможность наплавки слоя требуемой толщины за один-два прохода, что обусловлено малой глубиной проплавления основного металла и в связи с этим незначительным влиянием его на состав наплавленного слоя (доля разбавления составляет 10—20%); 3) высокая

Рис. 30. Схема процесса наплавки ленточным электродом под флюсом:

1 — источник питания; 2 — ленточный электрод; 3 — ролики подачи электрода; 4 — мундштук (токоподвод); 5 — флюс; 6 — шлак; 7 — наплавленный металл; 8 — основной металл; 9 — направление наплавки



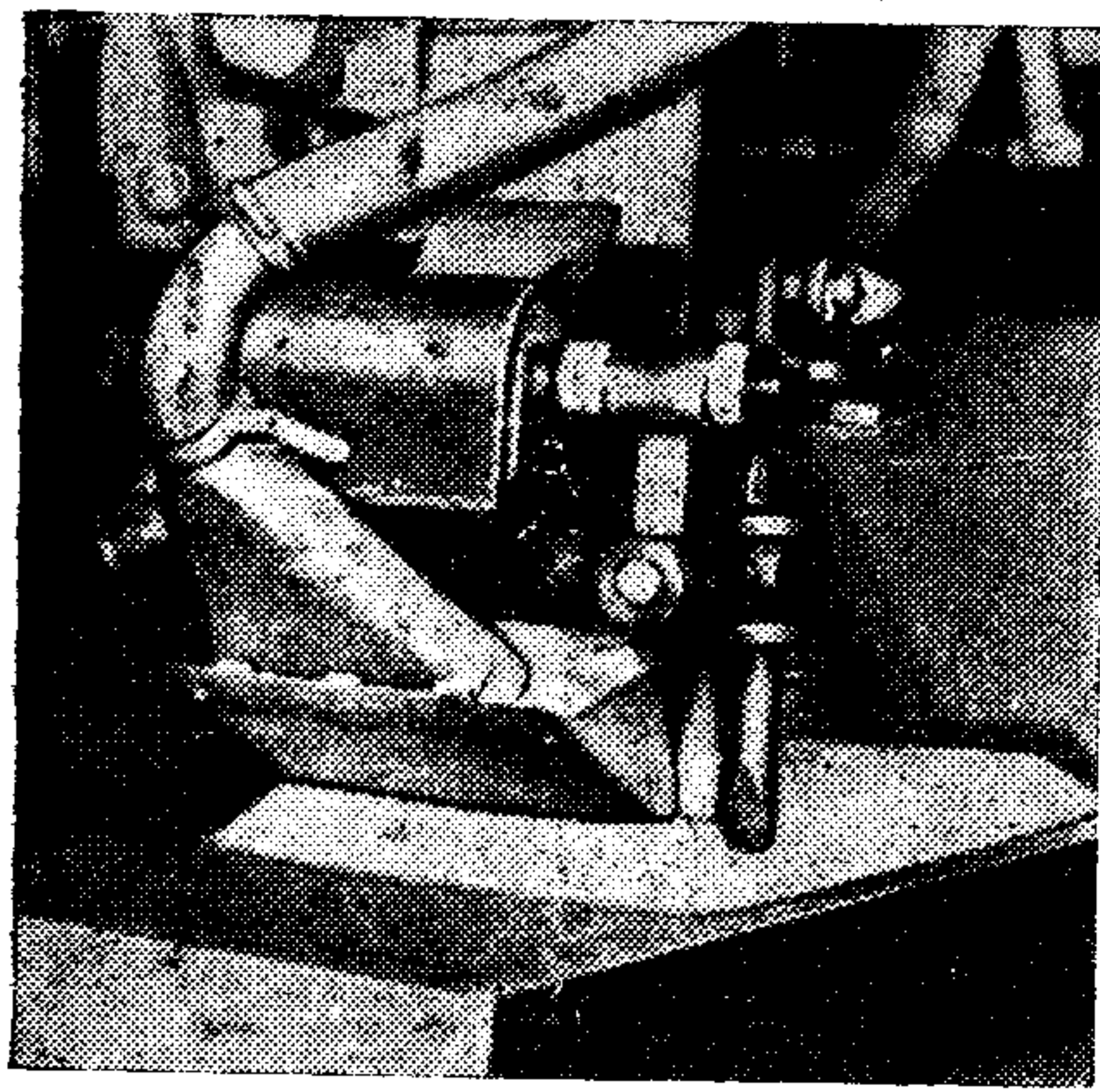


Рис. 31. Наплавка широким ленточным электродом в магнитном поле

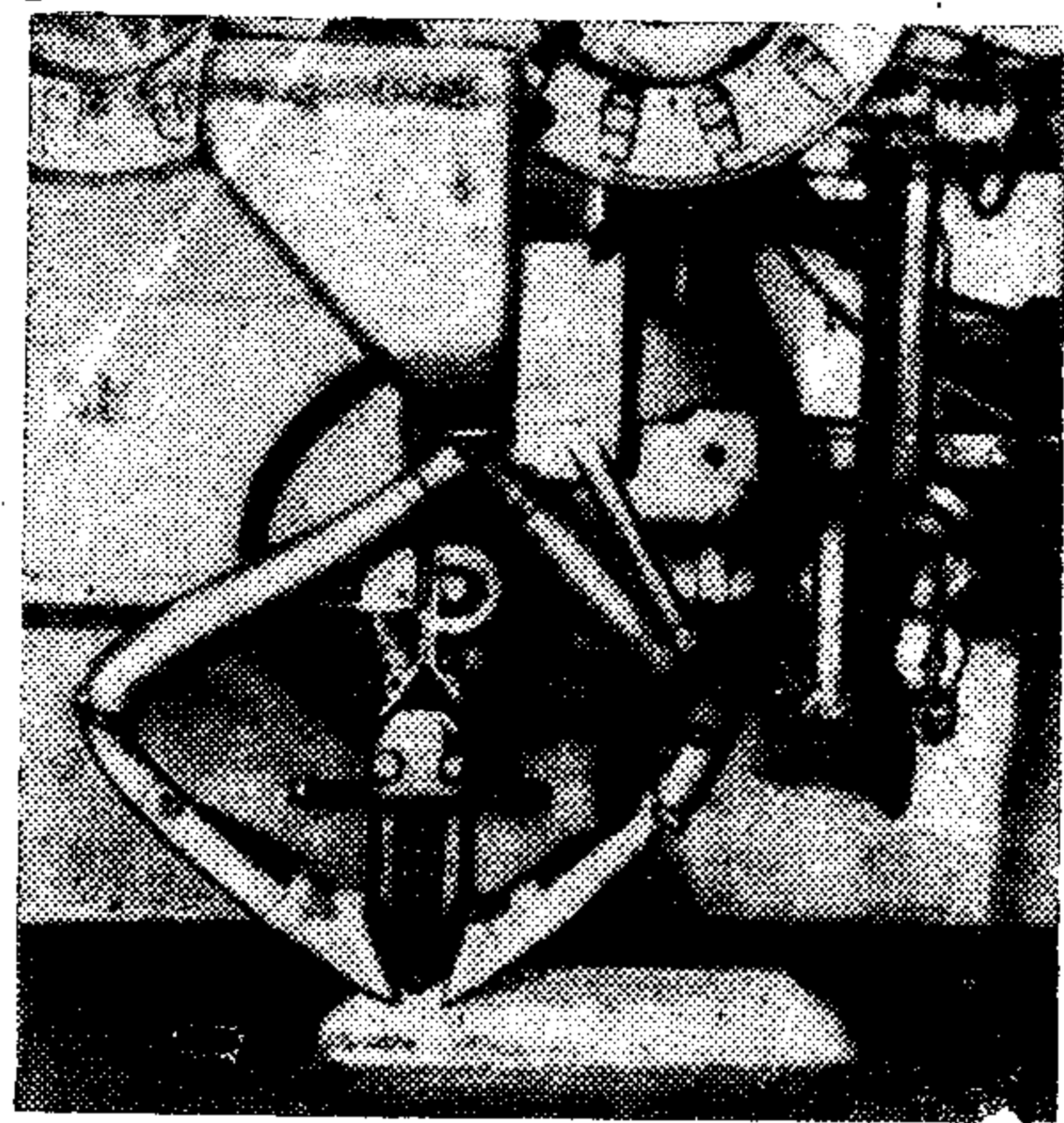


Рис. 32. Наплавка двумя ленточными электродами

производительность в связи с возможностью наплавки с высокой скоростью при большой силе тока.

Рассматриваемый способ получил быстрое развитие и нашел широкое применение для наплавки коррозионно-стойкой стали, сплава «инконель» и других коррозионно-стойких наплавочных материалов.

Производительность способа может быть еще более повышена, в частности путем увеличения ширины ленточного электрода и применения многоэлектродных головок.

На практике используют ленточные электроды шириной до 180 мм, однако при наплавке постоянным током увеличение размеров наплавочной ванны сопровождается нарушением формы наплавляемого валика под действием магнитного дутья. В поиске путей решения этой проблемы предложен способ наплавки в магнитном поле (рис. 31) [5].

Многоэлектродная наплавка может быть осуществлена несколькими вариантами, один из которых показан на рис. 32 (наплавка двумя электродными лентами с использованием двухэлектродной головки с питанием от одного источника) [5]. При двухэлектродной ленточной наплавке достигают скорости наплавки 30 см/мин, что почти в 2 раза больше, чем при наплавке одним электродом. При этом получают валик наплавленного металла с хорошим внешним видом.

4.4. НАПЛАВКА ОТКРЫТОЙ ДУГОЙ

Наплавка без защитной среды, в среде воздуха, осуществляется проволокой сплошного сечения или порошковой проволокой при отсутствии подачи флюса или защитного газа в зону дуги. Наплавка проволокой сплошного сечения сопряжена с большими практическими трудностями и уступает способу наплавки порош-

ковой проволокой с флюсовой сердцевинной. (Вместе с тем следует отметить, что для выполнения покрытий из высокохромистого сплава на основе железа предпочтительно использование для наплавки проволоки сплошного сечения из высокохромистого сплава, если только существует технологическая возможность производства такой проволоки металлургическим переделом.)

Наплавка открытой дугой порошковой проволокой обладает следующими преимуществами: 1) простота используемого оборудования и технологии, связанная с отсутствием необходимости применения защитного газа и флюса; 2) возможность наплавки в полевых условиях, поскольку ветер практически не оказывает влияния на процесс наплавки; 3) сравнительная простота введения легирующих элементов в наплавленный металл, состав которого можно регулировать в широких пределах.

Проблема наплавки этим способом, связанная с обильным выделением дыма, решена разработкой специального дымового коллектора.

4.5. НАПЛАВКА В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Наплавка плавящимся электродом в среде защитного газа протекает в условиях газового потока со стороны подачи электродной проволоки (наплавочного материала), что обеспечивает защиту зоны дуги от окружающего воздуха.

В качестве защитного газа используют CO_2 , хотя в последнее время распространена практика наплавки в смеси углекислого газа с аргоном и другими инертными газами. Все эти варианты носят общее название наплавки плавящимся электродом в среде защитного газа.

При осуществлении износостойкой наплавки в CO_2 используют проволоку сплошного сечения или порошковую проволоку. Эти два вида проволоки имеют разное назначение в соответствии с их особенностями, перечисленными в табл. 4.1.

Основное преимущество наплавки в CO_2 состоит в возможности повышения производительности процесса за счет его осуществления в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Недостатки

4.1. Особенности применения проволоки сплошного сечения и порошковой проволоки для наплавки

Показатели процесса наплавки	Проволока сплошного сечения	Порошковая проволока
Скорость плавления и эффективность наплавки	Выше, чем для порошковой проволоки	Ниже, чем для проволоки сплошного сечения
Питание при наплавке	Только постоянным током	Постоянным и переменным током

Показатели процесса наплавки	Проволока сплошного сечения	Порошковая проволока
Шлакообразование	Практически отсутствует	Обеспечивается покрытие валика шлаком (образованным шихтой порошковой проволоки)
Состояние поверхности валика	Хуже, чем при наплавке порошковой проволокой, что связано с разбрызгиванием металла	Хорошее
Глубина проплавления	Больше, чем при наплавке порошковой проволокой	Меньше, чем при наплавке проволокой сплошного сечения
Введение легирующих элементов в наплавляемый металл	Наплавка металла низкой твердости с невысоким содержанием легирующих элементов	Возможно получение высоколегированного наплавленного металла с высоким уровнем твердости
Основное назначение	Для наплавки деталей, подвергаемых последующей механической обработке, например зубчатых колес кранов	Для наплавки деталей, применяемых без последующей обработки, например траков гусениц и катков тракторов

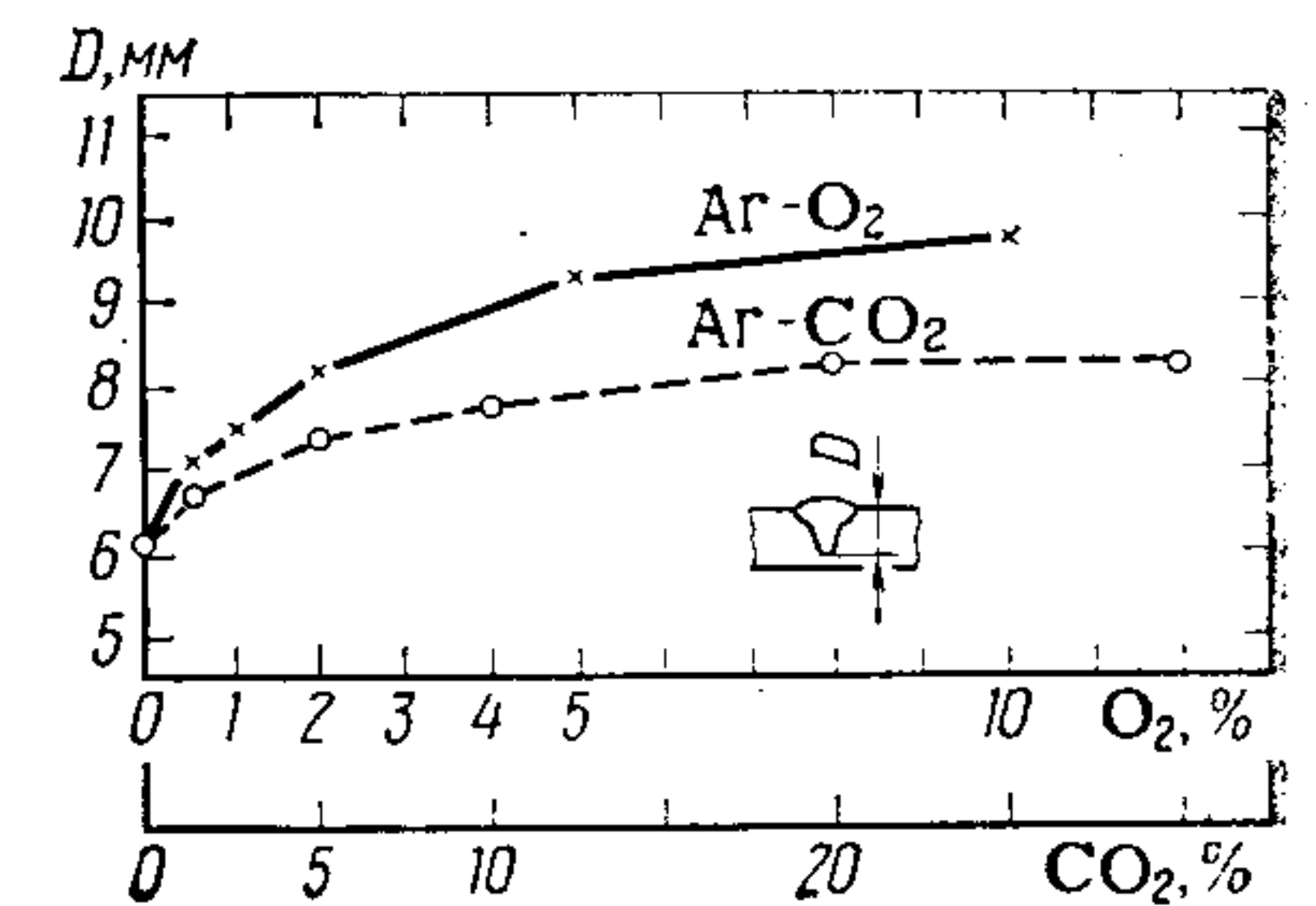
ток этого способа, присущий и другим способам с применением защитных газов, связан с невозможностью работы на открытом воздухе из-за влияния ветра на процесс наплавки.

4.6. НАПЛАВКА В СРЕДЕ ЗАЩИТНОГО (ИНЕРТНОГО) ГАЗА

Способ состоит в дуговой наплавке при защите зоны дуги аргоном, гелием или иным инертным газом. Наплавку в среде инертного газа осуществляют в двух вариантах: плавящимся и вольфрамовым электродами.

Наплавка плавящимся электродом в среде защитного газа характеризуется тем, что дуга возникает между основным металлом и электродным наплавочным материалом. Наплавка протекает в условиях автоматической подачи электродной проволоки. В качестве защитного газа чаще всего используют аргон, хотя при работе в среде чистого аргона дуга теряет стабильность при наплавке любого материала, кроме алюминиевых сплавов. С целью стабилизации дуги при наплавке стали к аргону добавляют до 20% кислорода или углекислого газа, что существенно влияет на процесс на-

Рис. 33. Влияние содержания CO_2 и кислорода в составе защитного газа на глубину проплавления основного металла при дуговой наплавке плавящимся электродом ($\varnothing 1,2$ мм, постоянный ток обратной полярности силой 250 А, наплавка без предварительного подогрева со скоростью 40 см/мин)



плавки (рис. 33). Поэтому задача получения наплавленного металла с заданными свойствами требует тщательного выбора состава защитного газа.

Наплавка вольфрамовым электродом в среде инертного газа характеризуется тем, что дуга, за счет теплоты которой происходит плавление наплавочного присадочного металла, возникает между основным металлом и вольфрамовым электродом. Процесс аргонодуговой наплавки, сходный с газовой наплавкой, протекает в условиях подачи наплавочного прутка и его плавления дугой. Применение механизированных средств подачи наплавочного материала с постоянной скоростью позволяет осуществлять наплавку в автоматическом или полуавтоматическом режиме.

Применение инертного газа исключает необходимость использования флюса, поэтому данный способ особенно эффективен при наплавке цветных металлов, высоколегированных сталей и других материалов, чувствительных к окислению и азотированию. Высокое качество наплавленного металла обеспечивается при широком выборе наплавочных материалов. Стабильная дуга колоколообразной формы образуется в широком диапазоне силы тока, что обеспечивает спокойное формирование сварочной ванны и ровный валик наплавленного металла с гладкой поверхностью. Этот способ уступает наплавке плавящимся электродом по производительности из-за высокой концентрации энергии и низкой эффективности использования теплоты дуги.

4.7. ПРОЧИЕ СПОСОБЫ НАПЛАВКИ

Электрошлаковая наплавка. Наплавка этим способом протекает в условиях непрерывной подачи электродной проволоки (или ленты) внутри слоя расплавленного шлака, а плавление их происходит за счет теплоты электросопротивления при пропускании тока между основным металлом и электродом.

Электрошлаковая наплавка обладает следующими преимуществами: 1) экономичность наплавки возрастает при увеличении толщины наплавляемого слоя (применение многоэлектродных головок обеспечивает наплавку слоя большой толщины без сущест-

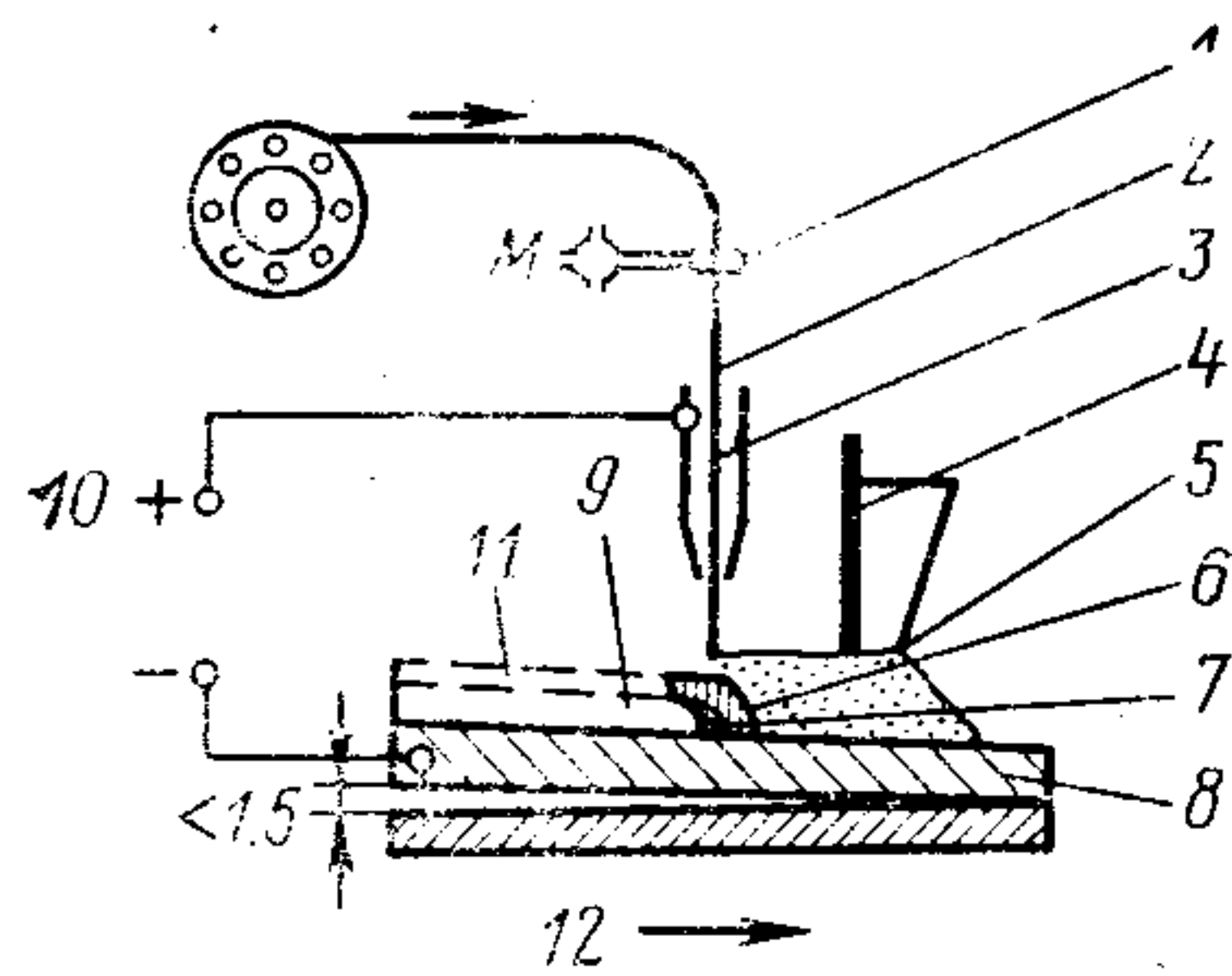


Рис. 34. Схема электрошлаковой наплавки ленточным электродом в нижнем положении:

1 — ролик подачи электрода; 2 — ленточный электрод; 3 — мундштук (токоподвод); 4 — бункер для флюса; 5 — наплавочный флюс; 6 — жидкий шлак; 7 — ванна жидкого металла; 8 — основной металл; 9 — наплавленный металл; 10 — источник питания; 11 — затвердевшая шлаковая корка; 12 — направление наплавки

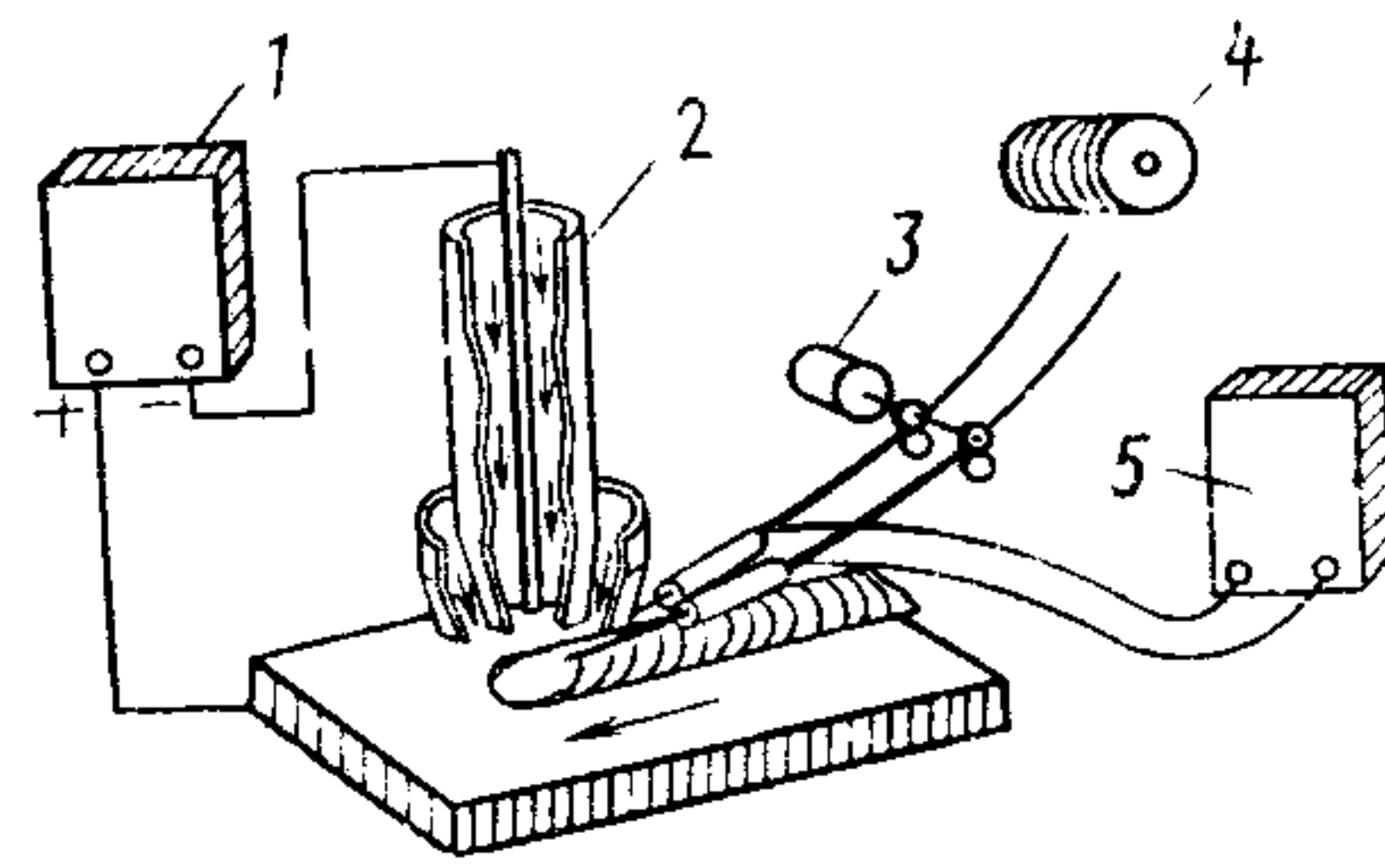


Рис. 35. Схема плазменной наплавки:

1 — источник питания постоянного тока; 2 — плазменная горелка; 3 — электродвигатель для подачи проволоки; 4 — наплавочная проволока; 5 — источник переменного тока для подогрева проволоки

венного увеличения продолжительности наплавки); 2) меньше расход шлака, чем при дуговой наплавке под флюсом; 3) возможность наплавки высокоуглеродистых и других материалов, обладающих высокой чувствительностью к образованию трещин, что обеспечивается низкой скоростью охлаждения наплавленного металла; 4) относительная простота процесса наплавки, особенно при использовании расходуемого наконечника.

Электрошлаковую сварку осуществляют обычно в вертикальном положении сварного шва, однако в последнее время разработан способ электрошлаковой наплавки в нижнем положении с использованием ленточных электродов, как показано на рис. 34 [7].

Плазменная наплавка. Наплавка этим способом включает возникновение между основным металлом и электродом горелки (катодом) электрической дуги, обеспечивающей переход в плазменное состояние рабочего газа, подаваемого в зону дуги. При этом из сопла горелки истекает высокотемпературная плазменная струя, обеспечивающая плавление наплавочного материала.

На рис. 35 схематически показана плазменная наплавка нагретой наплавочной проволокой [7]. При наплавке этим способом две проволоки, последовательно подключенные к источнику питания переменного тока подаются с постоянной скоростью в сварочную ванну под плазменной горелкой, где происходит их быстрое расплавление под действием теплоты плазмы в сочетании с нагревом электросопротивлением самих проволок при пропускании переменного тока. Для образования плазмы используют смесь гелия (75%) с аргоном (25%), а в качестве защитного газа применяют аргон, защищающий сварочную ванну и кристаллизирующийся наплавочный металл позади плазменной горелки от действия окружающего воздуха. При наплавке в условиях поперечных колеба-

ний плазменной горелки получают валик шириной до 64 мм. В качестве наплавочного материала используют коррозионно-стойкую сталь, никель и его сплавы, сплавы меди и др. При наплавке проволокой диаметром 2,4 мм получают слой толщиной до 6,5 мм.

В практике наплавки применяют способ, сочетающий в себе плазменную наплавку с дуговой наплавкой плавящимся электродом в среде инертного газа [8]. При этом электрод плазменной горелки и обычный металлический электрод соединяют с противоположной полярностью, и при силе тока выше 300 А столбчатая дуга превращается во вращающуюся, что обеспечивает наплавку валика шириной 40 мм при глубине проплавления основного металла менее 1 мм.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАПЛАВКИ

В настоящей главе рассмотрены теоретические вопросы наплавки, в том числе влияние тепловложения процесса наплавки на свойства наплавляемых изделий, проблемы сварочной металлургии при наплавке в различных средах разными способами, влияние скорости охлаждения на свойства наплавленного металла и изменения их при последующей термообработке.

5.1. ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ И НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Любые меры, направленные на снижение глубины проплавления основного металла при наплавке, не могут полностью устранить его влияние на состав и свойства металла наплавленного слоя. При наличии большого разнообразия составов основного металла задача сведения до минимума его влияния на наплавленный металл требует знания свойств и состава подвергаемых наплавке материалов.

Виды основного металла. Наплавке подвергают основной металл самых разнообразных классов и видов, включая стали углеродистую, низколегированную, литую, высокомарганцовистую аустенитную, коррозионно-стойкую и др. В табл. 5.1 приведены данные, относящиеся к типичным маркам углеродистой и низколегированной стали.

Углеродистая и низколегированная стали обладают вполне удовлетворительной пластичностью и вязкостью, однако высокий уровень их углеродного эквивалента требует применения при наплавке предварительного подогрева как средства предотвращения образования в них трещин. В связи с большим многообразием стальных отливок нет единых рекомендаций, относящихся к их наплавке, однако при выборе режимов предварительного подогрева и наплавки необходимо учитывать толщину заготовок, размер кристаллического зерна и наличие ликвации основного металла.

Высокомарганцовистая аустенитная сталь, свойства которой рассмотрены в гл. 3, содержит 0,9—1,3% С и 11—14% Мп. Японский промышленный стандарт G5131 в зависимости от состава определяет пять марок этой стали, предназначенных для упрочнения деталей щековых дробилок, рельсовых крестовин и других деталей, работающих при высокой ударно-динамической нагрузке.

5.1. Типичные марки углеродистой и низколегированной стали, подвергаемой наплавке

Сталь	Марка, состав
Конструкционная машиностроительного назначения (G4051)*	S45C (0,45% С и 0,75% Мп)
Хромоникелевая (G40102)	SNC1 (0,36% С; 0,65% Мп; 1,25% Ni и 0,7% Cr)
Хромоникелемолибденовая (G4103)	SNCM1 (0,31% С; 0,75% Мп; 1,8% Ni; 0,8% Cr и 0,2% Mo)
Хромистая (G4104)	SCr4 (0,4% С; 0,7% Мп и 1,15% Cr)
Хромомолибденовая (G4105)	SCM3 (0,35% С; 0,7% Мп; 1,15% Cr и 0,2% Mo)
Конструкционная машиностроительного назначения (G4106), в том числе: марганцовистая хромомарганцовистая	SMn1 (0,33% С и 1,35% Мп) SMnC (0,43% С; 1,5% Мп и 0,5% Cr)
Марганцевомолибденовая и марганцевомолибденоникелевая для сосудов высокого давления (G3120)	SQV2A (до 0,25% С; 1,3% Мп; 0,5% Ni и 0,5% Mo)
Хромомолибденовая для котлов и сосудов высокого давления (G4109)	SCMV2 (до 0,15% С; 0,45% Мп; 2,25% Cr и 1,0% Mo)
Стальной прокат для сварных конструкций (G3106)	SM41A (до 0,25% С и 0,7% Мп)

* Здесь и ниже в скобках указан японский промышленный стандарт.

Низкая теплопроводность этой стали и высокий коэффициент линейного расширения (в 1,5 раза больше, чем для низкоуглеродистой стали) создают опасность растрескивания при наплавке.

При большом разнообразии составов коррозионно-стойкой стали по структурному признаку ее можно разделить на пять следующих групп, аустенитная (SUS304, 316, 347, 310 и др.); мартенситная (SUS410 и др.); ферритная (SUS430, 405 и др.); аустенитно-ферритная (SUS329j1 и др.); дисперсионно-упрочняемая (SUS631 и др.).

Аустенитная коррозионно-стойкая сталь обладает высокими сварочно-технологическими свойствами, однако она склонна к деформации при сварке, поскольку ее коэффициент линейного расширения в 1,5 раза больше, а теплопроводность в 3 раза меньше, чем для низкоуглеродистой стали. Для предотвращения охрупчивания

при наплавке рекомендуется снижать температуры ее предварительного подогрева и разогрева (между проходами).

Мартенситная коррозионно-стойкая сталь, обладая закаливемостью, отличается низкой свариваемостью; при высоком содержании углерода сварка этой стали становится невозможной из-за интенсивного растрескивания.

Ферритная коррозионно-стойкая сталь, не склонная к закалке при охлаждении на воздухе, может подвергаться сварке, однако из-за склонности к охрупчиванию по причине укрупнения кристаллического зерна при температуре выше 900°C при наплавке этой стали происходит охрупчивание зоны термического влияния, которое, однако, можно предотвратить путем предварительного подогрева (100—200°C) и ограничения погонной энергии. Во время длительной выдержки при температуре 400—500°C эта сталь подвержена охрупчиванию (при 475°C), что выражается в значительном снижении относительного удлинения металла при нормальной температуре.

Свариваемость основного металла. При наплавке углеродистой и низколегированной стали углеродный эквивалент используют как показатель, выражающий свариваемость. Углеродный эквивалент, для расчета которого предложен ряд уравнений, согласно японскому промышленному стандарту определяют по уравнению

$$C_s = C + 1/6 Mn + 1/24 Si + 1/40 Ni + 1/5 Cr + 1/4 Mo + 1/14 V. \quad (5.1)$$

В зоне, примыкающей к наплавленному слою, происходит изменение свойств основного металла под влиянием теплоты процесс наплавки. В этой зоне, называемой зоной термического влияния, металл имеет максимальную твердость и наибольшую чувствительность к трещинам. Повышение углеродного эквивалента основного металла сопровождается максимальным повышением твердости в зоне термического влияния. Поэтому при наплавке углеродистой и низколегированной сталей углеродный эквивалент служит показателем, используемым для оценки сварочных свойств основного металла, а также для выбора режима предварительного подогрева.

Между углеродным эквивалентом и максимальной твердостью в зоне термического влияния существует практически линейная зависимость, выражаемая уравнением, выведенным для случая наплавки листа толщиной 20 мм покрытыми электродами диаметром 4 мм ($I=170$ А, $v_n=15$ см/мин) [1]:

$$H_{max} = (660C_s + 40) \pm 40, \quad (5.2)$$

где H_{max} — максимальная твердость в зоне термического влияния по Виккерсу (нагрузка 100 Н); C_s — углеродный эквивалент.

Джексон предложил следующий режим предварительного подогрева деталей из указанных сталей для разной максимальной твердости в зоне термического влияния.

Изложенное выше относится к проблеме появления трещин за-

Максимальная твердость в зоне термического влияния	Температура подогрева
До HV 200 HV 200—250 HV 250—325 Выше HV 325	Без подогрева По необходимости Выше 150°C Выше 250°C

медленного разрушения. При наплавке в большинстве случаев проблему составляет предотвращение образования горячих трещин, механизм возникновения которых состоит в следующем. Во время кристаллизации наплавленного металла на границах кристаллического зерна образуется легкоплавкий расплав (эвтектика), наличие которого на границах зерна становится причиной разрушения металла под влиянием усадочной деформации. Для оценки чувствительности к горячим трещинам Уилкинсон предложил показатель Н.С.С. (склонность к горячим трещинам), рассчитываемый по уравнению

$$H.C.S. = \frac{C(S + P + Si/25 + Ni/100)}{3Mn + Cr + Mo + V} \cdot 10^3. \quad (5.3)$$

На рис. 36 показано соотношение между значениями показателя Н.С.С. и возникновением горячих трещин [4]. При $H.C.S. < 1,7$ трещины не возникают. Условием возникновения горячих трещин при наплавке является $H.C.S. > 2$ (известно, что при обычной сварке низколегированной стали трещины начинают возникать при $H.C.S. = 4$).

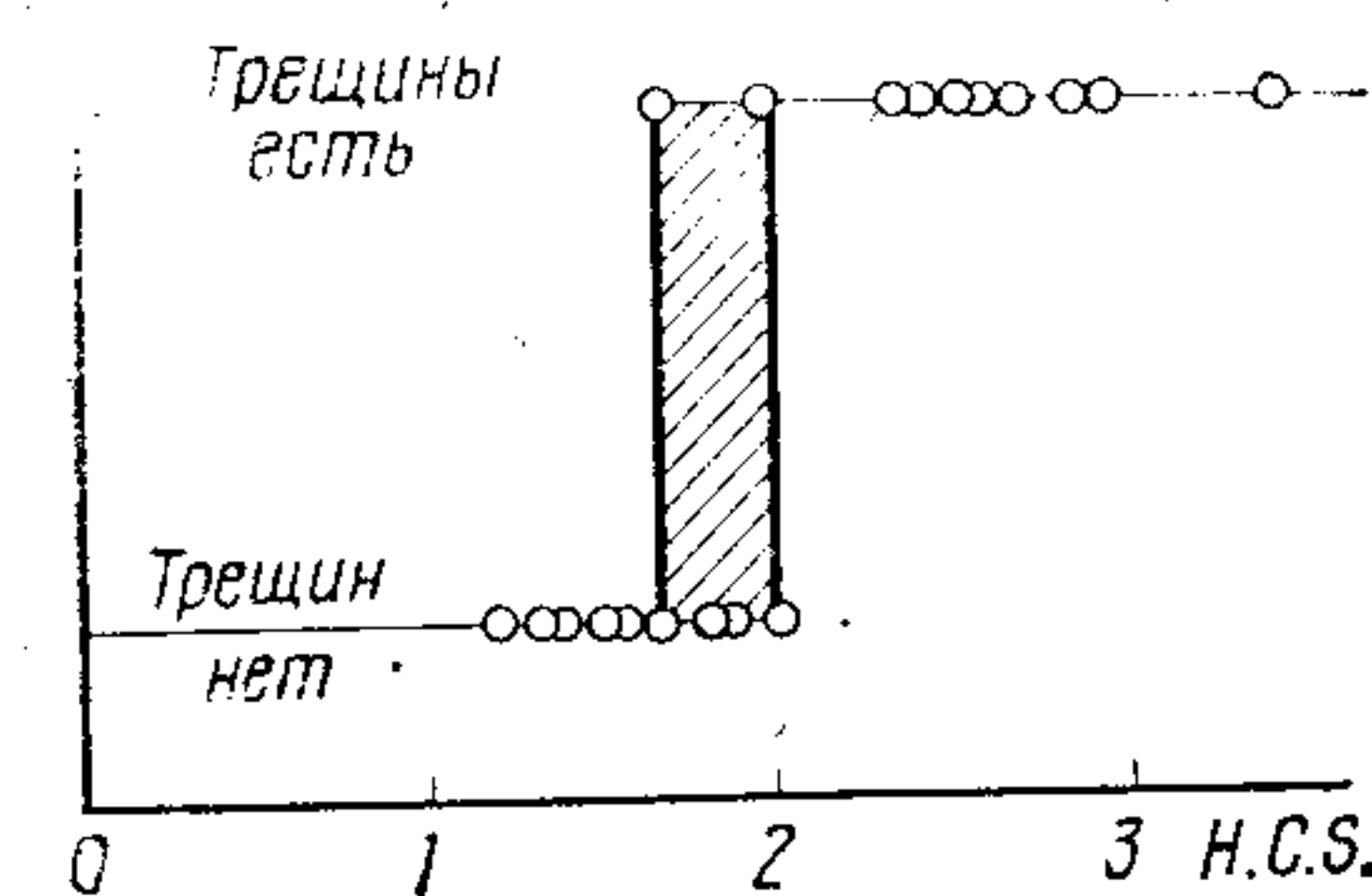


Рис. 36. Диаграмма: склонность к горячим трещинам (показатель Н.С.С.) — наличие трещин (наплавка под флюсом порошковой проволокой $\varnothing 4,8$ мм током 500—600 А со скоростью 40—45 см/мин, температура разогрева наплавленного металла 150—350°C, четыре слоя за четыре прохода)

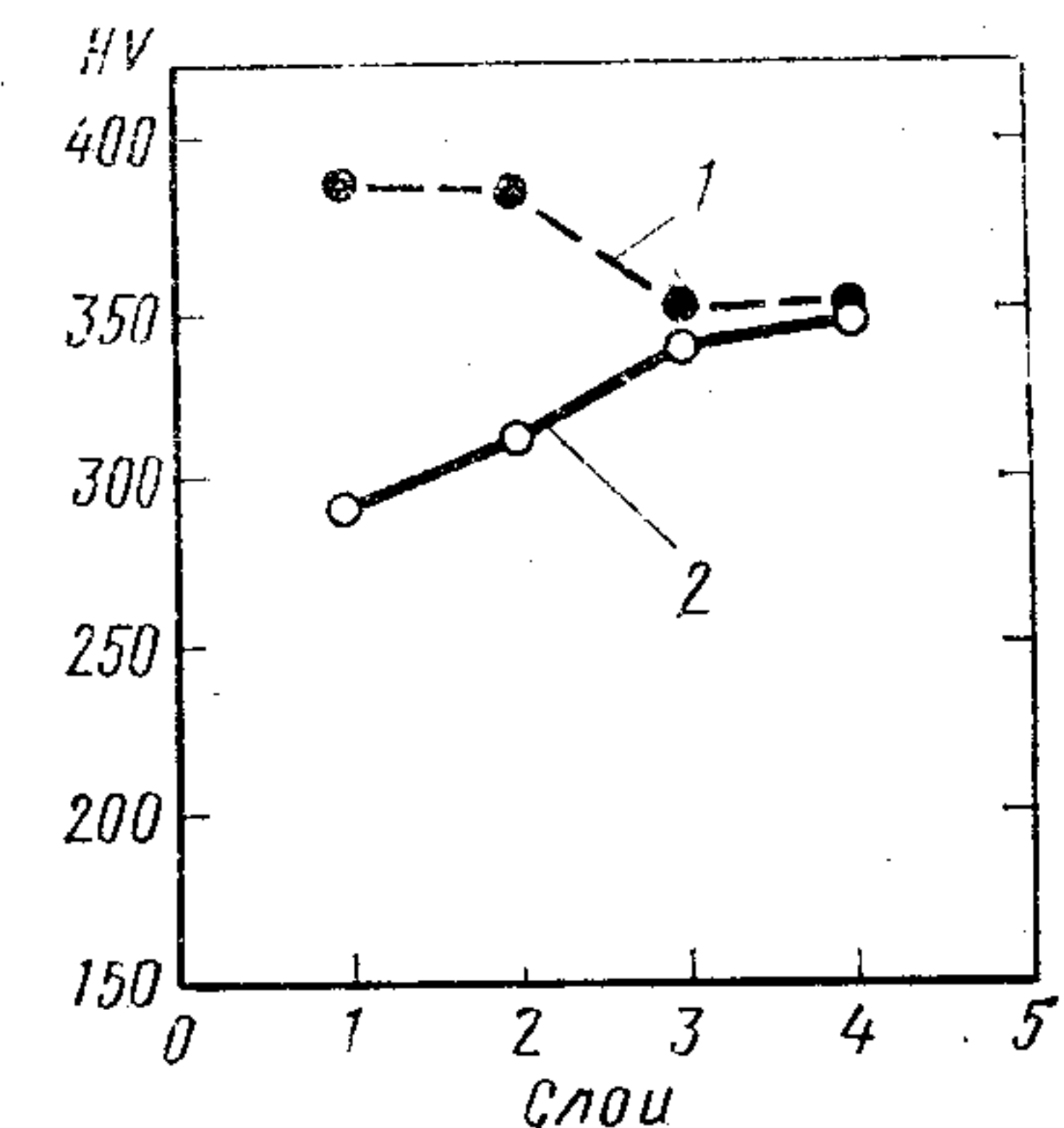


Рис. 37. Влияние основного металла на твердость наплавленного слоя (наплавка в среде углекислого газа порошковой проволокой $\varnothing 3,2$ мм, расход CO_2 — 20 л/мин, сила тока 400 А, напряжение 26 В, скорость наплавки 40 см/мин):

1 — среднеуглеродистая сталь S45C; 2 — низкоуглеродистая сталь SM41

Состав и твердость наплавленного металла. Основной металл оказывает существенное влияние на состав и твердость наплавленного металла. В частности, составы первого и второго слоев, наплавленных порошковой проволокой в среде углекислого газа на подложку из низкоуглеродистой стали, отличаются от составов соответствующих слоев, наплавленных такой же проволокой при тех же условиях на подложку из среднеуглеродистой стали, что проявляется в различии твердости этих слоев. Согласно рис. 37, первый слой металла, наплавленного на сталь S45C, имеет твердость выше некоторого заданного уровня $HV\ 350$, соответствующего неразбавленному наплавленному металлу, а при наплавке на низкоуглеродистую сталь твердость первого слоя не превышает $HV\ 300$, т. е. находится ниже заданного уровня. Влияние основного металла на твердость наплавленного металла перестает сказываться только с третьего слоя.

Состав n -го слоя наплавленного металла можно рассчитать по уравнению

$$C_w = C_f + (P/100)^n (C_p - C_f), \quad (5.4)$$

где C_w — содержание элемента в n -м слое наплавленного металла, %; C_f — содержание элемента в неразбавленном металле, %; C_p — содержание элемента в основном металле; n — число наплавленных слоев; P — степень проплавления, %; $P = [A/(A+B)] 100$; A — площадь наплавленного металла по сечению валика; B — площадь участка проплавления основного металла по сечению валика.

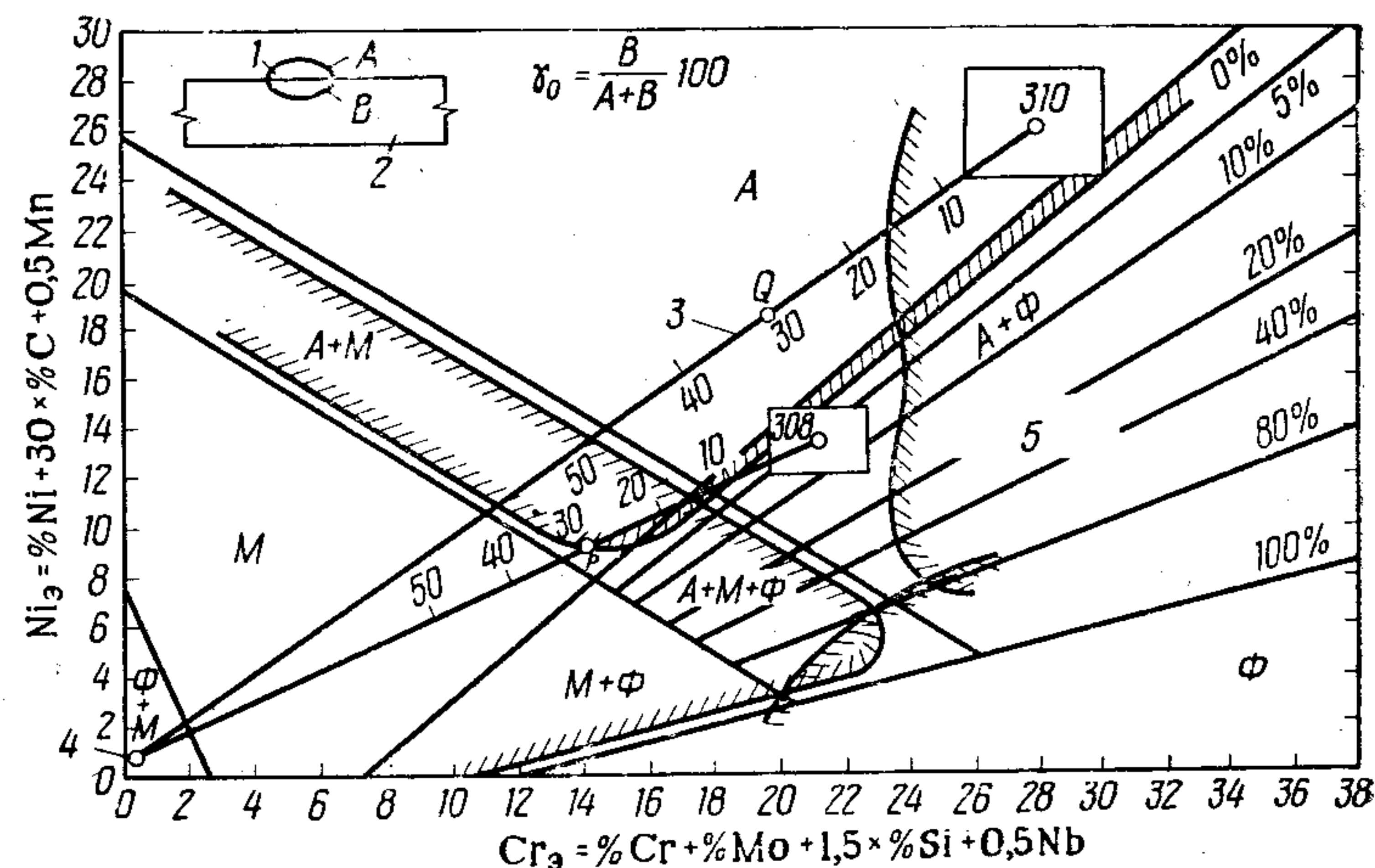


Рис. 38. Структурная диаграмма Шеффлера:

1 — валик; 2 — основной металл; 3 — линия, отражающая разбавление наплаваемого металла основным; 4 — низкоуглеродистая сталь; 5 — область охрупчивания, образование σ -фазы; М — мартенсит, холодные трещины при температуре ниже 400°C (необходим предварительный подогрев); А — аустенит, горячие трещины при 1250°C ; Ф — феррит, укрупнение кристаллического зерна и охрупчивание при температуре выше 1150°C , повышение чувствительности к надрезам при нормальной температуре

Структурная диаграмма Шеффлера. При наплавке коррозионно-стойкой стали на низкоуглеродистую или низколегированную сталь структура наплавленного металла может быть определена с помощью диаграммы Шеффлера, представленной на рис. 38 [5]. Линии с косыми штрихами на рисунке ограничивают области возникновения трещин или охрупчивания под влиянием термообработки. Следовательно, материалы и режим наплавки необходимо выбирать с ориентацией на треугольную область диаграммы Шеффлера, ограниченную значениями хромового эквивалента в пределах 18—24% и никелевого эквивалента в пределах 7—18%. Как показано на рис. 38, при наплавке на низкоуглеродистую сталь коррозионно-стойкой стали D308 (с долей основного металла в наплавленном 30%) структура наплавленного слоя, соответствующая точке P , состоит из смеси аустенита с мартенситом. При образовании такой структуры существует опасность возникновения трещин. Для того чтобы при наплавке на низкоуглеродистую сталь получить наплавленный металл, полностью соответствующий составу коррозионно-стойкой стали D308, наплавку необходимо выполнять сталью D309 с более высоким содержанием легирующих элементов (25% Cr и 12% Ni). В связи с этим при наплавке разнородного (по отношению к материалу подложки) металла часто прибегают к наплавке подслоя из стали D309.

Переход углерода. Важнейшая проблема, возникающая при наплавке коррозионно-стойкой стали на низколегированную, состоит в том, что при последующей длительной термообработке на границе между основным и наплавленным металлом образуется хрупкий науглероженный слой, который становится причиной возникновения трещин при испытаниях на боковой изгиб. Микроструктура на участке этого граничного слоя показана на рис. 39. Верхняя часть снимка соответствует слою, наплавленному аустенитной коррозионно-стойкой сталью, горизонтальная темная полоса в середине — граничный слой с повышенной концентрацией углерода, возникающий в результате его диффузии из основного металла при термообработке. В основном металле непосредственно под науглероженным слоем обычно возникает обезуглероженный слой.

Возникновение науглероженного слоя связано с диффузией углерода из состава основного металла в наплавленный металл, имеющий в составе элементы с большим химическим сродством к углероду. Это обусловлено большой разностью по содержанию углерода между основным и наплавленными металлами, а также разностью по содержанию в



Рис. 39. Микроструктура зоны сплавления наплавленного металла — (аустенитной коррозионно-стойкой стали) с основным металлом — низколегированной сталью

них карбидообразующих элементов (хрома, титана, ниобия). Содержание углерода в граничном науглероженном слое, зависящее от режима термообработки, состава основного и наплавленного металлов, часто превышает 2%.

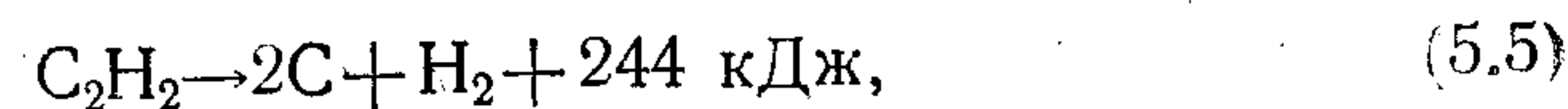
Тенденция к науглероживанию граничного слоя отчетливо является при использовании наплавочной стали D347, содержащей ниобий. В этом случае во избежание вредного воздействия длительной последующей термообработки следует наносить подслои из стали D309.

5.2. РОЛЬ СРЕДЫ ПРИ НАПЛАВКЕ

Газовая наплавка. В зависимости от состава горючей смеси ацетилено-кислородное пламя может быть науглероживающим, восстановительным (или нормальным) и окислительным.

Газовую наплавку стеллита и других материалов осуществляют обычно науглероживающим пламенем, хотя иногда, в частности при наплавке сплавом колмоной (системы Ni—Cr—V—Si), используют нормальное пламя, а при наплавке латуни или кремнистой бронзы (наплавку осуществляют с использованием флюса) необходимо применение даже слегка окислительного пламени.

При наплавке восстановительным и науглероживающим пламенем свободный углерод, выделяющийся по реакции (5.5), оседает на поверхности основного металла, вызывая запотевание:



Повышение содержания углерода в наплавленном металле за счет его осаждения на поверхности при газовой наплавке вызывает снижение коррозионной стойкости, относительного удлинения и других механических свойств. В таких случаях вместо газовой используют аргонодуговую наплавку вольфрамовым электродом.

Дуговая наплавка. При дуговой наплавке покрытыми электродами или автоматической наплавке под флюсом электродное покрытие или флюс превращаются в шлак, химическое взаимодействие которого с металлом ванны обеспечивает его рафинирование, кроме того, шлак защищает ванну от загрязнения окружающим воздухом.

Рафинирующая способность шлака зависит от его основности. Существуют разнообразные формы выражения основности сварочного флюса-шлака, из которых две, принятые в области сварки (наплавки), представлены ниже уравнениями (5.6) и (5.7).

Уравнение Мори:

$$B_L = \sum d_i N_i, \quad (5.6)$$

где B_L — основность; d_i — постоянная; N_i — мольная доля компонентов состава. Ниже приведены значения постоянной:

Оксиды	CaO	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	FeO
d_i	6,05	-6,31	-4,97	-0,2	4,8	4	3,4

$$\text{Основность} = \frac{CaO \text{ (моль \%)} + MgO \text{ (моль \%)} + MnO \text{ (моль \%)}}{SiO_2 \text{ (моль \%)} + Al_2O_3 \text{ (моль \%)}} \quad (5.7)$$

По результатам расчета с использованием приведенных выше уравнений можно выделить три группы флюсов: основные, нейтральные и кислые. Флюсы с основностью ~ 1 относятся к нейтральным, с основностью > 1 — к основным и с основностью < 1 — к кислым (отрицательные значения в уравнении Мори). Основные флюсы образуют шлак с сильной раскислительной способностью, обеспечивают получение наплавленного металла с незначительным содержанием примесей при хорошем выходе по углероду, марганцу и хрому. Кислые флюсы с высоким содержанием двуокиси кремния обеспечивают повышение содержания кремния в наплавленном металле, восстанавливаемого в процессе наплавки из кремнезема шлака. Вместе с тем кислые флюсы, обеспечивая образование шлака оптимальной вязкости, улучшают внешний вид наплавленного валика. Преимущество кислых флюсов связано с уменьшением содержания диффузионного водорода в наплавленном металле.

Кроме рафинирования металла и влияния на формирование валика роль шлака состоит в предотвращении чрезмерно быстрого охлаждения наплавленного металла, в обеспечении его отжига.

Защитные газы (углекислый газ, аргон, гелий и др.) оказывают различное влияние на легирование металла шва. На рис. 40 показана зависимость содержания углерода в металле, наплавленном в среде углекислого газа и его смеси с аргоном проволоками из низкоуглеродистой и аустенитной сталей, от содержания углерода

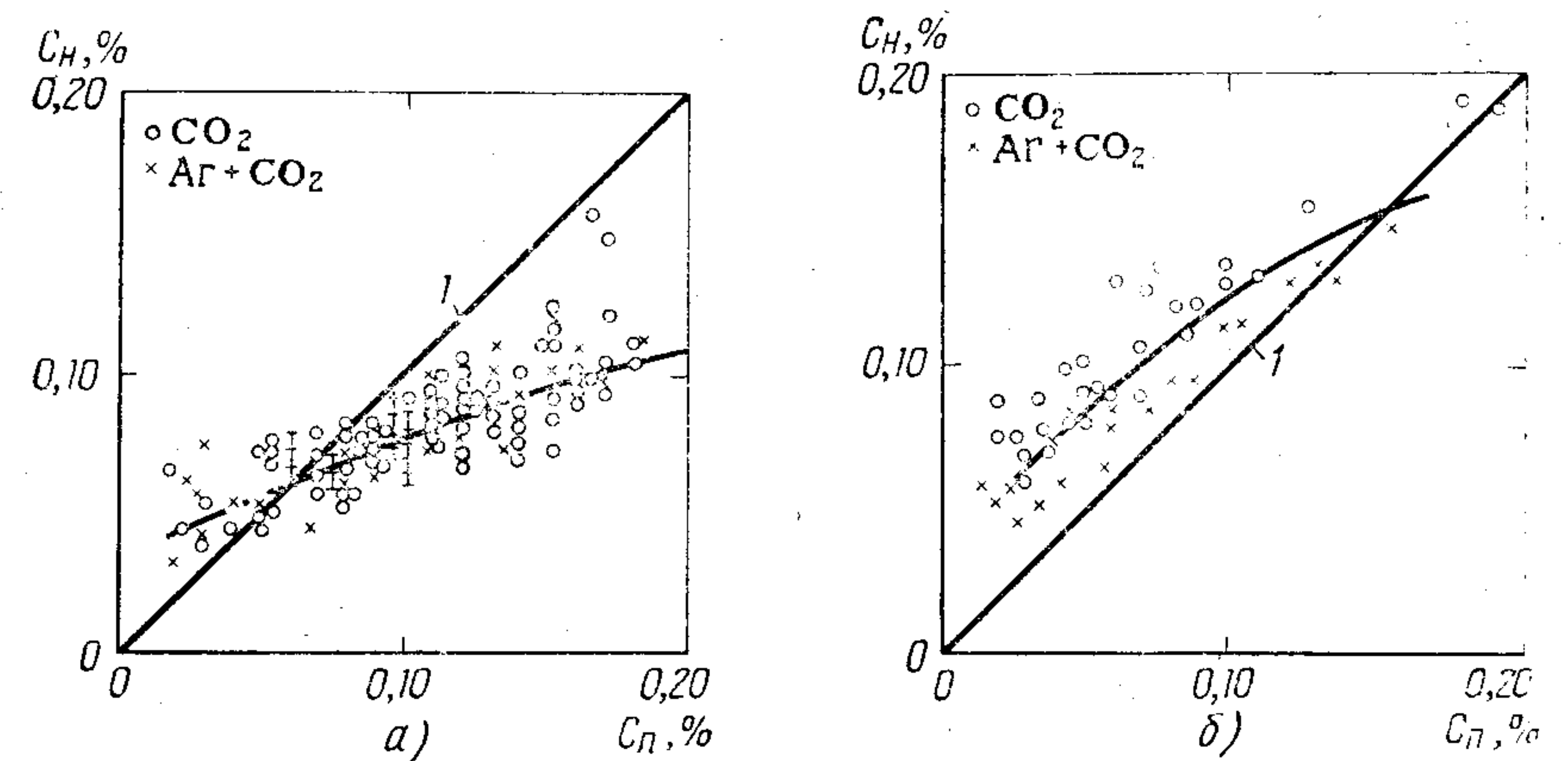


Рис. 40. Изменение содержания углерода в металле, наплавленном (C_n) в среде углекислого газа и его смеси с аргоном, в зависимости от содержания углерода в проволоке (C_p):

1 — данные Бентали; а — низкоуглеродистая сталь; б — аустенитная хромоникелевая сталь типа 25-20

5.3. Режимы термообработки, установленные японским промышленным стандартом для деталей из углеродистой и низколегированной сталей после антикоррозионной наплавки

Режим термообработки	Первая технологическая схема	Вторая технологическая схема
Температура выдержки, °С	625 ± 25	700 ± 25
Продолжительность выдержки, ч *	Не менее 1 × T/25	Не менее 2 × T/25
Скорость нагрева и охлаждения, °С/ч *	≤ 200 × 25/T	
Металл, подвергаемый термообработке	Стальной прокат общего конструкционного назначения (G3101) ** и другие углеродистые стали	Конструкционная высокопрочная углеродистая сталь, стальные отливки низколегированной хромомолибденовой стали (G5111) ** и другие низколегированные стали

* T — максимальная толщина наплавленного слоя на участке нагрева, мм.
 ** В скобках указан японский промышленный стандарт.

На практике применяют следующие виды последующей термообработки:

1) отжиг для снятия напряжений; низкотемпературный отжиг (или высокотемпературный отпуск) для снятия возникающих при наплавке остаточных напряжений и устранения образующихся закалочных структур включает нагрев и выдержку при определенной температуре ниже точки начала протекания структурных превращений;

2) отпуск; для достижения равномерного снижения твердости и повышения обрабатываемости наплавленного металла резанием необходим нагрев до температуры превращения неравновесной структуры в более равновесную (ниже точки A_{c1}) с последующим медленным охлаждением;

3) закалку; для повышения твердости наплавленного металла осуществляют последующую термообработку в виде быстрого охлаждения от температуры аустенитизации. По способу охлаждения выделяют закалку в воде, горячей среде, солях и на воздухе, а по способу нагрева — закалку газовым пламенем и ТВЧ. Газопламенную закалку, осуществляемую с применением прямого нагрева пламенем, используют для поверхностной закалки любых изделий, в том числе изделий, подвергнутых износостойкой наплавке;

4) отпуск на дисперсионное твердение; отпуск включает нагрев до заданной температуры ниже точки A_{c1} с последующим замедленным охлаждением. В процессе выдержки при указанной температуре протекают структурные превращения (распад пересыщенного твердого раствора с выделением дисперсных избыточных интерметаллидных фаз), что способствует стабилизации неравновесной структуры и приданию ей требуемых свойств.

Для упрочнения углеродистых сталей чаще всего применяют закалку, обеспечивающую повышение твердости путем фиксации пересыщенного твердого раствора углерода: при быстром охлаждении аустенита углерод не успевает выделиться из твердого раствора с образованием цементита. Твердость, полученная при

закалке, зависящая от содержания углерода [8], достигает максимального значения при его содержании более 0,6%. (рис. 43).

При закалке мартенситно-аустенитной и быстрорежущей стали повышение твердости ограничено высоким содержанием остаточного аустенита, однако во время отпуска при температуре 500—600°C происходит резкое повышение твердости этих сталей в связи с распадом остаточного аустенита и образованием карбидов. Это явление, называемое вторичным

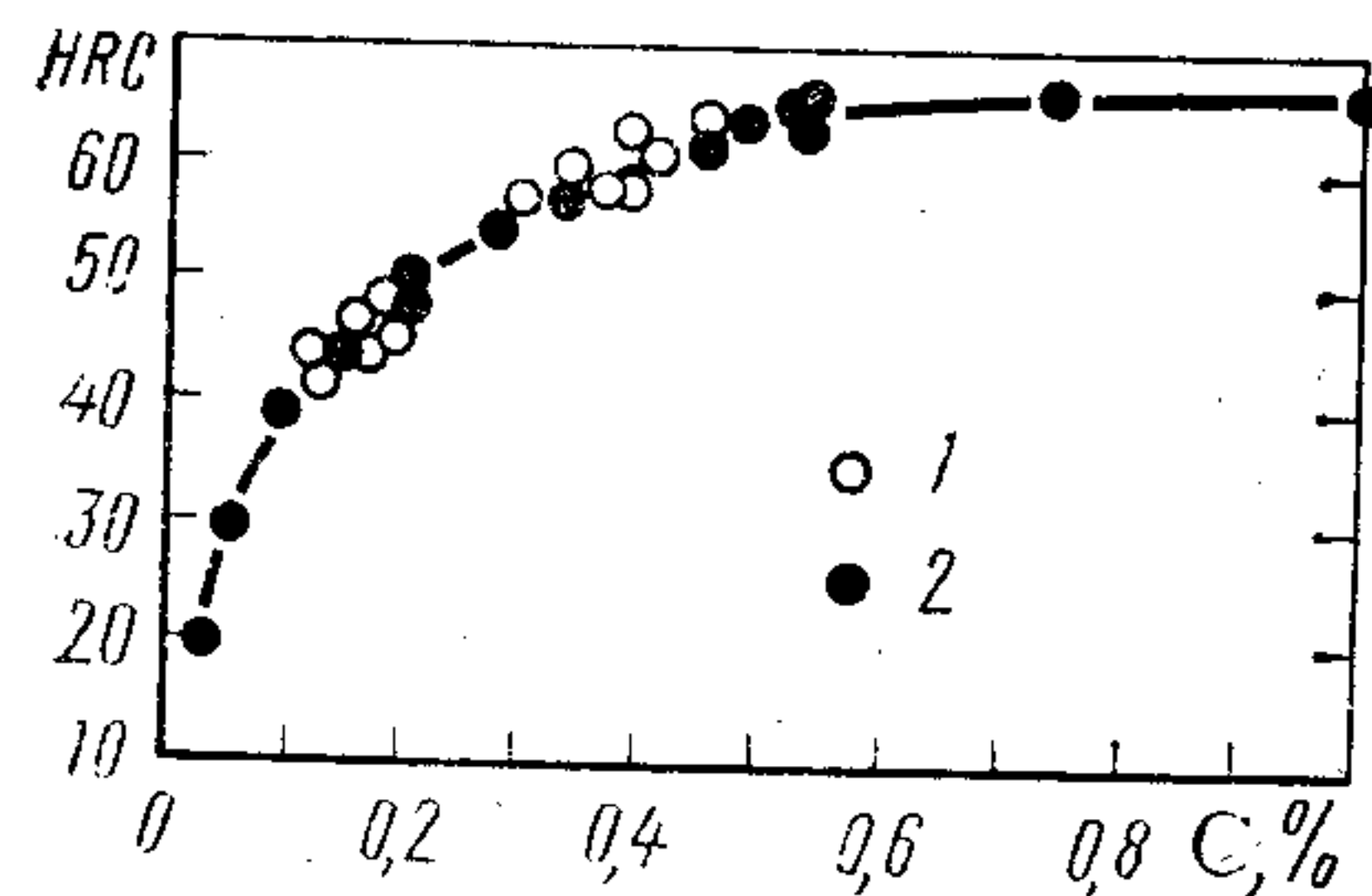


Рис. 43. Влияние содержания углерода в стали на ее максимальную твердость после закалки:

1 — легированная сталь; 2 — углеродистая сталь

твердением, используется для получения посредством термообработки высокой твердости после наплавки.

Термообработка после коррозионно-стойкой наплавки. Поскольку наплавку коррозионно-стойкой стали обычно выполняют на деталях из низкоуглеродистой или низколегированной стали, термообработку после наплавки осуществляют по режимам, принятым для основного металла (табл. 5.3).

Ниже рассмотрены проблемы, возникающие в случаях, когда коррозионно-стойкую сталь подвергают термообработке по режимам, принятым для низкоуглеродистой и низколегированной сталей.

1. Ферритная коррозионно-стойкая сталь. Нагрев и выдержка ферритной коррозионно-стойкой стали при температуре 700—900°C обеспечивает повышение вязкости. При этом охлаждение от 600°C рекомендуется проводить на воздухе. После отжига, проведенного для снятия напряжений по режиму, принятому для низколегированной стали, наплавленный металл имеет более высокую пластичность и ударную вязкость, чем в состоянии после наплавки (рис. 44) [9]. При температуре выше 900°C происходит снижение ударной вязкости металла из-за сильного укрупнения кристаллического зерна.

2. Аустенитная коррозионно-стойкая сталь. Наплавка аустенитной коррозионно-стойкой стали обеспечивает получение слоя металла, имеющего в исходном состоянии достаточные пластичность,

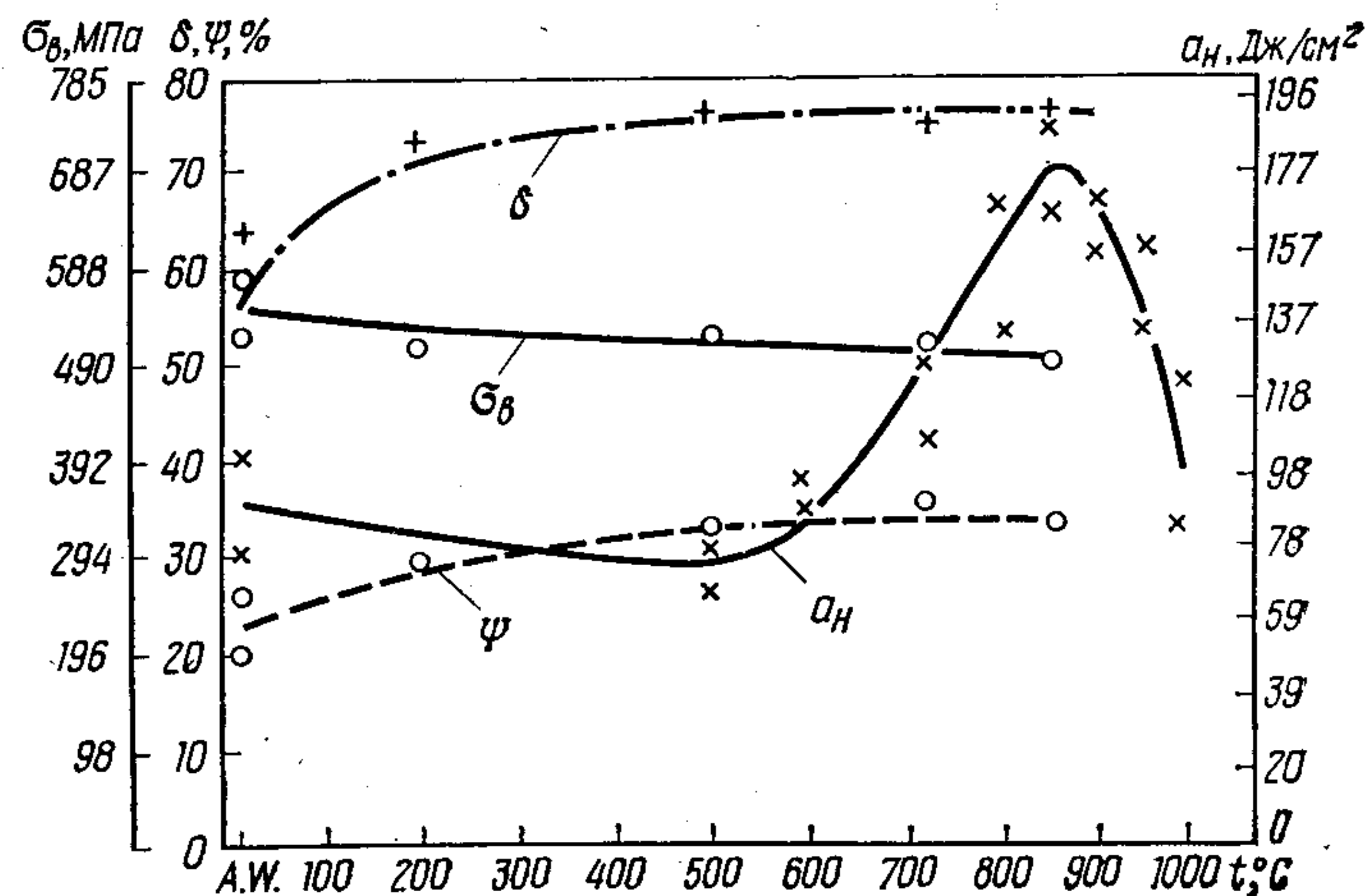


Рис. 44. Влияние температуры термообработки (выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе) на механические свойства наплавленной ферритной коррозионно-стойкой стали

ударную вязкость и коррозионную стойкость. Тем не менее термообработку после наплавки осуществляют и в данном случае с целью снятия остаточных напряжений. При этом возникает проблема охрупчивания и снижения коррозионной стойкости наплавленного металла вследствие образования σ -фазы и карбидов. σ -фаза представляет собой немагнитное интерметаллическое соединение железа с хромом, обладающее чрезвычайно высокой твердостью и хрупкостью. Эта фаза образуется обычно в высокохромистой ферритной стали, однако при длительном нагреве аустенитной стали, содержащей несколько процентов феррита, указанная фаза может возникать и в этой стали [10] (рис. 45).

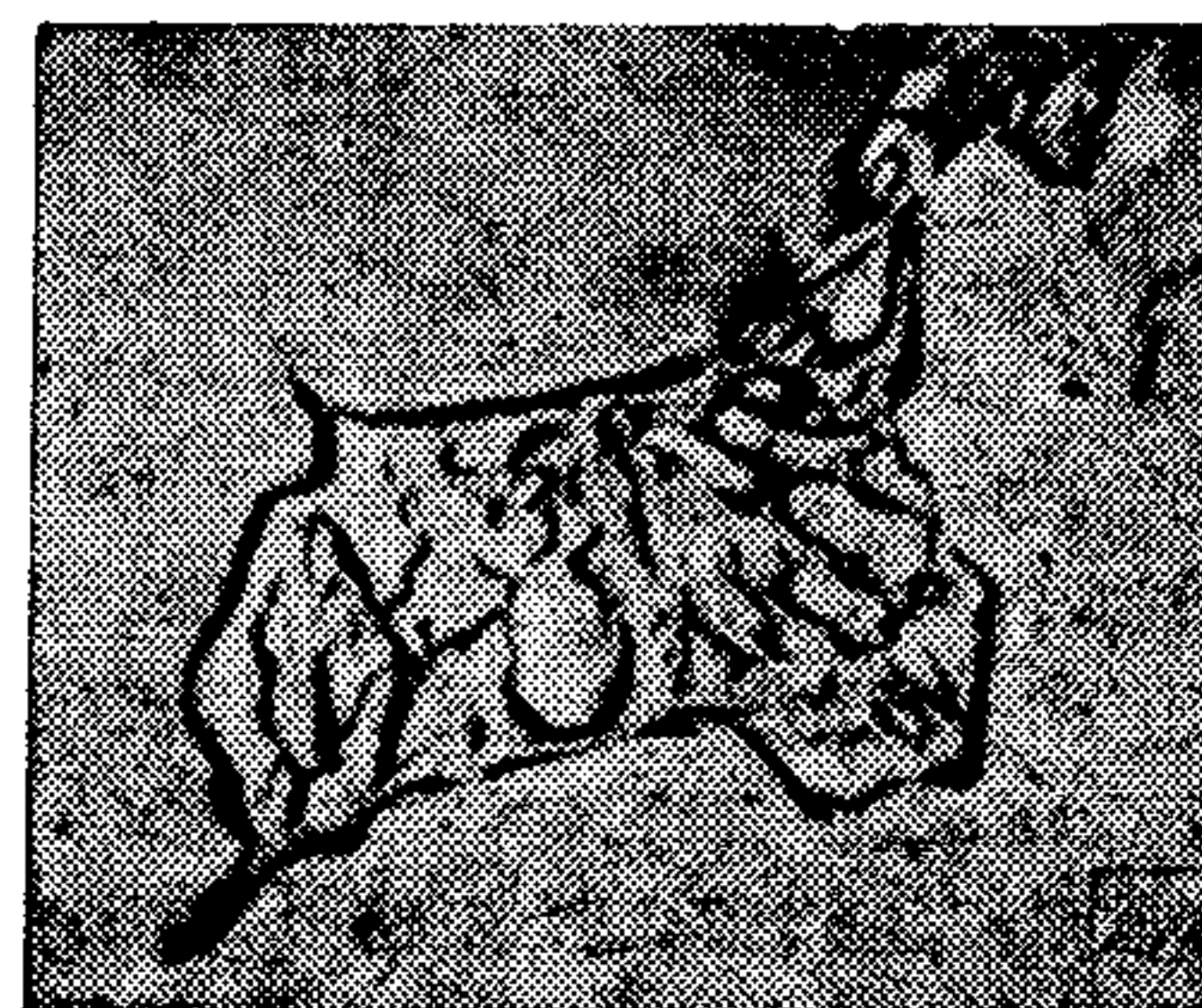


Рис. 45. σ -фаза в микроструктуре коррозионно-стойкой стали

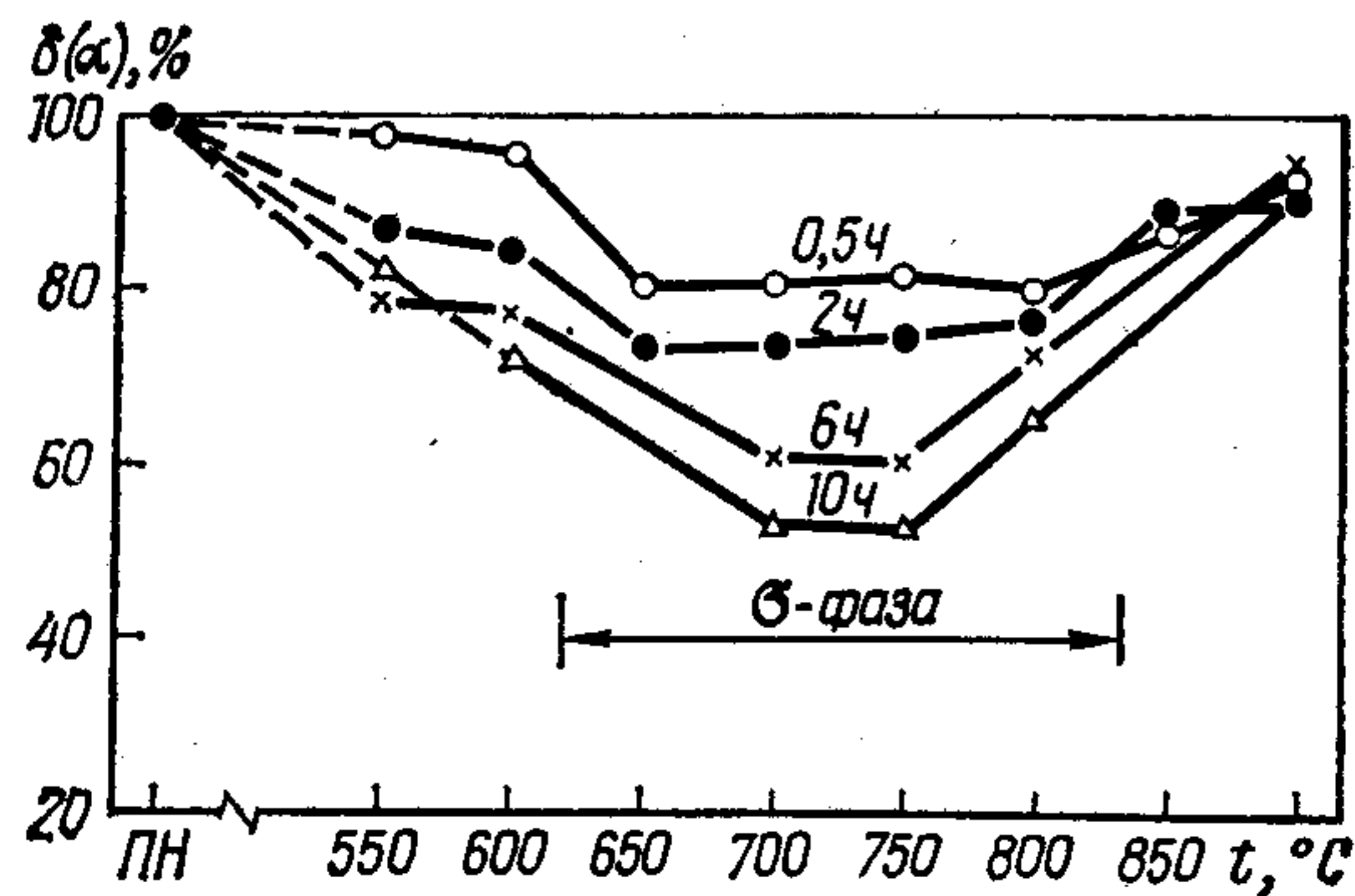
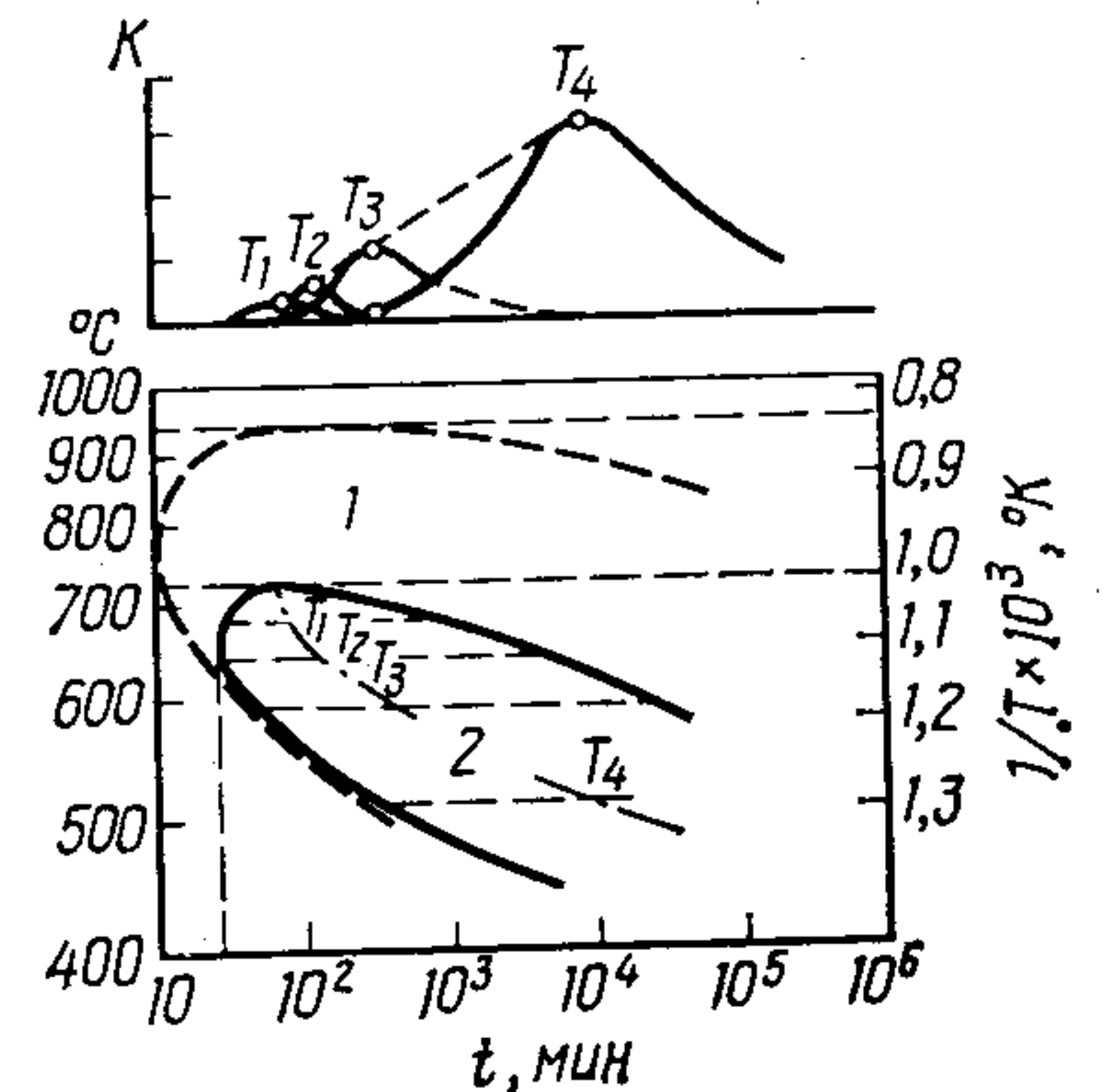


Рис. 46. Изменение содержания феррита в наплавленной аустенитной стали D347 в зависимости от режима последующей термообработки, ПН — после наплавки

Рис. 47. Диаграмма: температура (T) — время (t) — склонность к межкристаллитной коррозии; k — скорость коррозии, мм/200 ч для аустенитной коррозионно-стойкой стали типа 18Cr—9Ni (0,05% C):
1 — область образования карбида $M_{23}C_6$; 2 — область развития межкристаллитной коррозии



Образование σ -фазы при термообработке можно выявить не только микроструктурными исследованиями, но и путем измерения содержания феррита магнитометрическим методом (рис. 46) [10]. Таким образом, если аустенитный наплавленный металл содержит несколько процентов феррита, в целях предотвращения образования горячих трещин требуется последующая термообработка, однако ее продолжительность должна быть ограниченной во избежание охрупчивания металла из-за образования σ -фазы. При наплавке аустенитной стали 347 допустимая разность содержания феррита между состояниями после наплавки и после термообработки составляет не более 7% [11]. Допустимое содержание феррита в металле в исходном (после наплавки) состоянии для предотвращения образования горячих трещин находится в пределах 4—10%.

Образование карбидов при термообработке снижает коррозионную стойкость наплавленного металла. Кроме того, термообработка аустенитной стали при некоторых режимах может способствовать развитию межкристаллитной коррозии [12]. Эффективным средством, позволяющим заранее определить чувствительность аустенитной стали к этому виду коррозии при термообработке, может служить представленная на рис. 47 диаграмма¹, устанавливающая область появления у стали склонности к межкристаллитной коррозии и отображающая зависимость между температурой и продолжительностью нагрева.

Аустенитную коррозионно-стойкую сталь можно подвергать следующим видам термообработки:

1) термообработка на твердый раствор (аустенитизация) с обеспечением полного распада карбидов, растворения углерода в твердом растворе аустенита и образования чисто аустенитной структуры металла низкой твердости. Для полного протекания указанных процессов температуру обработки (1040—1120°C) следует повышать по мере увеличения содержания углерода в стали.

¹ Известна под названием диаграмма Роллансона (Прим. ред.).

ПРАКТИКА НАПЛАВКИ

Скорость охлаждения должна быть достаточно высокой, чтобы предотвратить образование карбидов по границам зерна;

2) стабилизирующий отпуск с целью образования стабильных карбидов (ниобия, тантала и титана) в продолжение 2—4 ч выдержки при температуре 850—900°C, т. е. выше температуры образования карбида хрома по границам зерна. Для предотвращения межкристаллитной коррозии наплавленного металла стабилизирующий отпуск совмещают с отпуском для снятия напряжений;

3) отпуск с целью снятия остаточных напряжений, возникающих при холодной деформации. При охлаждении от температуры отпуска необходимо учитывать возможность деформации изделия. Отпуск по режиму, принятому для углеродистой и низколегированной стали, не обеспечивает полного снятия напряжений в аустенитной коррозионно-стойкой стали, которую поэтому подвергают отпуску при температурах не ниже 900°C.

6.1. ПОДГОТОВКА К НАПЛАВКЕ

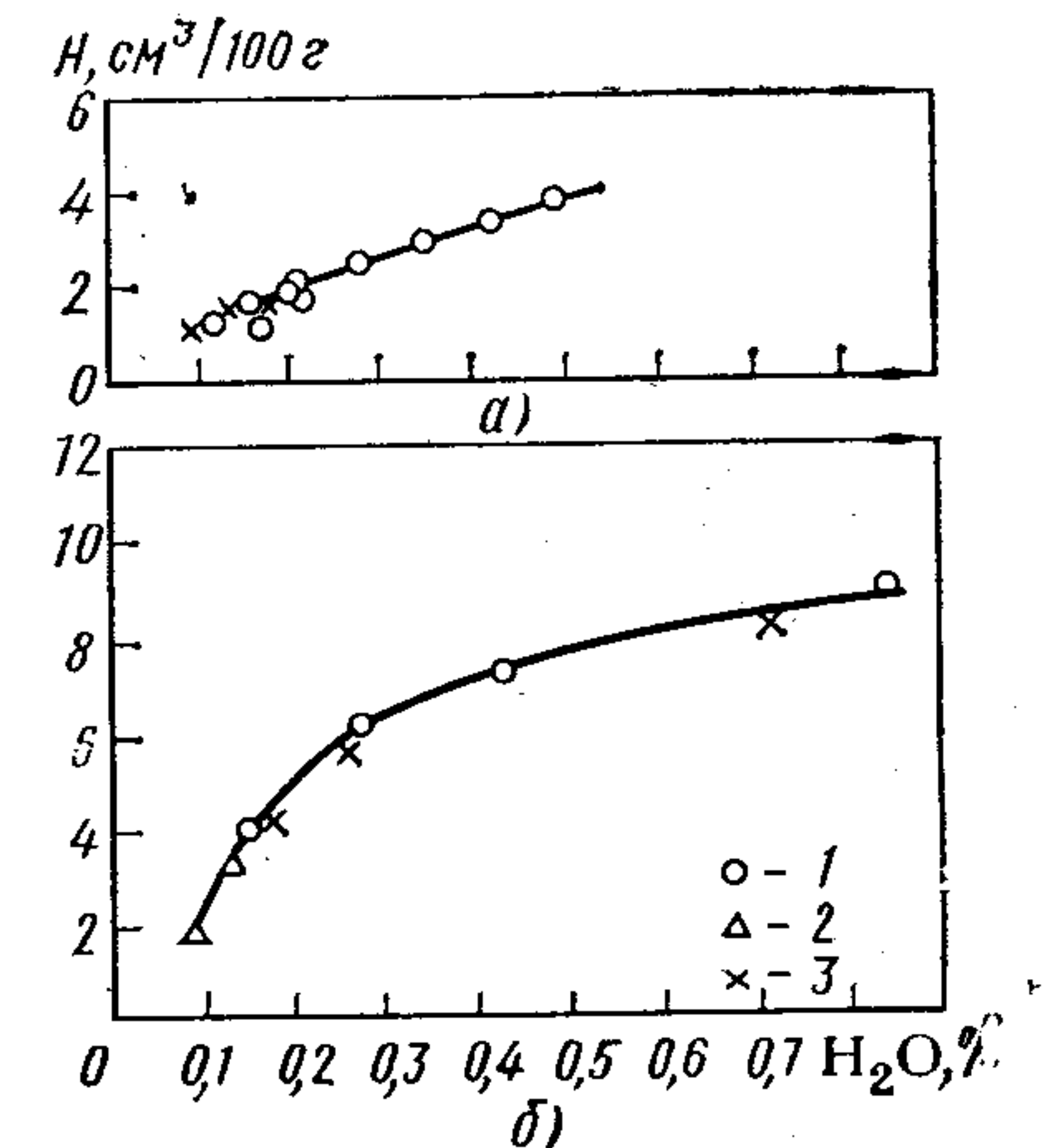
Прокалка наплавочных материалов. Возникновение холодных трещин в наплавленном металле и зоне термического влияния связано обычно с тремя причинами: 1) с высокой твердостью наплавленного металла; 2) с жестким закрепленным состоянием наплавленного участка поверхности детали, исключающего релаксацию напряжений в металле за счет пластической деформации; 3) с водородной хрупкостью, возникающей под действием диффузионного водорода. Наибольшее число проведенных исследований посвящено изучению влияния диффузионно-подвижного (диффузионного) водорода, основным источником которого является влага в составе наплавочных материалов.

На рис. 48 и 49 показано соотношение между содержанием влаги в покрытии электродов для ручной наплавки и флюсе для автоматической наплавки и содержанием диффузионного водорода в наплавленном металле [1, 2, 3]. Повышение влажности наплавочных материалов всегда сопровождается увеличением содержания диффузионного водорода в наплавленном металле.

Влажность наплавочных материалов частично включает остаточную кристаллизационную воду, однако основная ее часть приходится на водяные пары, поглощаемые из окружающего воздуха.

Рис. 48. Зависимость содержания диффузионного водорода Н в наплавленном металле от содержания влаги Н₂O в электродах с покрытием основного типа:

а — быстрое охлаждение металла (через 5 с после кристаллизации) в глицерине при 45°C; х — электрод D5016 с покрытием основного типа (26°C, относительная влажность 73%); о — электрод L80 с покрытием основного типа (20°C, относительная влажность 60%); б — хромоникелемолибденовый электрод E10016 Ø 4 мм, быстрое охлаждение металла (через 10 с после кристаллизации) в глицерине при 104°C; 1, 2, 3 — варианты электродного покрытия



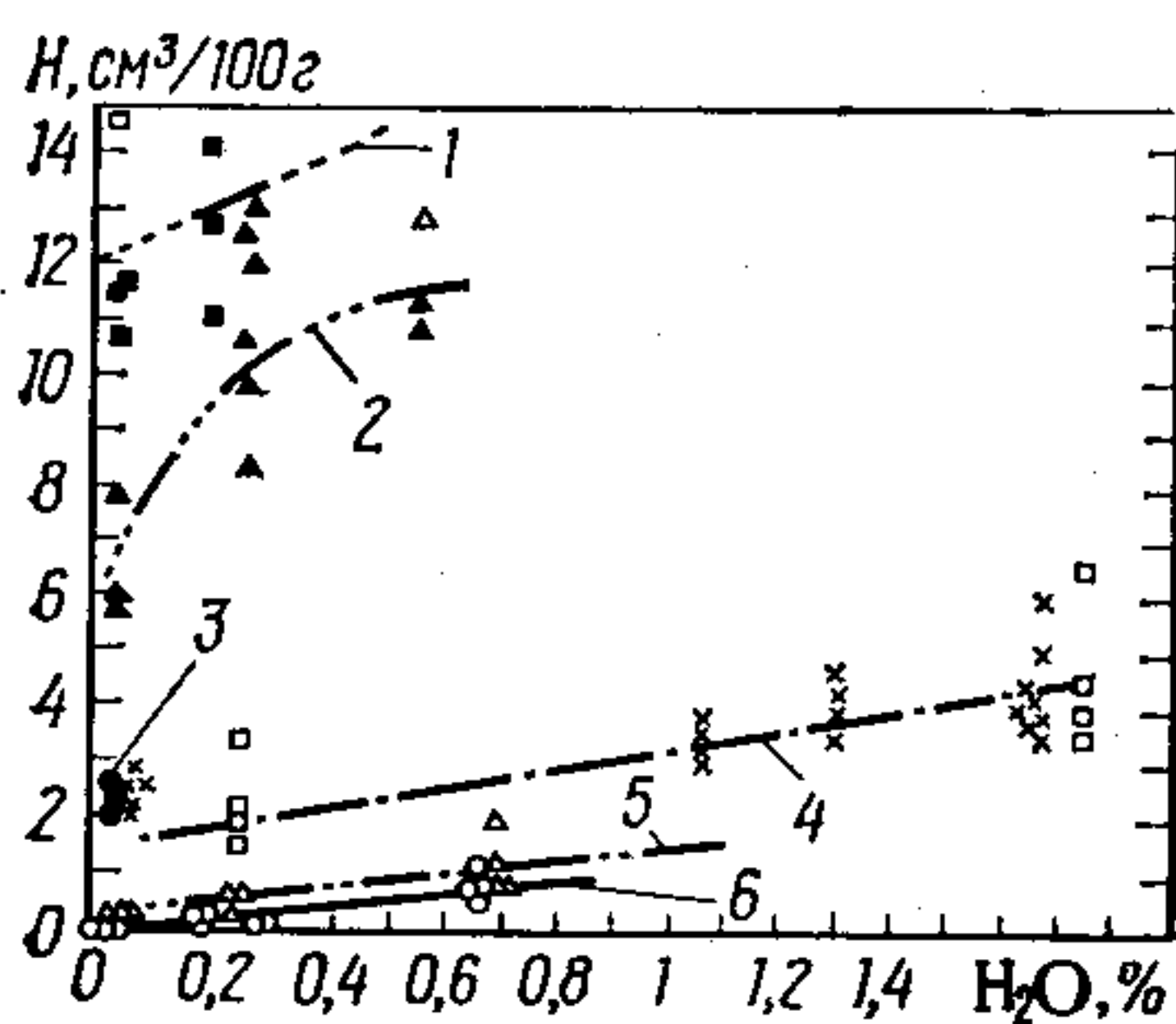


Рис. 49. Зависимость содержания диффузионного водорода H в наплавленном металле от количества поглощенной влаги H_2O во флюсе (наплавка под флюсом; образец для определения содержания водорода размером $12 \times 37 \times 130$ мм; режим наплавки: $I_d = 600$ А; $U_d = 32$ В; $v_n = 26$ см/мин; способ с использованием глицерина по японскому промышленному стандарту):

1 — флюс ВЕ — прокаленный, основность 0,10, нулевая степень выделения CO_2 ; 2 — флюс ВС, основность 2,08, нулевая степень выделения CO_2 ; 3 — флюс FA — плавный; 4 — флюс ВД, основность 0,10, степень выделения CO_2 50; 5 — флюс ВВ, основность 2,61, степень выделения CO_2 70; 6 — флюс ВА, основность 2,61, степень выделения CO_2 100

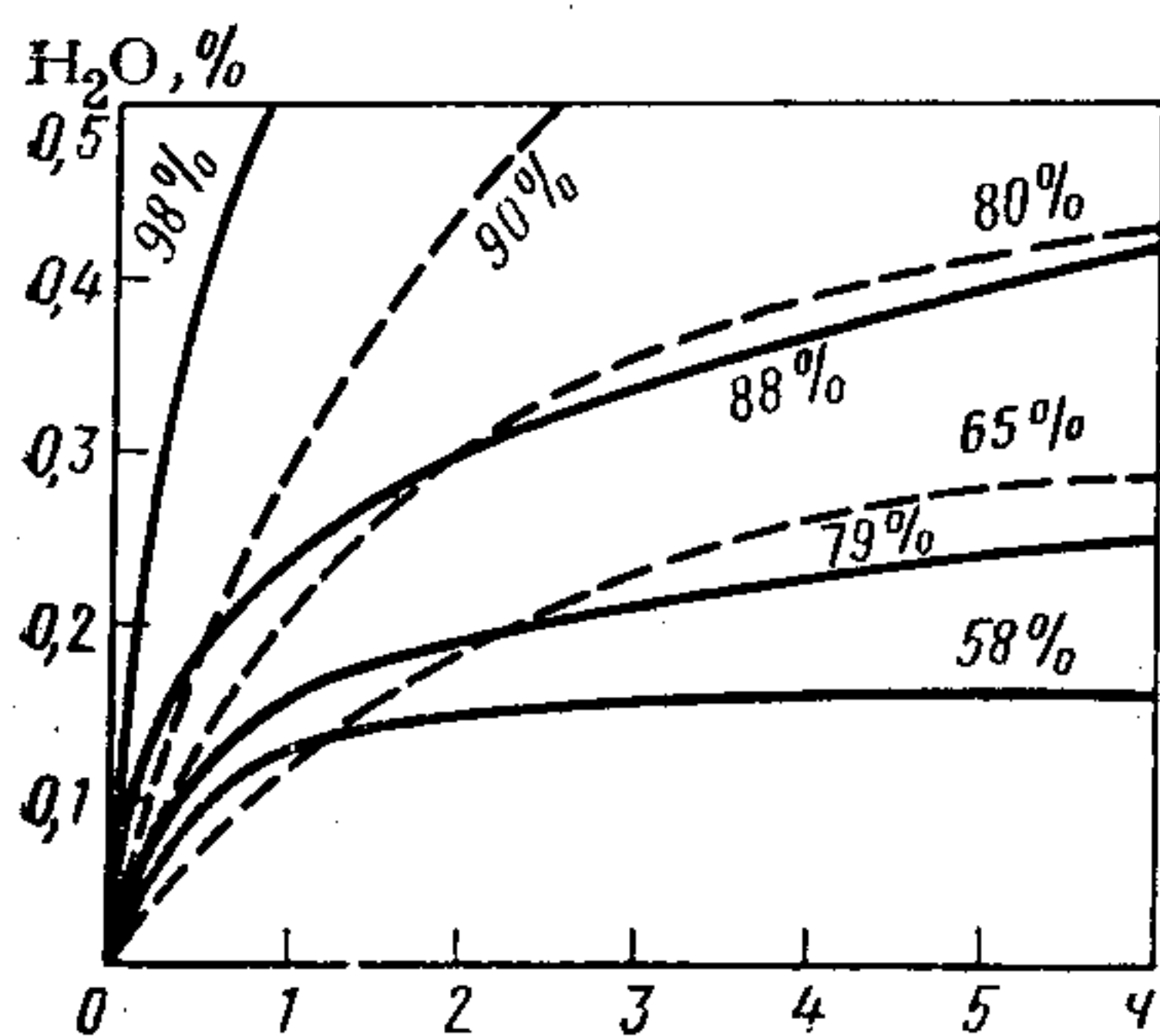


Рис. 50. Зависимость содержания поглощенной влаги H_2O в электродах с покрытием основного типа от продолжительности (t) выдержки их на воздухе с разной относительной влажностью:

----- электроды для наплавки высокопрочной стали НТ50 \varnothing 5 мм (23—26°C); ————— электроды для наплавки высокопрочной стали НТ80, \varnothing 4 мм (20°C)

На рис. 50 показана зависимость содержания поглощенной влаги в электродах с покрытием основного типа от продолжительности выдержки этих электродов в среде воздуха [1]. При некотором состоянии атмосферного воздуха электроды поглощают достаточно большое количество влаги в течение нескольких часов выдержки. Следовательно, перед наплавкой электроды, флюсы и другие шлакообразующие материалы необходимо прокалить в течение 1 ч при температуре, приведенной в табл. 6.1. Если после прокаливания их длительное время не применяют, то непосредственно перед наплавкой эти материалы необходимо подвергнуть повторной прокалке.

Обработка поверхности перед наплавкой. Для получения качественного наплавленного слоя поверхность детали перед наплавкой рекомендуется подвергать зачистке с целью полного удаления различных загрязнений (влаги, масла, пыли, ржавчины), а также возможных дефектов в виде трещин, следов износа, упроченных слоев и др.

Для зачистки поверхности основного металла используют разнообразные способы обезжиривания, из которых наиболее надежна промывка ацетоном. Для удаления оксидной пленки и мелких трещин используют дисковые и ленточные инструменты из абразивных материалов или пескоструйную обработку. Глубокие поверхностные трещины удаляют различными способами обработки резанием.

Обеспечение хорошего состояния поверхности основного метал-

6.1. Температура прокаливания наплавочных материалов

Наплавочные материалы	Температура сушки, °С
Электроды с покрытиями: высокорутиловым карбонатно-рутиловым основным типа графитосодержащим	80—120
	200—250
	300—350
Порошковая проволока с флюсовой сердцевинной Керамический флюс Плавный флюс	150—200
	250—350
	250—300
	250—400

ла особенно важно при наплавке стеллита. Перед наплавкой детали можно подвергать нормализации или отжигу для получения стабильной структуры основного металла. Для качественного формирования наплавленного слоя рекомендуется выполнять разделку поверхности детали по форме, показанной на рис. 51, с обеспечением необходимой чистоты.

Предварительный нагрев.

Для предотвращения растрескивания наплавленного слоя, особенно при наплавке твердыми материалами, необходимо правильно выбрать температуру предварительного подогрева детали, оказывающего влияние

на твердость наплавленного металла. Недостаточная температура предварительного подогрева создает опасность возникновения трещин, а чрезмерный нагрев вызывает снижение скорости охлаждения и увеличение глубины проплавления основного металла, что не обеспечивает требуемой твердости наплавленного металла.

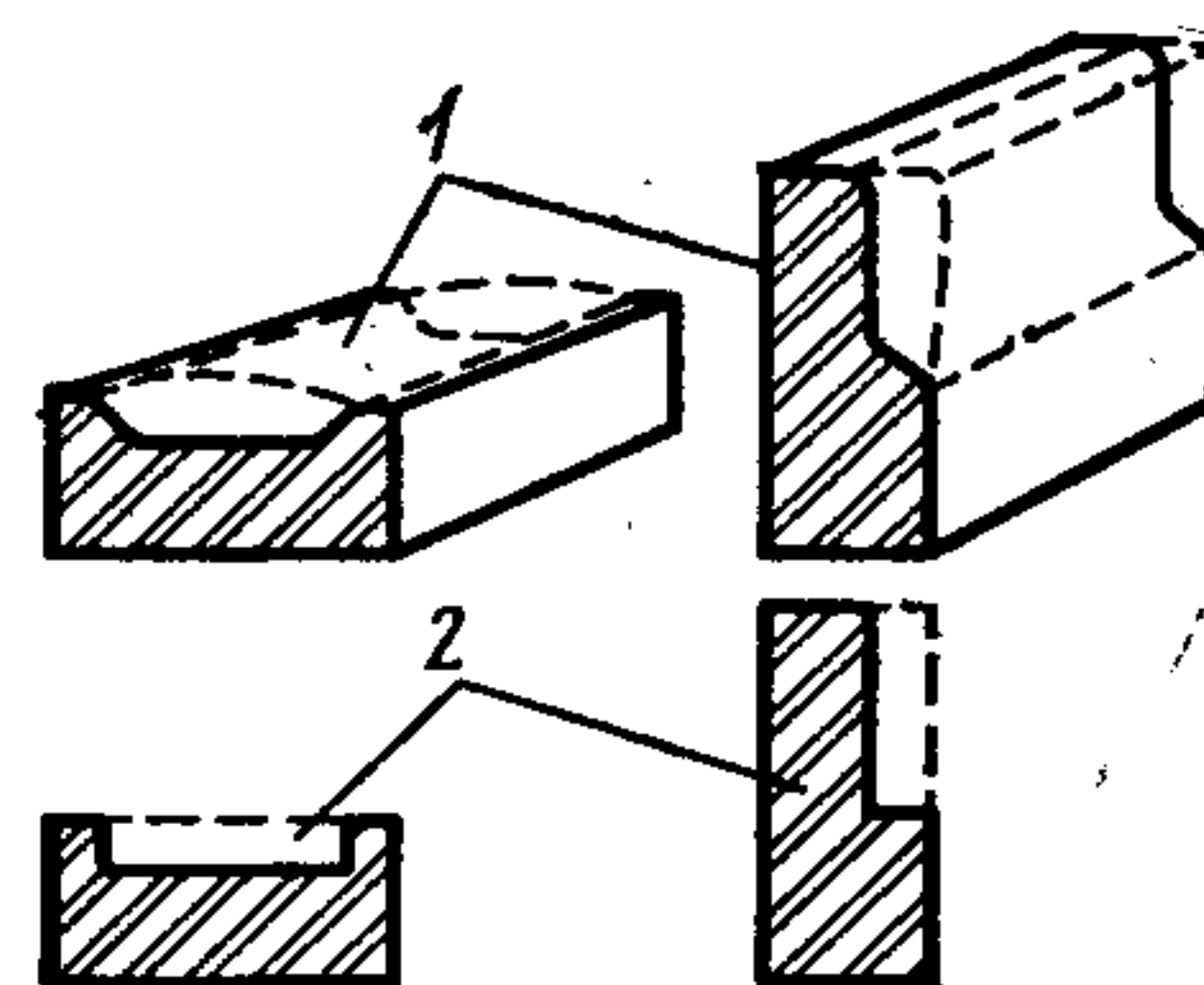


Рис. 51. Примеры выполнения разделки основного металла перед антикоррозионной наплавкой:

1 — правильная разделка;
2 — неправильная разделка

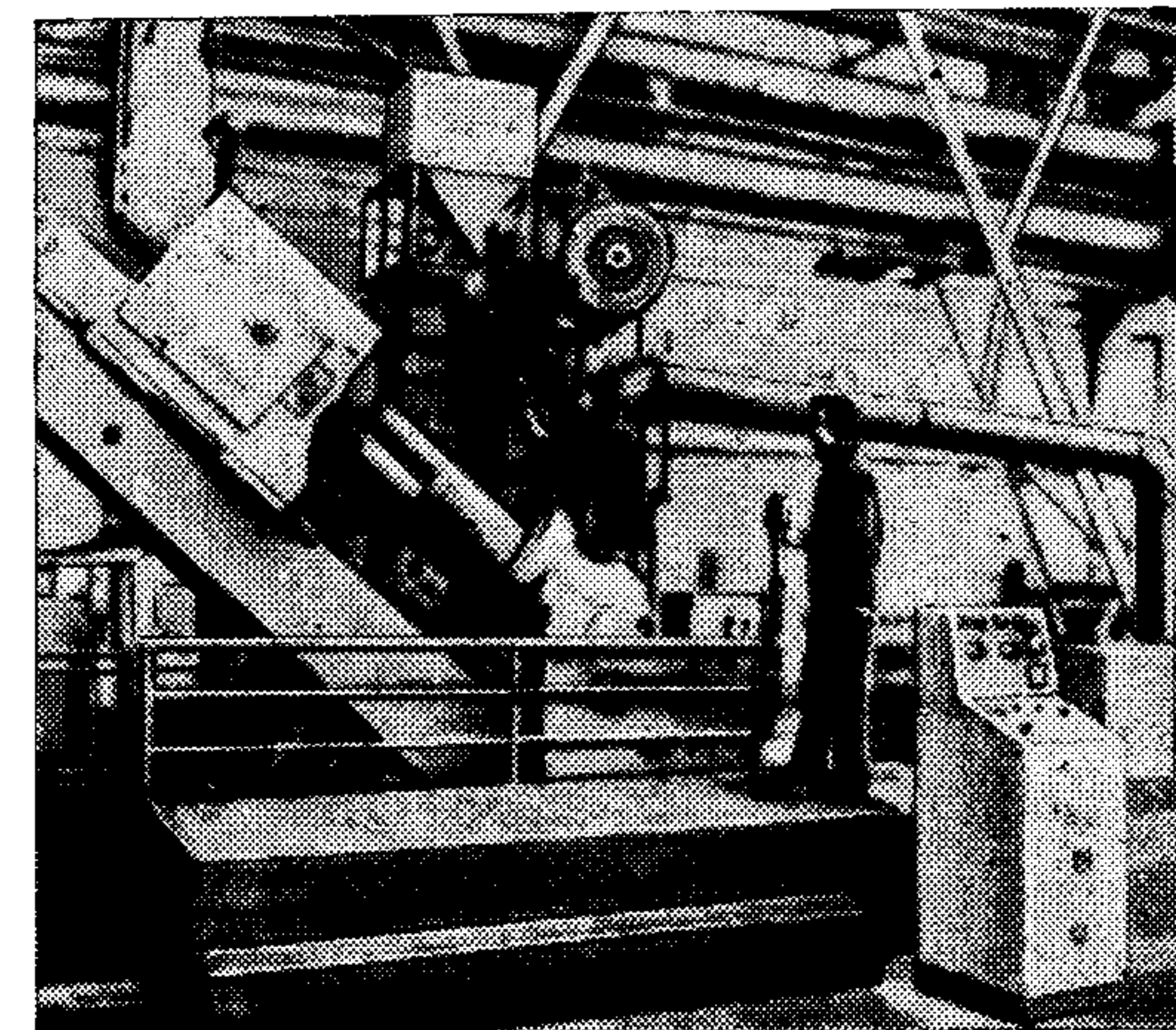


Рис. 52. Устройство для автоматической наплавки прокатных валков с калибрами

Предварительный подогрев осуществляют обычно газовыми горелками, ТВЧ или электрическими нагревателями, а для валков прокатных станков и других крупных изделий используют емкие нагревательные печи.

При нагреве горелками рекомендуется использовать пропан, при нагреве ацетилено-кислородным пламенем последнее должно быть нормальным (восстановительным).

Температуру предварительного подогрева следует выбирать с учетом состава и свойств основного металла (см. табл. 3.6).

Сварочные приспособления. Наплавку рекомендуется осуществлять в нижнем положении, что позволяет широко использовать различные позиционеры (манипуляторы) и роликовые стенды.

В качестве примера на рис. 52 показано устройство для автоматической наплавки прокатных валков с калибрами, отличающихся особой сложностью профиля наплавляемой поверхности. Использование этого приспособления позволяет осуществлять автоматическую наплавку только в нижнем положении.

6.2. НАПЛАВКА

Газовая наплавка стеллита предполагает выполнение следующих правил:

1) необходим предварительный подогрев детали до заданной температуры (см. табл. 6.3), а для крупных изделий — подогрев их с обратной стороны, чтобы во время наплавки поддерживать температуру основного металла 400—500°C;

2) наплавляемая поверхность должна находиться по возможности в точном горизонтальном положении;

3) наплавку необходимо выполнять науглероживающим пламенем при поддержании расстояния между ядром пламени и основным металлом ~3 мм в условиях запотевания поверхности основного металла; во избежание перегрева наплавлять следует более широким, но коротким пламенем, чем при газовой сварке;

4) подачу наплавочного металла и его плавление следует начинать после запотевания поверхности основного металла; расплавляемый конец присадочного прутка необходимо держать ближе к поверхности сварочной ванны, но без ввода внутрь ванны. Для обеспечения хорошего растекания стеллита по поверхности основного металла прутки рекомендуется держать в определенном положении без изменения угла наклона и поворачивая его в разные стороны. Наплавку осуществляют обычно при перемещении сопла горелки вперед, как показано на рис. 53.

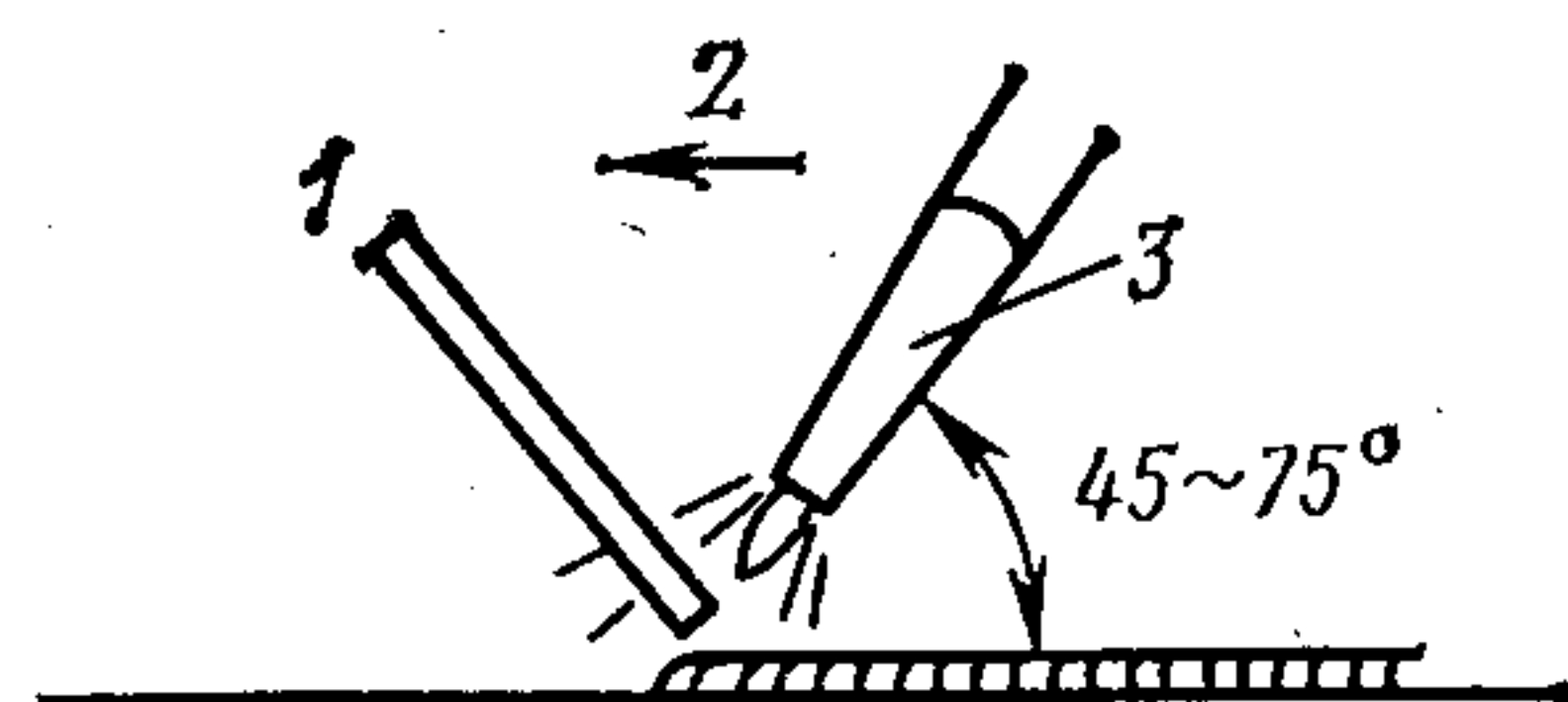


Рис. 53. Схема наплавки газовым пламенем с перемещением сопла горелки углом вперед:

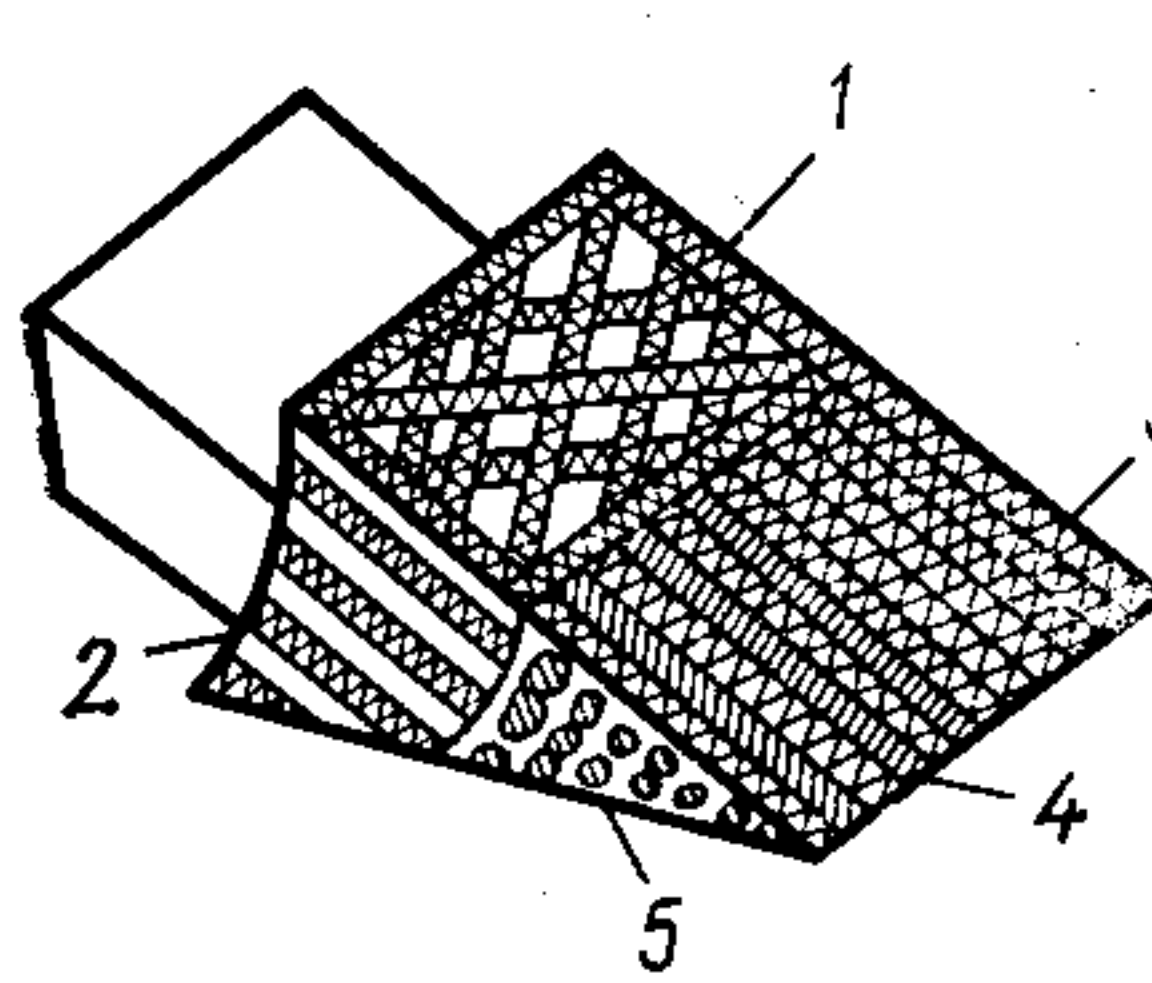
1 — наплавочный пруток; 2 — направление наплавки; 3 — сопло горелки

6.2. Сила тока (А) и температура предварительного подогрева деталей при дуговой наплавке покрытыми электродами

Наплавочные материалы	Диаметр электрода, мм				Температура предварительного подогрева, °С
	3,2	4	5	6	
Коррозионно-стойкая сталь:					
аустенитная	70—115	95—160	135—230	160—280	—
ферритная	70—115	90—145	130—180	160—210	100—400
Никель и его сплавы:					
никель	75—120	90—160	180—200	190—230	—
инконель	70—120	90—145	115—180	—	≥ 120
монель-металл	75—120	100—150	140—190	190—230	≥ 100
Медь и ее сплавы:					
медь	70—100	110—160	140—230	170—270	280—600
бронза	60—110	100—150	150—200	190—230	—
медноникелевый сплав	90—120	130—160	160—200	220—260	≥ 150
Материалы для износостойкой наплавки:					
стеллит	85—110	120—170	150—210	200—280	300—500
перлитная сталь	60—130	110—180	160—240	200—300	≥ 150
мартенситная сталь	90—160	140—190	180—240	220—310	≥ 150
марганцовистая аустенитная сталь	70—140	95—180	130—240	220—300	—
высокохромистые на основе железа	100—130	110—180	150—240	190—240	≥ 150
карбид вольфрама	70—90	100—120	130—170	150—200	≥ 300

Дуговую наплавку покрытыми электродами осуществляют различными материалами, требующими разной скорости охлаждения наплавленного металла. В частности, при наплавке стеллита, мартенситных материалов и карбида вольфрама предпочтительно замедленное охлаждение, а при наплавке аустенитной коррозионно-стойкой стали, чистого никеля, фосфористой бронзы и высокомарганцовистого аустенитного материала наплавленный металл рекомендуется охлаждать с высокой скоростью. В первом случае перед наплавкой проводят предварительный подогрев, тогда как во втором необходимость подогрева отпадает, а наплавку рекомендуется осуществлять узкими валиками при малой силе тока. В табл. 6.2 приведены значения силы тока и температуры предварительного подогрева деталей при износостойкой и коррозионно-стойкой наплавке промышленными электродами. Наплавку коррозионно-стойких материалов и некоторых твердых сплавов (стеллита, карбида вольфрама) осуществляют обычно при меньшей силе тока, чем наплавку мартенситных и перлитных материалов.

6.3. Способы ручной наплавки валков покрытыми электродами

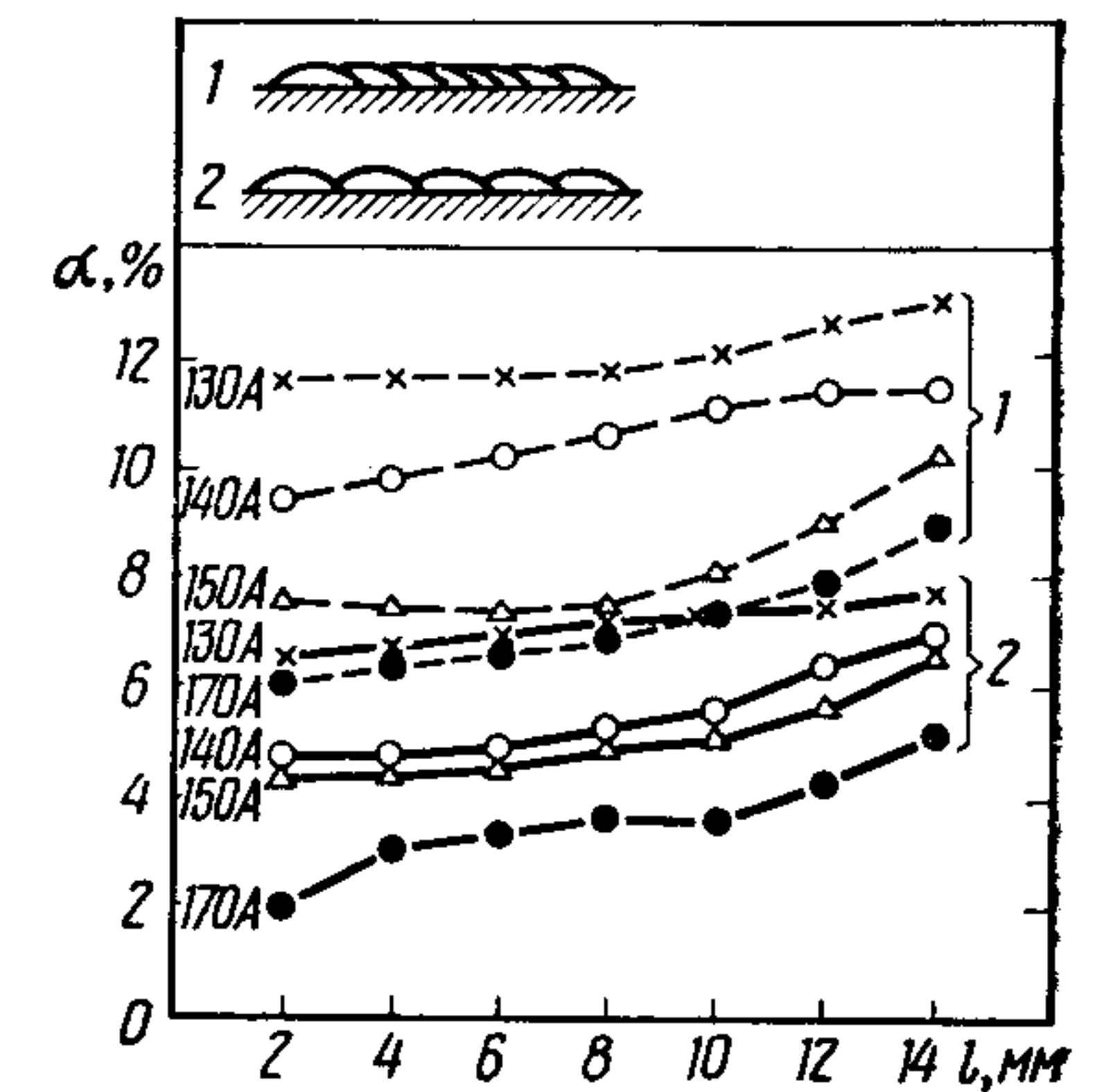
Эскиз	Наплавка	Примечание
	1. Сетчатая	Способствует снижению погонной энергии и чувствительности к трещинам; при попадании грунта в узлы сетки повышается стойкость к абразивному изнашиванию
	2. Полосчатая	Равноценна сетчатой наплавке
	3. Сплошная	Имеет наиболее широкое применение
	4. Линейчатая	Сочетание разнообразных наплавочных материалов (твердых сплавов, коррозионно-стойкой, перлитной стали и др.) предотвращает образование трещин и отрыва наплавленного металла от основного
	5. Точечная	Снижает вредное влияние на основной металл, сокращает потребление наплавочных материалов и повышает износостойкость покрытий; отличается трудоемкостью, поскольку наплавка не является непрерывной

При износостойкой наплавке изделий применяют показанные в табл. 6.3 способы, различающиеся по рисунку нанесения валиков: наплавка сплошная, сетчатая, полосчатая, точечная и др.

При дуговой наплавке покрытыми электродами, от способа укладки валиков зависят не только возможность возникновения сварочных дефектов, но и свойства наплавленного металла. В частности, при дуговой наплавке деталей из низколегированной стали покрытыми электродами диаметром 4 мм со стержнем из аустенитной коррозионно-стойкой стали укладка валиков с перекрытием их на $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{4}$ ширины (рис. 54) влияет на содержание феррита в наплавленном металле. По влиянию на содержание феррита переход от перекрытия валика на $\frac{1}{2}$ его ширины к перекрытию на $\frac{1}{4}$ ширины равносильен повышению силы тока наплавки от 130 до 170 А. Таким образом, задача получения однородного наплавлен-

Рис. 54. Влияние способа укладки валиков при дуговой наплавке покрытыми электродами на содержание феррита α в наплавленном металле на разном расстоянии l от начала слоя наплавки:

1 — перекрытие на $\frac{1}{2}$ ширины (наплавка низколегированной стали электродом D347 \varnothing 4 мм); 2 — перекрытие на $\frac{1}{4}$ ширины (наплавка низколегированной стали электродом D347 \varnothing 4 мм)



ного металла требует определенного выбора способов укладки валиков и перемещения электрода в процессе наплавки.

Дуговую наплавку в среде CO_2 осуществляют с использованием наплавочной проволоки диаметром 1,2 мм при оптимальной силе тока в пределах 80—300 А, а проволоки диаметром 1,6 мм при силе тока 200—500 А. При неизменной силе тока увеличение вылета электродной проволоки требует, повышения скорости ее подачи (или производительности наплавки), уменьшая глубину проплавления основного металла, при этом эффективность газовой защиты снижается. При обычном расходе защитного газа (20 л/мин) нормальная длина вылета электрода составляет 20 мм.

Наплавку в среде защитного газа необходимо проводить в местах, защищенных от прямого воздействия ветра.

Наплавка под флюсом электродной проволокой отличается высокими скоростью и производительностью процесса, в частности при непрерывной наплавке прокатных валков и других тел вращения. На рис. 55 схематически показан процесс непрерывной наплавки валка [5]. При наплавке таких деталей необходимо смещать дугу (электродную проволоку) относительно зенита детали в направлении, противоположном ее вращению. Размер такого

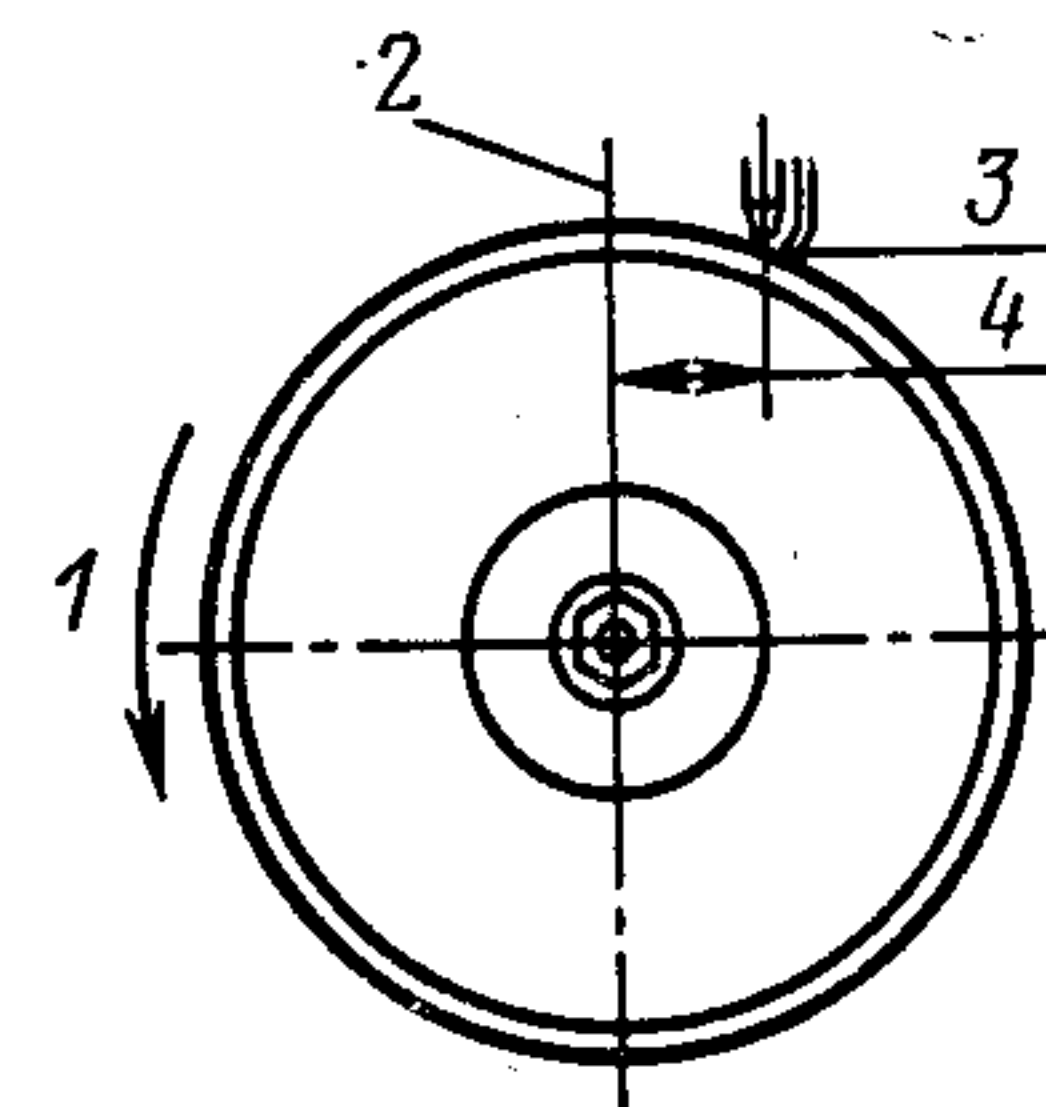


Рис. 55. Схема наплавки валка:

1 — направление вращения; 2 — вертикальная ось сечения валка; 3 — сварочная дуга; 4 — смещение (опережение) дуги относительно зенита детали

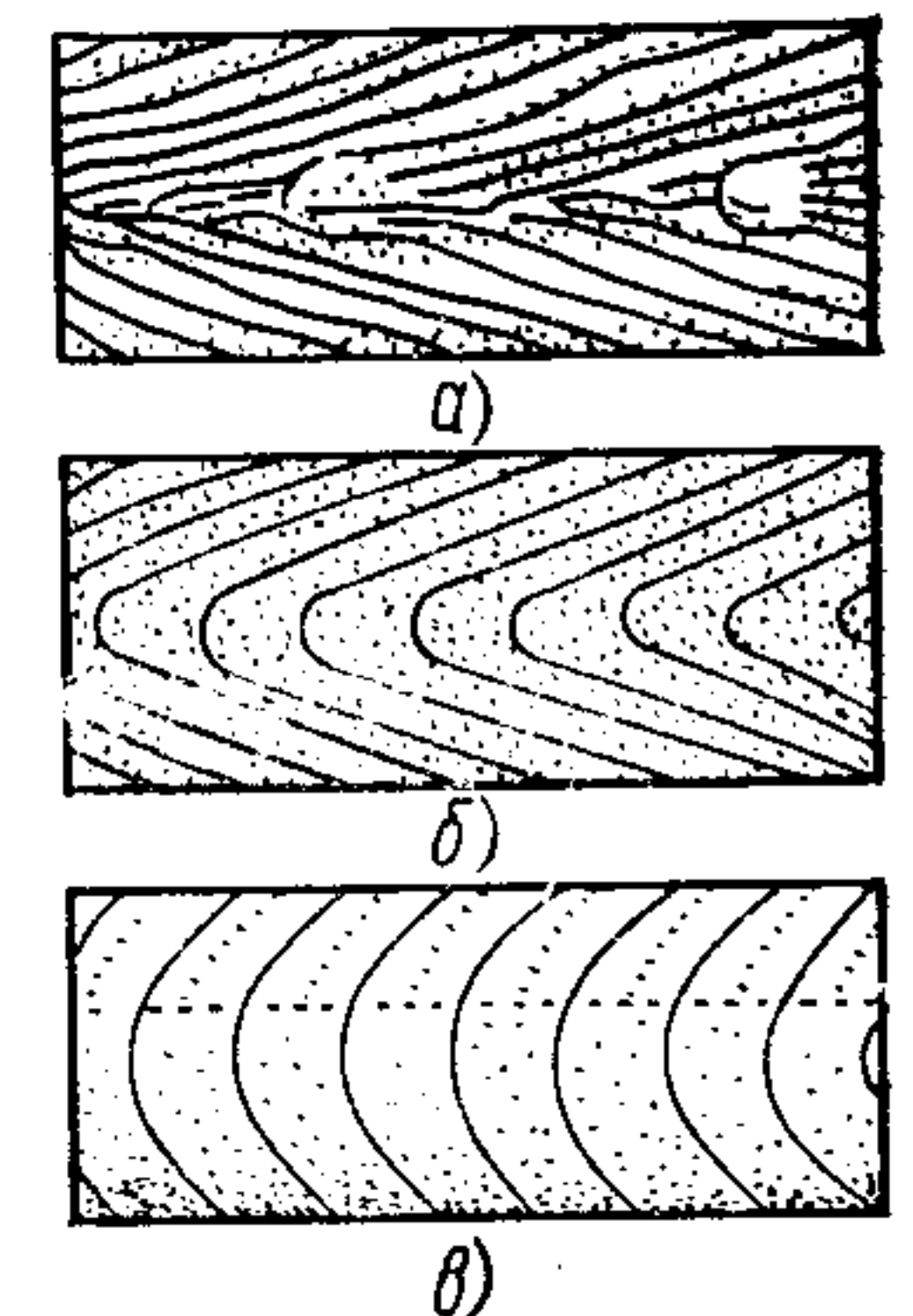


Рис. 56. Влияние опережения на внешний вид наплавленного валика:

а — малое; б — нормальное; в — большое

смещения (опережения) оказывает значительное влияние на внешний вид наплавленного валика (рис. 56). Оптимальный размер опережения устанавливают в зависимости от конкретного диаметра детали [8].

Увеличение вылета электрода приводит к повышению производительности наплавки и снижению глубины проплавления основного металла (см. рис. 29, 30). Однако, учитывая, что стабильность горения дуги и переход легирующих элементов в наплавленный металл в результате выгорания и окисления их шлаком снижаются, не рекомендуется наплавка при чрезмерно большом вылете электрода.

Наплавка под флюсом ленточным электродом — высокопроизводительный способ, широко используемый для нанесения антикоррозионных покрытий на внутренние поверхности крупногабаритных сосудов высокого давления, применяемых в нефтеперерабатывающей промышленности и атомной энергетике.

Слой металла, наплавленный с помощью ленточного электрода, должен удовлетворять следующим требованиям: 1) ровная и гладкая поверхность валиков при равномерной толщине наплавленного

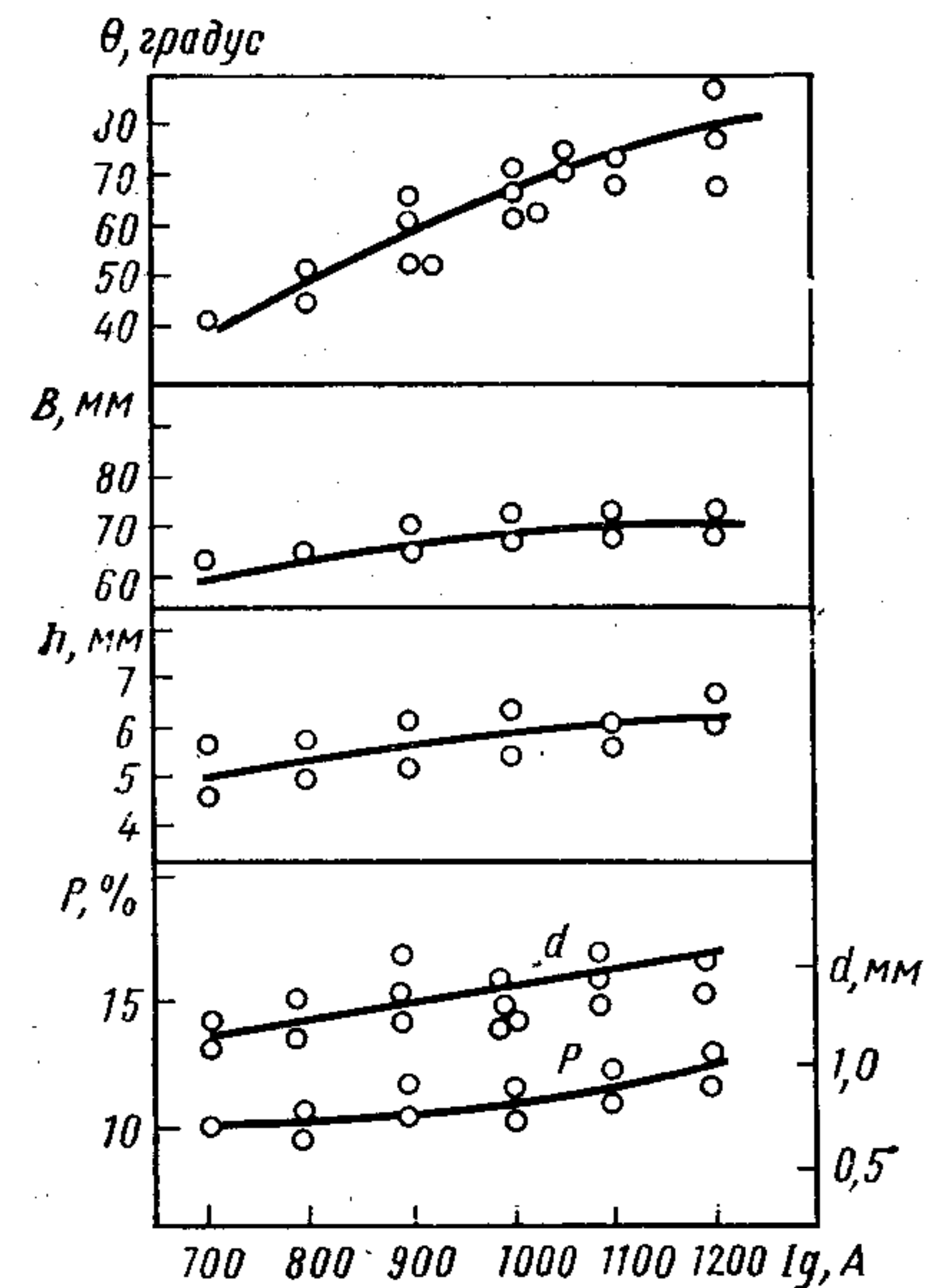


Рис. 57. Влияние силы тока I_d на параметры формирования валиков при наплавке под флюсом (краевой угол смачивания θ , ширину валика B , высоту валика h , долю участия основного металла в составе металла наплавки — P и глубину проплавления d ; режим наплавки: $U_d = 29$ В, ленточный электрод $0,4 \times 60$ мм, $v_n = 180$ мм/мин)

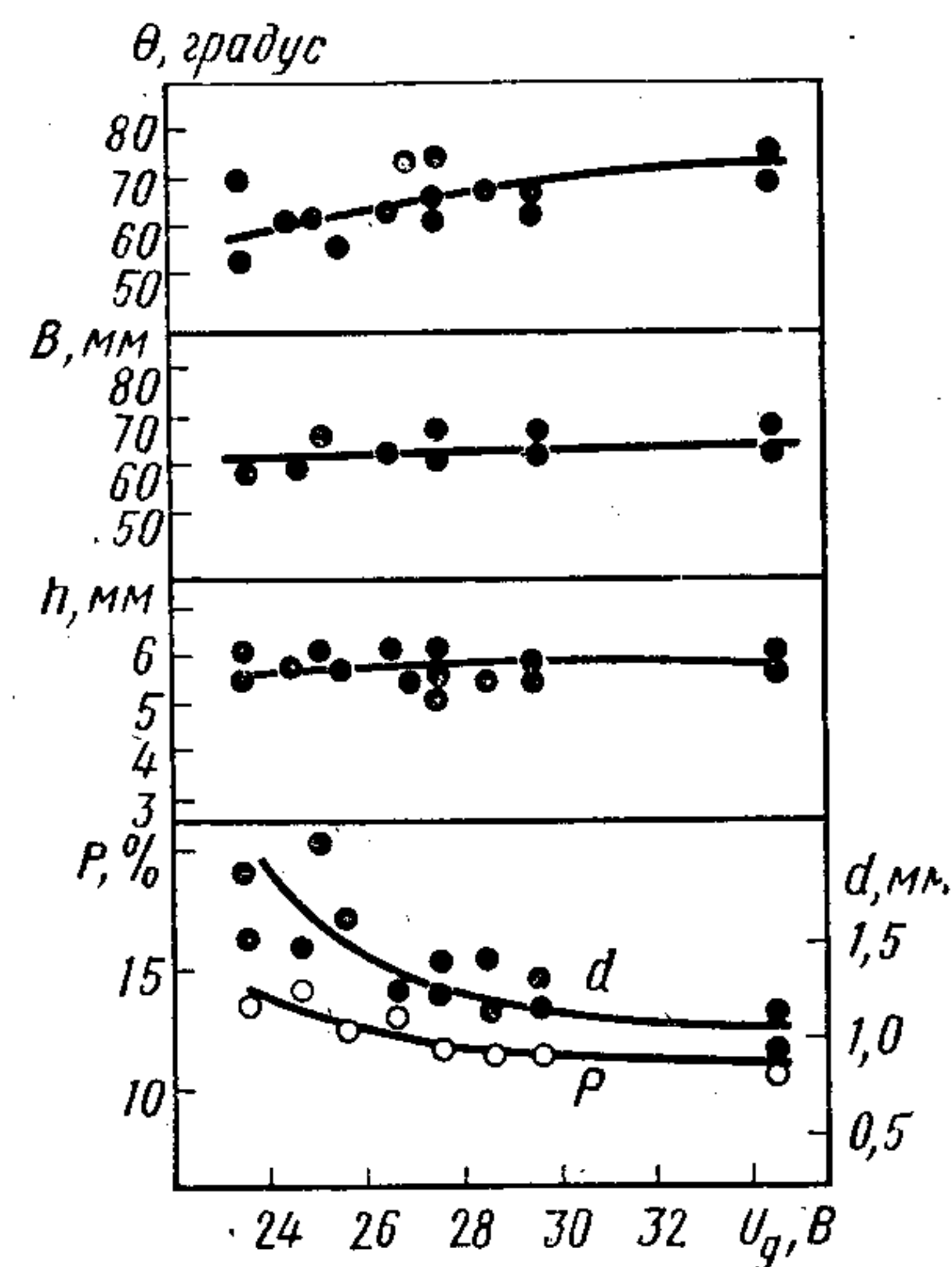


Рис. 58. Влияние напряжения дуги на параметры формирования валиков при наплавке под флюсом (краевой угол смачивания θ , ширину валика B , высоту валика h , долю участия основного металла в составе металла наплавки — P и глубину проплавления d ; режим наплавки: $I_d = 1050$ А, ленточный электрод $0,4 \times 60$ мм, $v_n = 180$ мм/мин)

слоя; 2) хорошая укладка наплавленных валиков без подрезов и наплывов на концевых участках; 3) отсутствие дефектов в наплавленном металле при глубине проплавления основного металла не менее 0,5 мм и малой степени разбавления наплавленного металла основным металлом, доля которого для первого слоя не должна превышать 15%.

На рис. 57 и 58 показано влияние силы тока и напряжения дуги на формирование валиков [6]. В интересах повышения производительности процесса предпочтительна большая сила тока, однако при этом возрастает влияние основного металла на состав наплавленного слоя, а также увеличивается краевой угол смачивания. Повышение напряжения дуги вызывает снижение влияния основного металла на состав наплавленного металла. Вместе с тем при режиме наплавки с особо высоким напряжением дуги и током малой силы указанное влияние (степень проплавления), напротив, повышается.

На рис. 59 показано влияние угла наклона наплавленной поверхности детали или образца на геометрическую форму валиков [6]. Наклон поверхности в направлении наплавки или в поперечном направлении на угол более 3° приводит к неудовлетворительному формированию валика и увеличению степени проплавления основного металла. Таким образом, при наплавке ленточным электродом предельно допустимый угол наклона наплавленной поверхности детали составляет 3° . Оптимальный вылет электрода составляет 20—45 мм.

6.3. ПОСЛЕДУЮЩАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА НАПЛАВКИ

Последующий нагрев. Износостойкой наплавке нередко подвергают детали из подкаливающихся средне- и высокоуглеродистых сталей. В таких случаях охлаждение на воздухе после наплавки может стать причиной растрескивания и отрыва наплавленного слоя. Для предотвращения этих нежелательных явлений необходимо принимать меры по снижению скорости охлаждения металла путем газопламенного нагрева наплавленного участка или загрузки

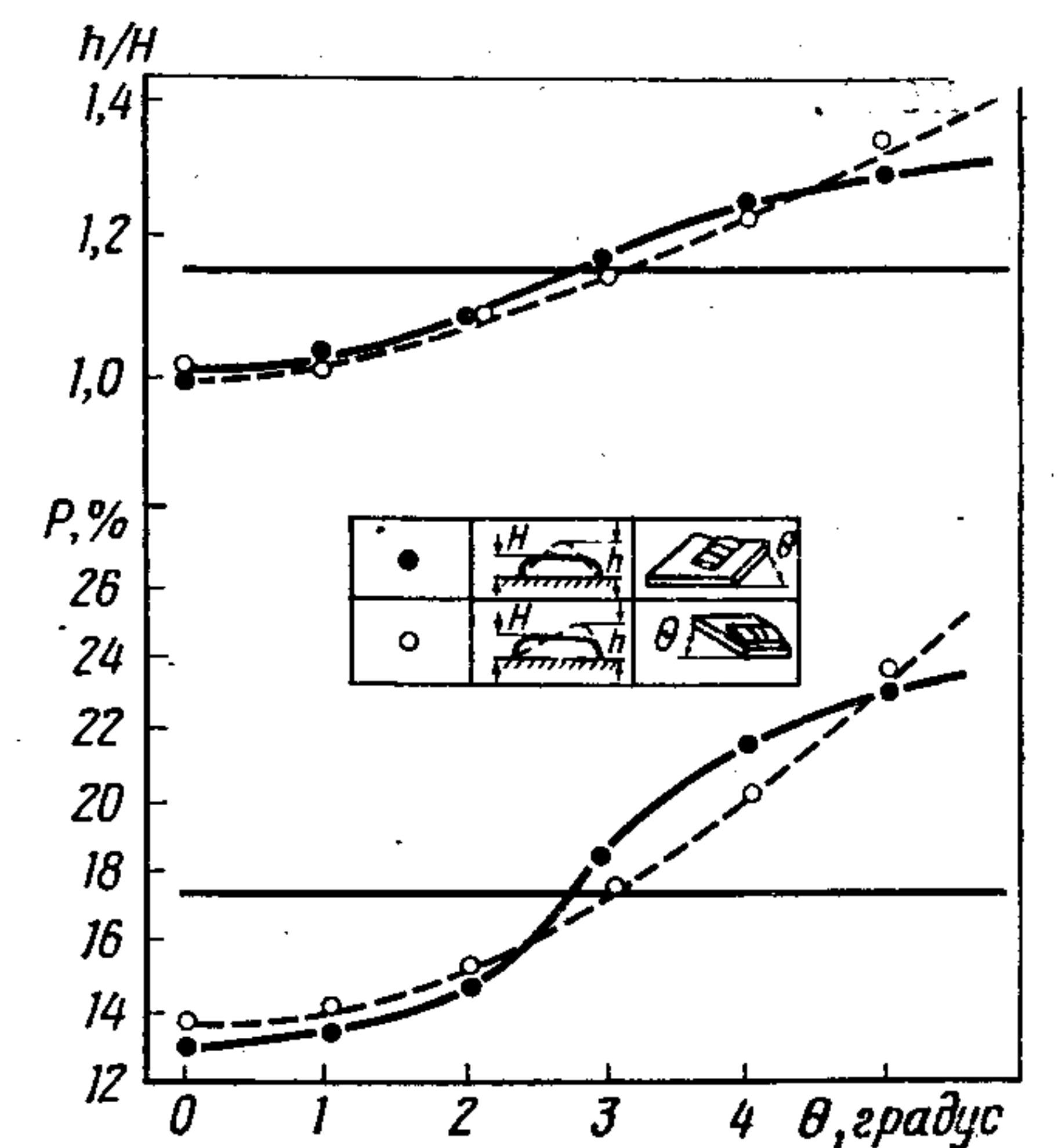


Рис. 59. Влияние угла θ наклона наплавленной поверхности на h/H и долю участия основного металла в составе металла наплавки P (наплавка под флюсом ленточным электродом):

● — плохая форма валика; ○ — чрезмерная глубина проплавления

ки всего изделия после выполнения наплавки в нагревательную печь.

При наплавке сосудов высокого давления или иных изделий из низколегированной стали, склонной к образованию трещин замедленного разрушения, в период после окончания наплавки до начала термообработки (отпуска) температуру наплавленного изделия необходимо поддерживать на уровне $\sim 300^\circ\text{C}$ (обезводороживание).

Обработка для снятия напряжений. Под влиянием термического цикла наплавки в изделиях могут возникать остаточные напряжения, вызывающие образование трещин как в основном, так и в наплавленном металле и создающие угрозу разрушения конструкций в целом. В таких случаях после наплавки необходима обработка, обеспечивающая релаксацию остаточных напряжений.

Наиболее распространенными видами такой обработки являются отпуск для снятия напряжений, механическая релаксация напряжений и проковка.

1. Отпуск для снятия напряжений в сварных элементах конструкций энергетического оборудования осуществляют согласно нормам, утвержденным приказом № 81 Министерства промышленности и внешней торговли Японии. В этих нормах определен режим термообработки для сосудов высокого давления (табл. 6.4).

2. Механическая релаксация напряжений состоит в том, что на конструктивный элемент, содержащий внутренние остаточные напряжения, действует постоянная нагрузка, после снятия которой

6.4. Температура термообработки для снятия остаточных напряжений в элементах конструкций энергетических сооружений (продолжительность термообработки 1 ч на 25 мм толщины листа)

Материал конструкции	Температура обработки, °C
Углеродистая сталь	595
Низколегированная сталь с содержанием 0,75% Cr и суммарным содержанием остальных легирующих элементов до 2%	595
Низколегированная сталь с содержанием 0,75—2% Cr и суммарным содержанием остальных легирующих элементов до 2,75%	595
Легированная сталь с суммарным содержанием легирующих элементов до 10%	680
Ферритная коррозионно-стойкая сталь	735
Мартенситная коррозионно-стойкая сталь	760
Подвергающаяся закалке и отпуску сталь с временным сопротивлением $\sigma_b = 6,68 \text{ МПа}$	595

Примечания. 1. Температура загрузки деталей в печь и выгрузки их из печи не превышает 300°C . 2. Разность температур между двумя произвольными точками детали на нагреваемом участке не превышает 50°C . 3. Скорость нагрева при температуре выше 300°C должна составлять $v_{\text{нагр}} = 220 + 25/T$, а скорость охлаждения — $v_{\text{охл}} = 275 + 25/T$, $^\circ\text{C}/\text{ч}$ (T — толщина стенки на участке сварки, мм).

происходит релаксация напряжений. Способ механической релаксации не пригоден для крупных конструктивных элементов и наплавленных изделий с недостаточной пластичностью.

3. Проковка — деформация поверхностного слоя наплавленного металла специальным молотком (проковка) с целью релаксации в нем напряжений. Этот способ используют для снятия внутренних напряжений и предотвращения образования трещин в наплавленном металле. В частности, проковку как способ снятия остаточных напряжений используют для высокомарганцевистой аустенитной стали.

Механическая обработка. Наплавленные изделия во многих случаях подвергаются последующей механической обработке под заданные чистовые размеры. Механическая обработка сопровождается освобождением остаточных напряжений в наплавленном металле, и, как следствие, деформацией изделия. Поэтому изделия, которые после наплавки требуют механической обработки, следует подвергать термообработке для снятия напряжений.

Изделия с наплавками из твердых сплавов, механическая обработка которых технологически затруднена, подвергают смягчающей термообработке, а после механической обработки их наплавленный металл зачастую вновь подвергают термообработке для придания заданной твердости.

Шлифование и резание оказывают определенное механическое и тепловое воздействие на обрабатываемую поверхность, создает опасность возникновения трещин в твердом, хрупком металле. Поэтому механическую обработку наплавленного слоя стеллита осуществляют с помощью режущих твердосплавных пластин (из карбида вольфрама) в условиях малой глубины резания при небольшой подаче. Для шлифования, также сопровождающегося быстрым локальным разогревом и охлаждением обрабатываемого металла, необходимо выбирать оптимальный режим, исключающий чрезмерный его разогрев.

Контроль качества наплавки. Применяют следующие методы контроля:

1) внешний осмотр для контроля формы наплавленных валиков, выявления подрезов и наплывов, поверхностных трещин и проверки размеров с использованием лупы с небольшим увеличением и измерительных инструментов. Этот метод контроля, отличающийся простотой осуществления, не требует больших материальных затрат;

2) капиллярная дефектоскопия с использованием проникающих жидкостей. Поверхность изделия покрывают специальной жидкостью (пенетрантом), проникание которой в выходящие на поверхность трещины и раковины позволяет выявить эти дефекты.

Проникающие жидкости бывают люминесцентными и цветными (например, красная краска). Для контроля качества наплавки широко используют цветной метод контроля, позволяющий с высокой чувствительностью выявить дефекты по всей поверхности наплавленного металла;

3) ультразвуковая дефектоскопия, состоящая в том, что в изделие с помощью зонда направляют ультразвуковой импульс (звуковые волны высокой частоты — 0,5—15 МГц) и по характеру отраженной волны судят о наличии дефектов, их величине и местах расположения;

4) дефектоскопия рентгенографическим методом, основанная на применении рентгеновского и гамма-излучения; в настоящее время наиболее распространенный метод неразрушающего контроля.

В Японии на метод контроля металлов с использованием проникающего излучения утвержден японский промышленный стандарт Z2431;

5) измерение твердости разными способами: по Виккерсу, Роквеллу, Бринеллю и Шору. Все способы измерения, кроме способа по Шору, заключаются в статическом вдавливании наконечника алмазной пирамидки, конуса или стального шарика, оставляющих отпечаток при их вдавливании в поверхность изделия.

Измерение твердости по Шору заключается в сбрасывании стержня с алмазным наконечником или стального шарика на изделие с определенной высоты и измерении высоты отскокивания.

Некоторые приборы для измерения твердости по Шору снабжены индикатором с цифровой шкалой, тогда как другие приборы этого типа не имеют такой шкалы, а твердость отсчитывают путем визуальной оценки высоты отскокивания стального шарика.

Преимущество способа измерения твердости по Шору связано с простотой обращения, однако надежность результатов невысокая. В табл. 6.5 приведены сопоставительные данные относительно твердости по Шору и Виккерсу;

6) определение содержания феррита, необходимого при наплавке аустенитной коррозионно-стойкой стали для предотвращения горячих трещин. Контроль качества изделий после наплавки зачастую включает определение содержания феррита, количество которого для такого наплавленного металла должно составлять несколько процентов. От этого содержания зависят также однородность и пластичность наплавленного металла в состоянии после термообработки.

Содержание феррита в лабораторных условиях определяют двумя способами: 1) подсчетом занимаемой им площади на микроснимках структуры; 2) расчетом по химическому составу с использованием структурных диаграмм Шеффлера и Делонга. На

6.5. Сопоставление твердости по Шору и Виккерсу (образец стали j417 по стандарту SAE американского общества инженеров транспорта)

Твердость по Шору	90	80	70	59	50	40	30	20
Твердость по Виккерсу	820	680	550	440	360	280	210	130

практике при контроле качества наплавленных изделий используют исключительно магнитный способ измерения как метод неразрушающего контроля.

В практике металловедения применяют разнообразные способы определения содержания феррита, основанные на использовании магнитных свойств, таких как силы магнитного притяжения (контактные магнитные приборы — ферритометры), магнитной индукции (ферритоскопы, приборы для измерения магнитной проницаемости). Находят применение также ферритные индикаторы, действие которых основано на сопоставлении магнитных сил. На контактные магнитные приборы утверждены стандарты WES * 1001—1976 и AWS * A4.2.

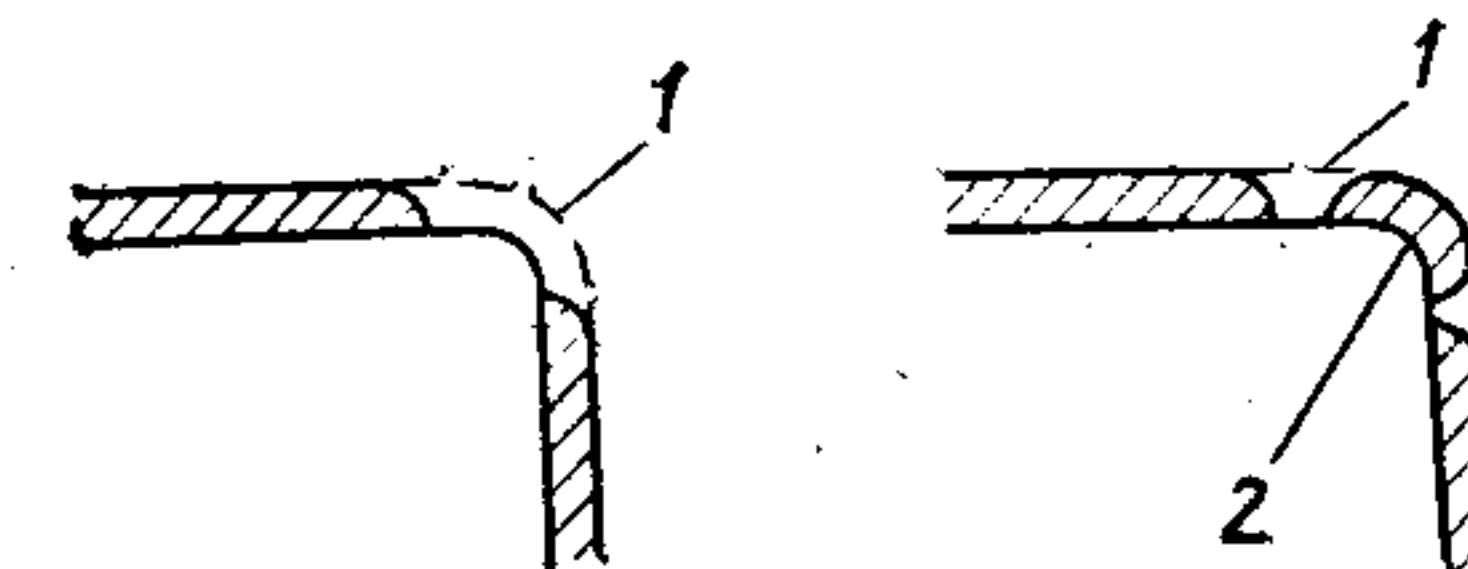
6.4. ДЕФЕКТЫ НАПЛАВКИ И МЕРЫ ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

Трещины. При наплавке на основной металл с неудовлетворительной свариваемостью или при высокой твердости наплавленного металла зачастую образуются сварочные трещины, что может быть связано с чрезмерно большими термическими напряжениями, возникающими, в частности, при сплошной наплавке по большой поверхности.

Для предотвращения образования трещин обычно применяют следующие меры: 1) предварительный и сопутствующий подогрев во время наплавки для поддержания заданной температуры нагрева основного металла (см. табл. 3.6); 2) нагрев изделий непосредственно после наплавки и замедленное охлаждение наплавленного металла; 3) последующую термообработку для снятия напряжений; 4) наплавку пластичного подслоя на поверхность основного металла, обладающего неудовлетворительной свариваемостью; 5) уменьшение числа слоев при многослойной износостойкой наплавке; 6) выбор для износостойкой наплавки способов, вызывающих меньшие термические напряжения в изделиях (см. табл. 6.3); при наплавке участков поверхности с потенциальной концентрацией напряжений следует применять, например, наплавку в два приема, как показано на рис. 60; 7) правильный выбор наплавочного материала для первого слоя коррозионно-стойкой наплавки с учетом характера влияния основного металла на состав наплавленного слоя; 8) выполнение наплавки только после удаления с поверхности основного металла поверхностного слоя, содержащего дефекты или имеющего повышенную твердость.

Рис. 60. Приемы наплавки угловых участков поверхности деталей:

1 — участок, наплавленный в последнюю очередь;
2 — участок, наплавленный вначале



* WES — американское общество сварочной аппаратуры; AWS — американское общество сварочной техники (Прим. пер.).

СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА И ЕГО ИСПЫТАНИЯ

При наплавке боросодержащего мартенситного материала, осуществляемой с целью повышения износостойкости изделия, наличие небольших трещин в наплавленном металле иногда допустимо.

Поры и раковины. Для предотвращения образования пор и раковин необходимо: 1) зачищать поверхности основного металла от ржавчины, масла и других загрязнений; 2) обеспечивать хранение флюса и наплавочных материалов в условиях, исключающих поглощение влаги, и их прокалку перед использованием для наплавки; 3) воздерживаться от подачи наплавочного материала к очагу наплавки до момента запотевания поверхности основного металла при газовой наплавке и от резкого удаления пламени при окончании наплавки, применять горючие смеси, обеспечивающие получение науглероживающего пламени; 4) воздерживаться от применения при дуговой наплавке большой силы тока и излишних поперечных колебаний электрода, поддерживать оптимальную длину дуги; 5) предотвращать проведение наплавки в условиях неудовлетворительной защиты зоны дуги (обеспечение необходимой защиты сварочной ванны флюсом-шлаком или защитным газом).

Подрезы. Для предотвращения подрезов, особенно характерных для наплавки ленточными электродами, необходимо:

1) исключать наклон наплавляемой поверхности более чем на 3° к горизонту (см. рис. 59); 2) воздерживаться от чрезмерного повышения скорости наплавки; 3) обеспечивать надлежащее положение дуги, исключающее магнитное дутье; 4) выбирать оптимальный способ наложения валиков с необходимым их перекрытием.

Прочие дефекты. Кроме перечисленных, возможно возникновение других дефектов, в том числе застревание шлака в наплавленном металле, неудовлетворительное сплавление наплавленного слоя с подложкой, деформация изделия и др.

Связанные с застреванием шлака и плохим сплавлением дефекты возникают при недостаточной силе тока и низком напряжении при дуговой наплавке или при неправильном манипулировании — подаче присадочного материала. Для предотвращения таких дефектов необходим правильный выбор способа и режима наплавки.

Одна из серьезнейших проблем наплавки — деформация изделий, для предотвращения которой применяют равномерный предварительный подогрев изделия, различные приемы наплавки, исключающие неравномерную деформацию изделия, сварочные приспособления, зажимные устройства и др. Предварительная оценка возможной деформации составляет важнейшую предпосылку правильного выбора мер предотвращения ее при наплавке.

7.1. ИЗНОСОСТОЙКАЯ НАПЛАВКА

Изнашивание. Эксплуатация машин сопровождается изнашиванием деталей, для восстановления которых и повышения их износостойкости применяют наплавку износостойкими сплавами. Для того чтобы наплавка обеспечивала существенное повышение износостойкости, необходим обоснованный выбор материала для каждого конкретного назначения.

Согласно классификации изнашивания по разным принципам, например по виду сред и условиям работы пар трения, выделяют механическое изнашивание, абразивное изнашивание, высокотемпературное окислительное изнашивание, изнашивание скоростной струей жидкости и др. По механизму разрушения трущихся поверхностей различают следующие виды изнашивания: 1) адгезионное; 2) абразивное; 3) при резании (задиры, царапание); 4) коррозионное; 5) поверхностная усталость; 6) ударное; 7) кавитационно-эрозионное.

1. Адгезионное изнашивание. Реальная поверхность металла всегда имеет некоторую волнистость и многочисленные микровыступы, поэтому контактирование двух поверхностей происходит лишь в отдельных выступающих точках (рис. 61). Трение двух металлических поверхностей под некоторой нагрузкой происходит в условиях пластической деформации металла в точках фактического контакта, развитие которой сопровождается сближением поверхностей вплоть до активизации сил сцепления между атомами металлов сопряженных поверхностей и возникновения адгезии на ограниченных участках.

Схема возникновения адгезии в точках контакта показана на рис. 62. В результате пластической деформации металла двух поверхностей происходит их сцепление по линии AA' , однако в условиях действия напряжений сдвига это сцепление неизбежно разрушается. Разрушение зарождается в местах наличия наименьших сил сцепления — на границе раздела между двумя поверхностями, а в случае возникновения достаточно прочного сцепления — схватывания разрушение сдвигом происходит внутри одного из материалов на менее прочном участке, по линии BB' .

Многократное повторение описанного процесса возникновения адгезии и последующего разрушения узлов схватывания, сопровождающееся задирами и истиранием менее твердого металла, со-

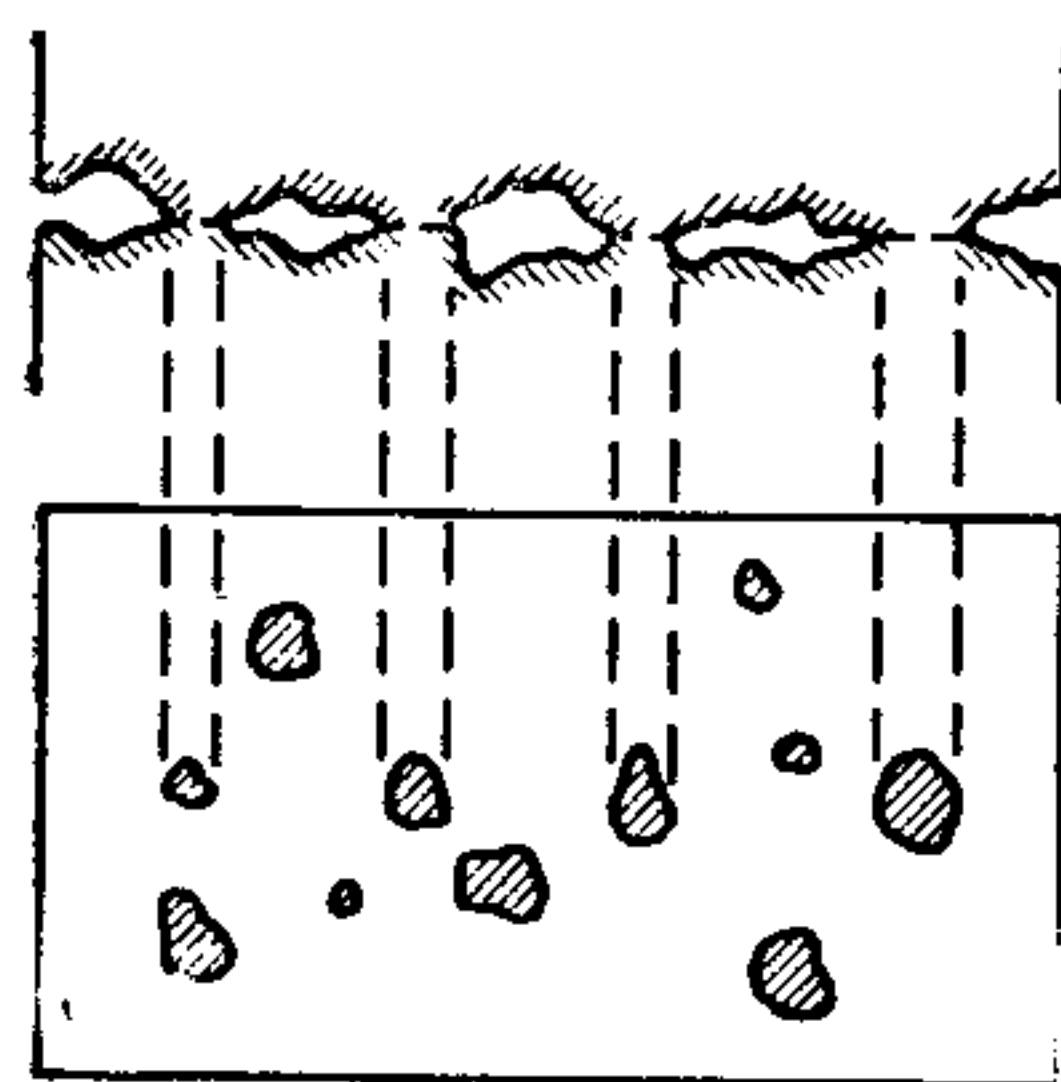


Рис. 61. Модель фактического контакта металлических поверхностей

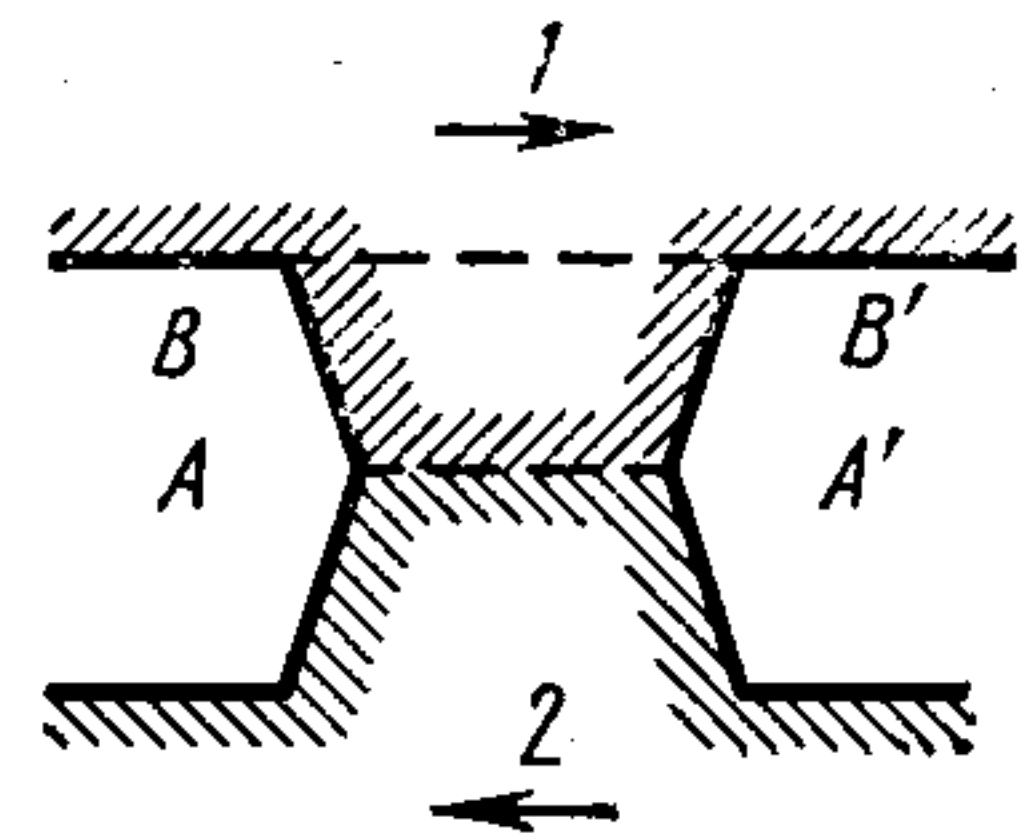


Рис. 62. Схема возникновения точечной адгезии:

1 — направление движения металла низкой твердости; 2 — то же, высокой твердости

ставляет существо адгезионного изнашивания. Часть металла низкой твердости, остающаяся после среза на сопряженной поверхности металла высокой твердости, нарастает на этой поверхности, а затем, превращаясь в порошок, отделяется от нее. Механическое упрочнение этого порошка становится причиной абразивного изнашивания, рассматриваемого в следующем разделе.

Чем выше твердость металла, тем менее он склонен к заеданию, которое затрудняется также в случае, когда сопряженные материалы ограниченно растворяются друг в друге или значительно различаются по свойствам. В экстремальном случае, например при сопряжении металла с пластмассой, адгезионное изнашивание отсутствует полностью.

При трении металлических поверхностей теплота трения вызывает образование поверхностной оксидной пленки, которая при достаточно высокой прочности способствует повышению износостойкости, если под ней находится металл высокой твердости. В случае низкой твердости металла оксидная пленка, даже достаточно прочная, легко разрушается, создавая благоприятные условия для возникновения и развития изнашивания.

2. Абразивное изнашивание. Такое изнашивание происходит в случае, если между трущимися поверхностями тел попадают частицы твердого вещества (рис. 63), вызывающие истирание этих поверхностей в результате резания или царапания.

Предотвращение абразивного изнашивания требует защиты трущихся металлических поверхностей от абразивных частиц. Считают, что для уменьшения этого изнашивания предпочтительно применение металла по возможности высокой твердости. Абразивное изнашивание мягких и твердых поверхностей имеет свои особенности. В частности, при трении металлических поверхностей низкой твердости абразивные частицы утопают в металле, а при высокой твердости металла они оставляют царапины на трущихся поверхностях, что делает абразивное изнашивание похожим на рассматриваемый ниже процесс изнашивания при задирировании.

3. Изнашивание при резании (задирировании, царапании). Процесс изнашивания состоит в том, что выступающие части поверхности ме-

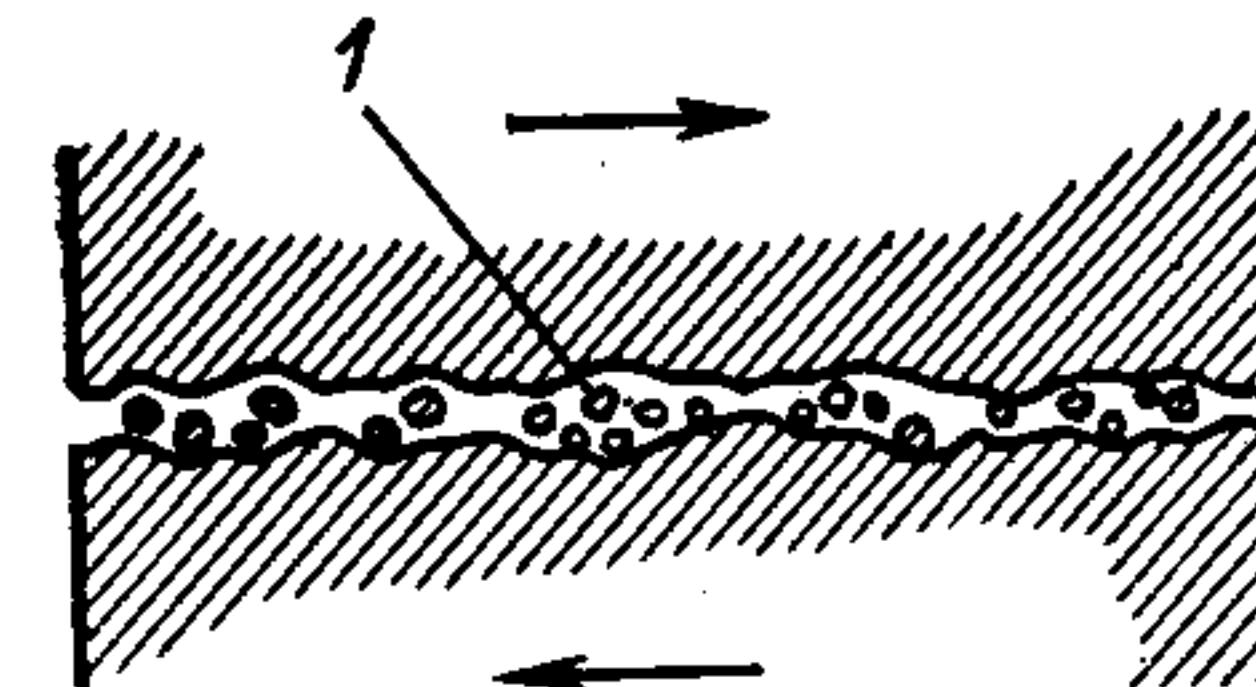


Рис. 63. Модель абразивного изнашивания:

1 — частицы твердого вещества (абразивные частицы)

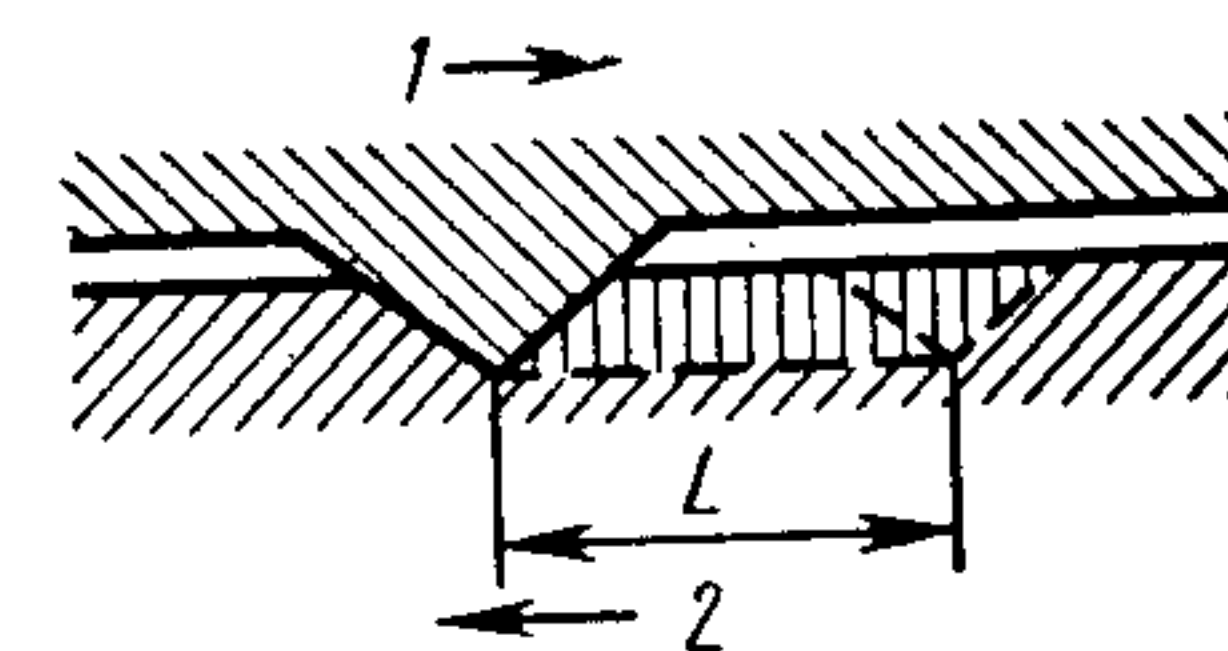


Рис. 64. Модель задирирования (заедания):

1 — направление движения металла высокой твердости; 2 — то же, низкой твердости

талла высокой твердости при трении вызывают пластическое отеснение и локальный срез (микрорезание) сопряженного поверхностного слоя металла низкой твердости (рис. 64). Этот вид изнашивания, как и абразивное изнашивание, в равной мере выражается в образовании задиры и царапин на трущихся поверхностях. Однако при абразивном изнашивании повреждение поверхности вызывается инородными твердыми частицами (песком, стружкой и т. п.), попадающими в зазор между трущимися поверхностями извне, тогда как изнашивание при микрорезании, задирировании и царапании вызывается поверхностями самих трущихся тел. По степени разрушения поверхностей износ при резании может в 10 раз превышать значение износа, вызываемого абразивной средой.

4. Коррозионное изнашивание. При работе в агрессивных средах коррозия деталей зачастую ускоряет их износ. В условиях трения, обеспечивающего очистку поверхности от образовавшихся продуктов коррозии, последняя прогрессирует быстрее. В частности, сера из состава дизельного топлива и влага, конденсирующаяся на стенках цилиндров дизеля, ускоряют износ цилиндров, развивающийся в условиях коррозии.

5. Поверхностная усталость. При длительном движении составов по железнодорожному пути на рабочей поверхности рельсов возникают чешуйчатые выбоины. Такая форма износа связана с тем, что при периодическом действии напряжений сдвига в поверхностном слое возникают локальные разрушения. Это явление носит название поверхностной усталости.

При трении качения по металлической поверхности объекта, создающего большое давление, на глубине $\sim 0,3$ мм возникают максимальные напряжения (рис. 65). При длительном качении на участках действия максимальных напряжений происходят локальные разрушения типа усталостных, приводящие к отделению свободных частиц. Начало возникновения износа, развивающегося даже в присутствии смазки, непредсказуемо.

6. Ударное изнашивание. При длительном действии ударной нагрузки возникает пластическая деформация поверхностного слоя с отделением из него мелких частиц обломков металла.

7. Кавитационно-эрозионное изнашивание. При быстром дви-

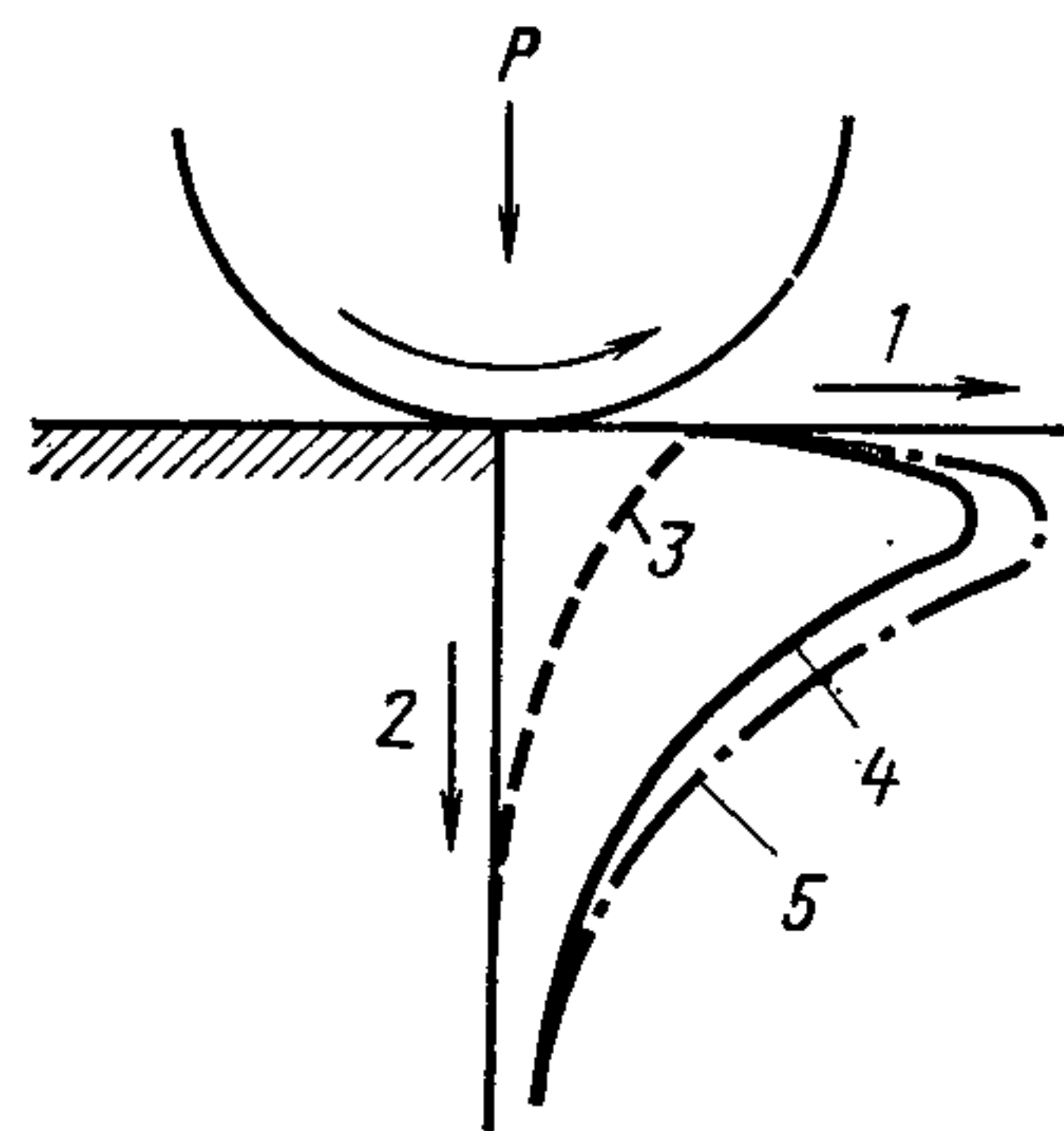


Рис. 65. Кривые распределения напряжений в направлении внутрь тела от поверхности трения качения и скольжения (по Бурвеллу):

1 — напряжение сдвига; 2 — направление внутрь тела; 3 — только скольжение; 4 — только качение; 5 — качение и скольжение

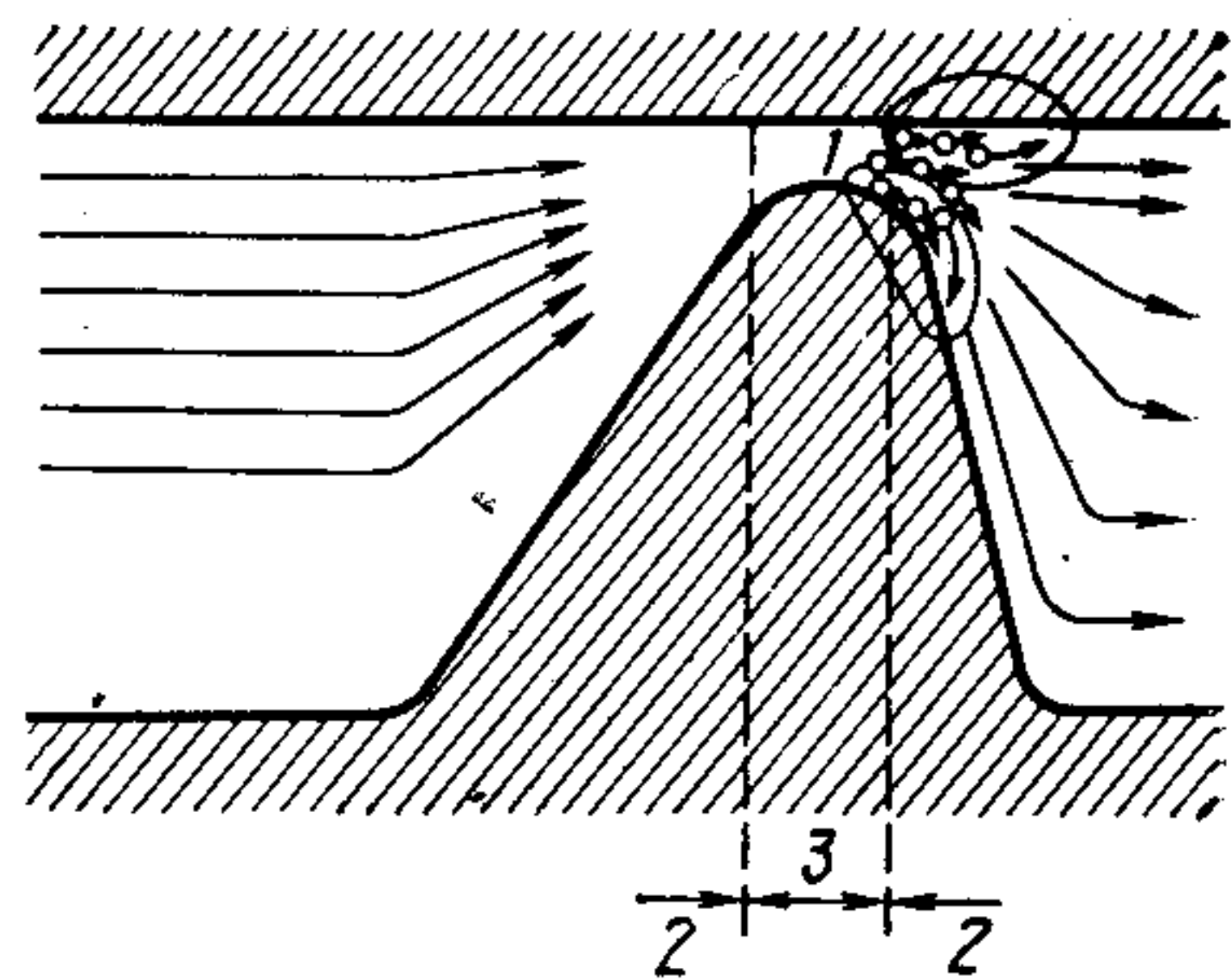


Рис. 66. Модель кавитационного изнашивания:

1 — зона разрушения пузырей, создающего большое давление на стенку изделия; 2 — зона низкой скорости потока и высокого давления; 3 — зона высокой скорости потока и низкого давления

жении металлического изделия внутри жидкости или при скоростном течении жидкости внутри изделия, как показано на рис. 66, ударное действие пузырей, возникающих при колебаниях давления, создает на металлической поверхности большую циклическую нагрузку, вызывающую износ, называемый обычно кавитационным (рис. 67).

Испытания на износ. При наличии многообразия видов изнашивания реальный износ представляет собой сложную комбинацию, которую не всегда можно предусмотреть во время испытаний. В Японии нет стандартов на способы испытаний для определения износостойкости металлов. Ниже перечислены типичные способы, имеющие широкое применение.

1. Ускоренные испытания на износ с использованием машины Огоэ. На рис. 68 показаны форма и размеры образцов для испытания на машине названного типа [1]. Этот способ испытаний используют применительно к износу, преобладающим компонентом которого является адгезионный износ (схватывание). Испытывают пластинчатый образец, прижатый к наружной поверхности вра-



Рис. 67. Эрозионный износ котельной трубы из низкоуглеродистой стали

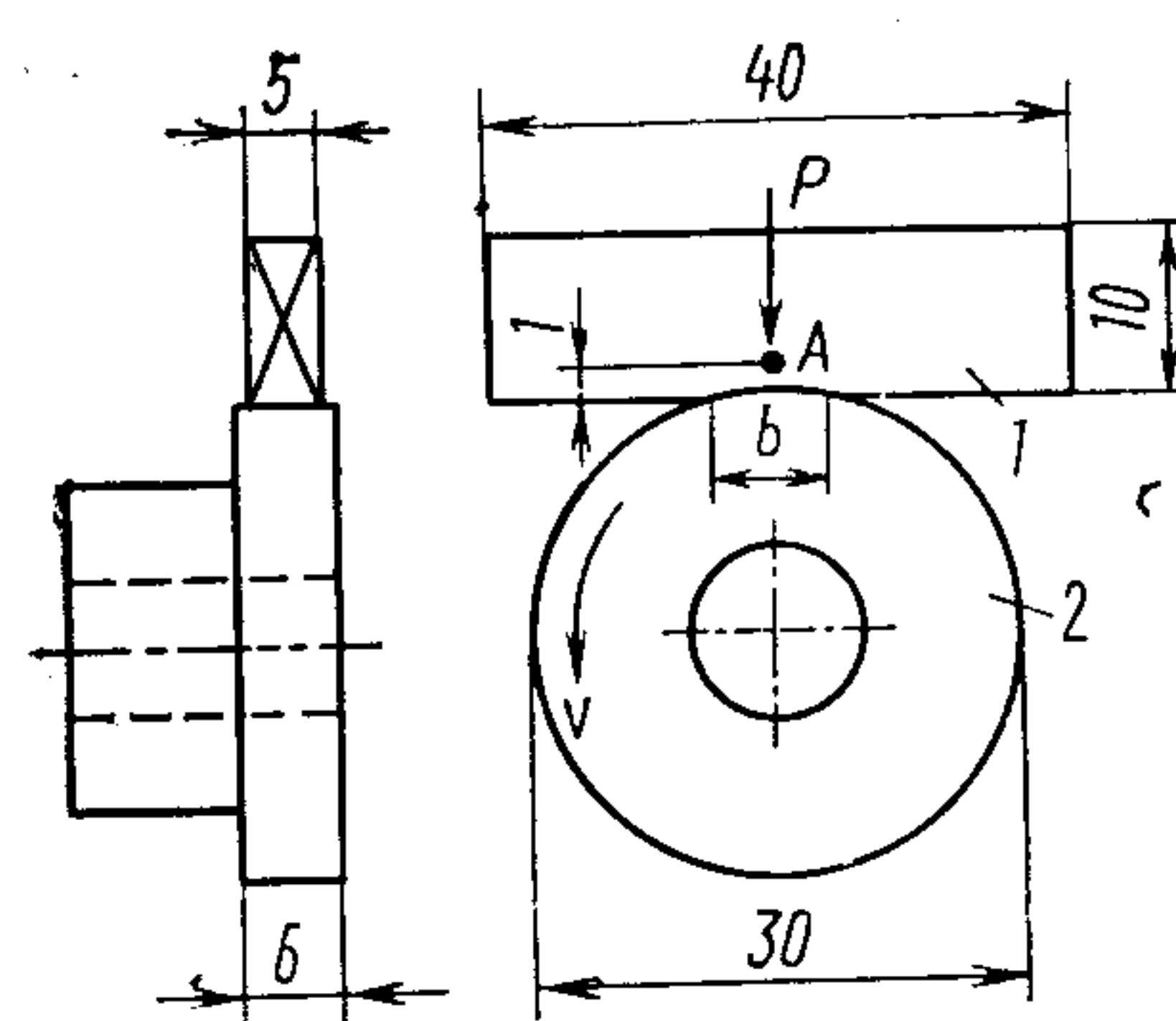


Рис. 68. Эскиз образцов для испытаний на изнашивание при трении: 1 — пластинчатый образец; 2 — вращающийся диск

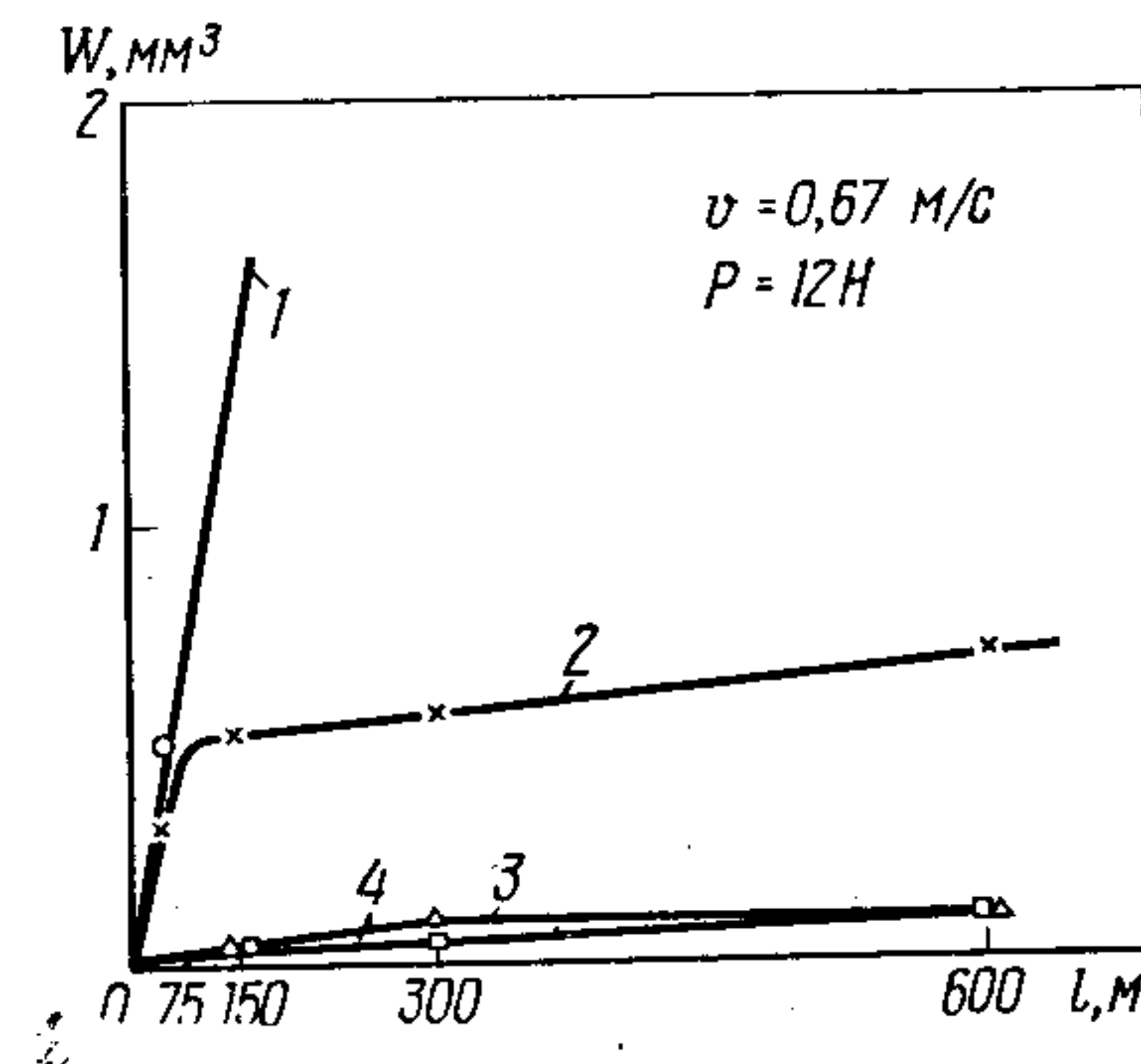


Рис. 69. Соотношение между износом W и длиной l пути трения: 1 — интенсивное изнашивание, образцы D/D, HRC 26, $p=0,3$ МПа; 2 — переход от интенсивного к незначительному изнашиванию, образцы C/C, HRC 42, $p=0,08$ МПа; 3 — незначительное изнашивание, образцы B/B, HRC 42, $p=1,5$ МПа; 4 — незначительное изнашивание, образцы A/A, HRC 60, $p=1,5$ МПа

щающегося диска. Износ определяют расчетом объема изношенного материала. При испытаниях на машине типа Огоэ развитие износа сопровождается увеличением длины линии контакта сопряженных поверхностей (b). Соответствующее увеличение нагрузки осуществляют с помощью эксцентрикового механизма пропорционально увеличению пути трения (l), что обеспечивает испытание в условиях постоянного контактного давления, не зависящего от пути трения. Суммарный объем износа W и его интенсивность w_s рассчитывают по уравнениям [2]

$$W = Bb^3/12r \text{ мм}^3, \quad (7.1)$$

где B — толщина пластинчатого образца; r — радиус вращающегося диска;

$$w_s = W/psl \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{мм}), \quad (7.2)$$

где p — контактное давление; s — площадь контакта; l — путь трения.

На рис. 69 показаны результаты испытаний на износ, осуществленных на машине типа Огоэ с использованием образцов инструментальной стали (состав приведен в табл. 7.1, а), твердость которой изменяли в пределах HV 230—650 путем применения различных режимов термообработки (табл. 7.1, б).

Износостойкость металла значительно зависит от его твердости: при низких ее значениях износ развивается до больших значений даже при сравнительно малой нагрузке (см. рис. 69). При высокой твердости повышение нагрузки почти не вызывает увеличения износа. В начальный период испытаний происходит быстрое нарастание износа, степень которого зависит от твердости и нагрузки, но

7.1, а. Состав образцов инструментальной стали SKS-3, %

C	Si	Mn	
0,96	0,22	1,04	
Продолжение			
P	S	W	Cr
0,016	0,014	0,83	0,7

7.1, б. Режимы термообработки вращающихся дисков и пластинчатых образцов

Обозначение образца	Отпуск после закалки (850°С, 20 мин)	Твердость HRC (HV)
A	190°С, 1 ч	60 (700)
B	400°С, 1 ч	52 (545)
C	570°С, 1 ч	42 (412)
D	700°С, 1 ч	26 (272)

В дальнейшем испытание идет в условиях умеренного развития износа, что связано с механическим упрочнением трущихся поверхностей и образованием за счет теплоты трения поверхностной оксидной пленки.

2. Испытания на износ с использованием машины типа Армслер. Машину этого типа используют при испытаниях на износ в результате схватывания и задирания и на поверхностную усталость. Ниже дана сравнительная оценка износостойкости металла, наплавленного покрытыми электродами [3].

7.2, а. Состав и твердость образцов металла, наплавленного с помощью исследуемых электродов диаметром 4 мм

Обозначения электродов	Состав, %						Твердость HV*	Структура металла
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
2H	0,05	1,06	0,91	0,67	—	—	230	Сорбит
3H	0,08	0,9	1,25	1,85	0,27	—	290	»
4H	0,1	1,08	1,89	1,36	0,56	—	338	Троостит
5H	0,32	0,7	3	6,18	0,6	—	580	Мартенсит
6H	0,64	1,58	1,16	2,72	—	0,2	650	»
CR	0,3	0,83	2,46	10,78	—	—	540	»
NM	0,59	0,16	13,5	—	—	—	250	Аустенит
MR	0,17	0,73	14,2	15,08	—	Ni 3,4	230	»

* Твердость измеряли способом, определенным японским промышленным стандартом Z3114.

7.2, б. Состав нижнего образца (сопряженного элемента из стали SK7)

Состав, %					
C	Si	Mn	P	S	Cu
1,02	0,26	0,36	0,009	0,009	0,18

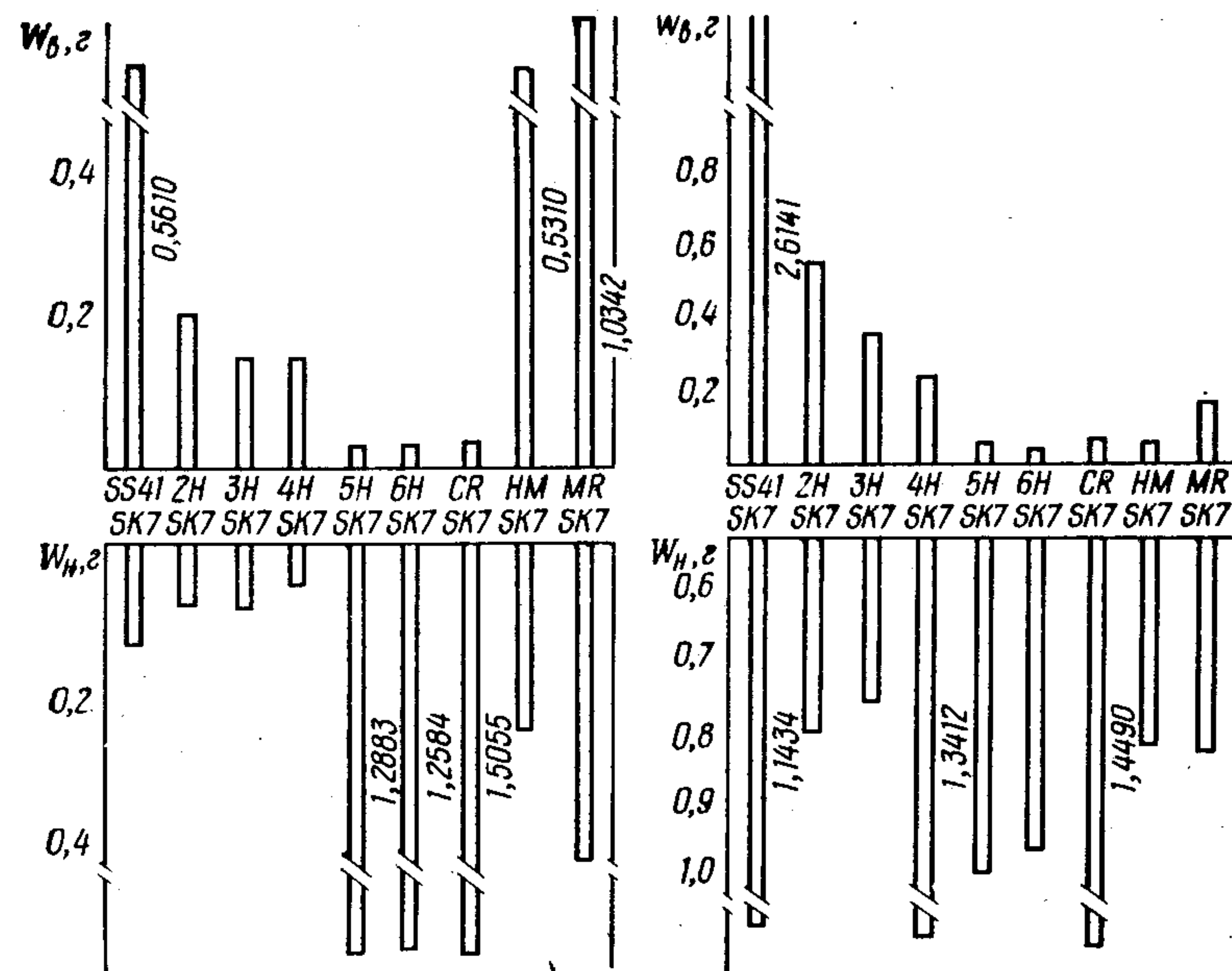


Рис. 70. Износ верхнего w_b и нижнего w_n образцов по результатам испытаний с использованием машины типа Армслер для различных сочетаний образцов из стали SK7 с образцами из стали SS41 и металлом, наплавленным различными электродами

В табл. 7.2 приведены данные по составу испытываемых образцов наплавленного металла и нижнего образца, используемого в качестве сопряженного элемента.

Приведенные на рис. 70 данные испытаний образцов показывают, что для наплавленного металла со структурой сорбита или мартенсита характерно наличие прямо пропорциональной зависимости между твердостью и величиной износа. Износ сопряженного элемента (без термообработки) из стали SK7 зависит от твердости наплавленного металла. В частности, при испытании металла со структурой мартенсита, значительно отличающегося от сопряженного элемента по твердости, сам мартенситный наплавленный металл изнашивается незначительно, тогда как сопряженный элемент изнашивается интенсивно. Таким образом, для снижения износа необходимо подбирать сопряженные детали с учетом твердости.

3. Испытания на износ в абразивной среде. Из многочисленных способов испытания на абразивный износ рассмотрим наиболее типичный способ Мияно, называемый испытанием на износ с вращением образцов в абразивной среде [4].

Машина для испытания этим способом (рис. 71) содержит камеру с абразивным материалом. Внутри камеры смонтирована вращающаяся крыльчатка с четырьмя опорами, в каждой из которых закрепляют испытуемый образец. При испытании образец перемещается внутри абразивной среды при вращении крыльчатки с ча-

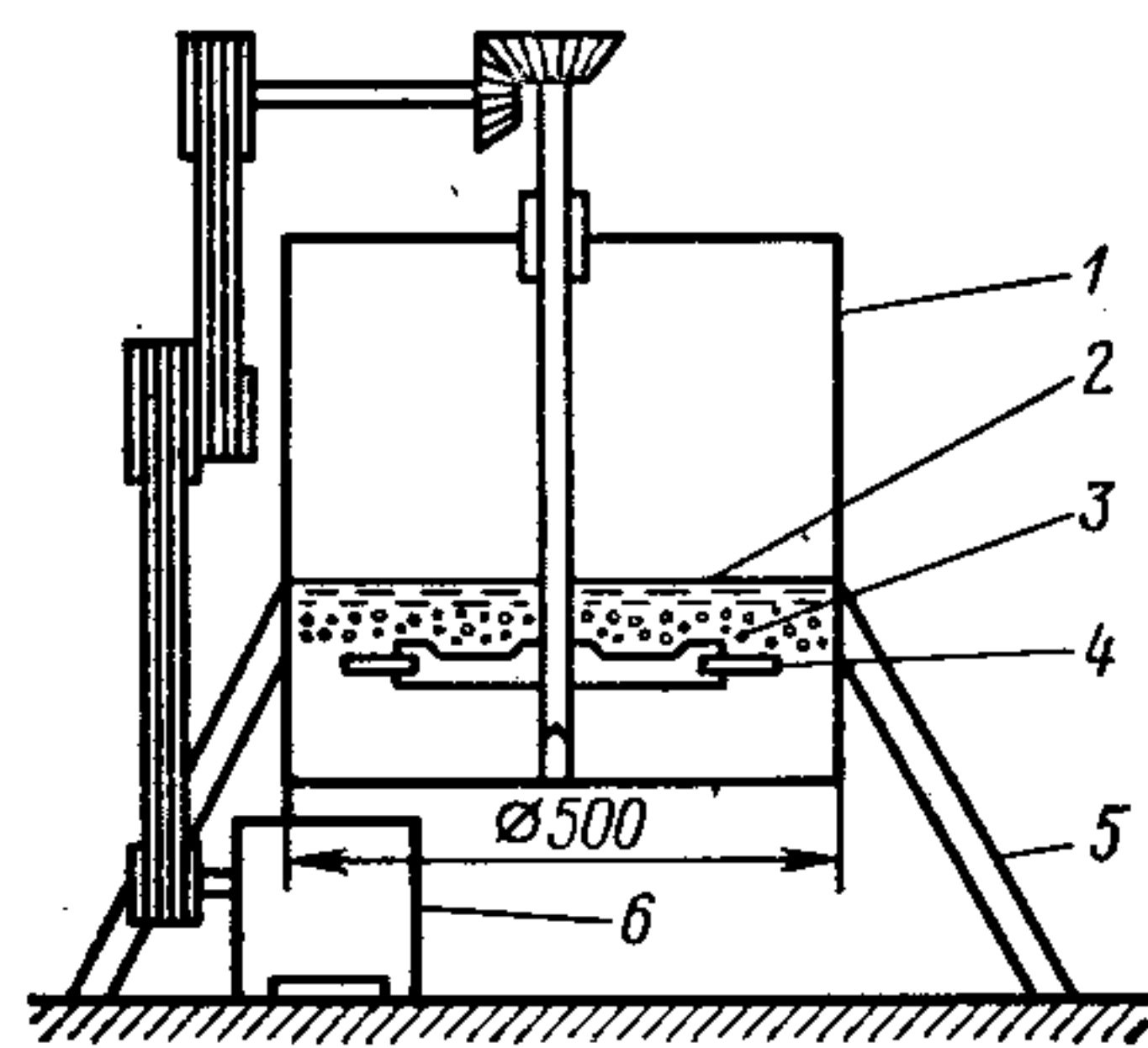


Рис. 71. Схема установки для испытания на износ образцов вращением их в абразивной среде:

1 — корпус; 2 — уровень воды; 3 — слой абразивной среды; 4 — образец; 5 — опора; 6 — электродвигатель

частности, при одной и той же твердости металл со структурой бейнита имеет меньший износ, чем металл со структурой мартенсита, а аустенитная коррозионно-стойкая сталь по износостойкости превосходит как мартенситную, так и бейнитную сталь.

4. Испытание на кавитационный износ. Такое испытание осуществляют с помощью магнитострикционного вибрационного устройства (рис. 73) [6]. Преимущество этого испытательного устройства состоит в том, что изменение амплитуды колебаний позволяет воспроизвести условия кавитационного изнашивания любой желаемой интенсивности. Согласно результатам испытаний, наиболее

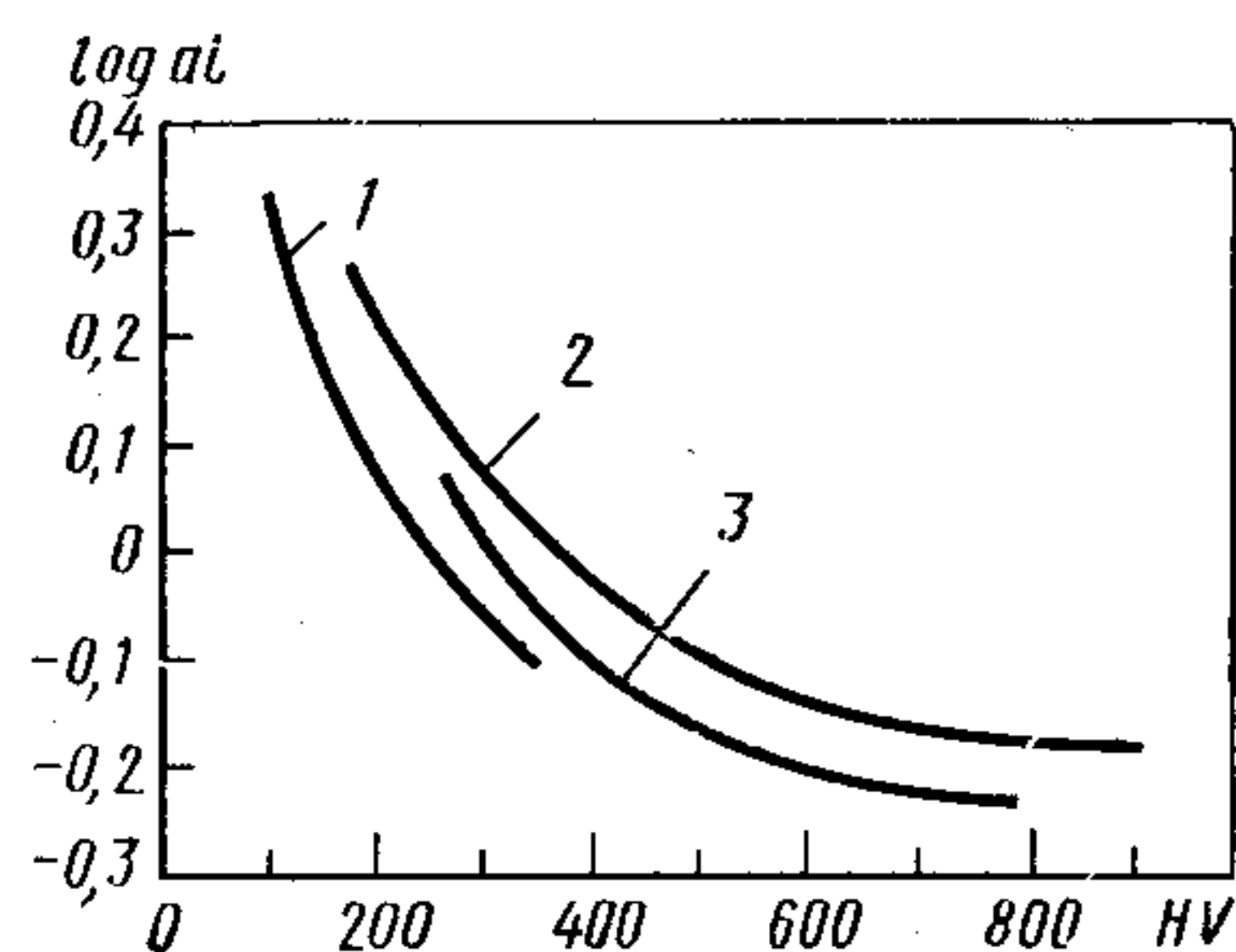


Рис. 72. Зависимость коэффициента гидроабразивного износа ($\log ai$) от твердости материала для сталей различного структурного класса:

1 — сталь с ферритно-перлитной структурой; 2 — сталь со структурой мартенсита и бейнита, а также со структурой отпущенного мартенсита и отпущенного бейнита; 3 — то же, при содержании хрома в стали $>2\%$

стойкой 68 об/мин. Образцы устанавливаются в опорах крыльчатки с наклоном на 30° , в камеру машины вместе с водой загружают абразивную среду в виде песка крупностью 35 меш (0,417 мм), предназначенного для формовочных смесей. Мокрый способ испытаний выбран из расчета его применения для оценки износостойкости деталей трубопроводов для транспортирования грунта, шламовых насосов, бетономешалок и других машин, работающих в контакте с мокрым грунтом.

Результаты испытаний показывают, что повышение твердости металла сопровождается увеличением его износостойкости, а при одинаковой твердости износ в некоторой степени зависит от структуры металла (рис. 72) [5].

В частности, при одной и той же твердости металл со структурой бейнита имеет меньший износ, чем металл со структурой мартенсита, а аустенитная коррозионно-стойкая сталь по износостойкости превосходит как мартенситную, так и бейнитную сталь.

4. Испытание на кавитационный износ. Такое испытание осуществляют с помощью магнитострикционного вибрационного устройства (рис. 73) [6]. Преимущество этого испытательного устройства состоит в том, что изменение амплитуды колебаний позволяет воспроизвести условия кавитационного изнашивания любой желаемой интенсивности. Согласно результатам испытаний, наиболее

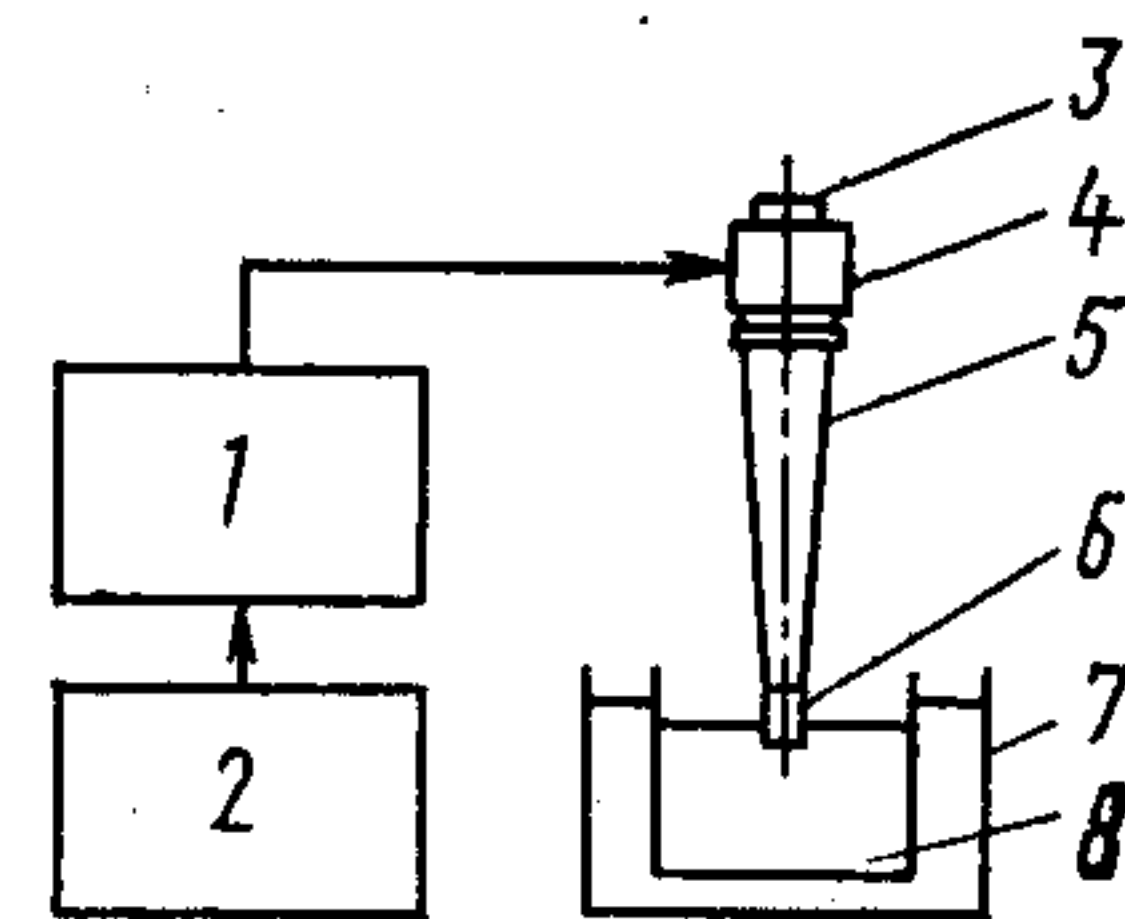


Рис. 73. Схема магнитострикционного вибрационного устройства для испытания материалов на кавитационный износ:

1 — усилитель; 2 — ультразвуковой генератор; 3 — вибратор; 4 — обмотка возбуждения; 5 — зонд; 6 — образец; 7 — ванна с охлаждающей водой; 8 — испытательная жидкая среда

7.3. Стойкость материалов к кавитационному износу по данным различных источников. Перечень материалов дан в порядке возрастания стойкости к кавитационному износу

«Ньюпорт ньюс»	А. Чалмерс	С. Логан Керр	Э. Висс
Амплитуда 44 мкм, частота 1200 Гц	Амплитуда 8 мкм, частота 6500 Гц	Амплитуда 8 мкм, частота 6500 Гц	
Карбид вольфрама (наплавка) Стеллит № 6 (наплавка) Коррозионно-стойкая сталь 308 (наплавка) и типа 18-8	Стеллит (лист) Коррозионно-стойкая сталь 17-7 (наплавка) и типа 18-8 (наплавка)	Литая коррозионно-стойкая сталь типа 18-8 Отливки из алюминиевой бронзы Хромистая сталь (12% Cr)	Никелевая сталь (2% Ni) Коррозионно-стойкая сталь
Хромистая сталь (13% Cr) Коррозионно-стойкая сталь 310 (наплавка) Бронза (наплавка) Отливки из никеле-марганцевистой бронзы Отливки из марганцевистой бронзы Низколегированная сталь Низкоуглеродистая сталь	Отливки из адмиралтейской бронзы Хромистая сталь (12% Cr)	Отливки из марганцевистой бронзы Литая сталь	Алюминиевая бронза Литая сталь
		Серый чугун Медь Свинцовистая бронза	Бронза

высокой стойкостью к кавитационному износу обладает стеллит (табл. 7.3).

Для испытания на кавитационный износ привлекают и некоторые другие способы, например испытание с помощью трубки Вентури и испытание водяной струей.

7.2. КОРРОЗИОННО-СТОЙКАЯ НАПЛАВКА

Коррозия. Коррозией называют процесс разрушения металла под химическим или электрохимическим воздействием на него окружающей среды. Иными словами, коррозия — это процесс превращения металла в оксид или другие соединения посредством захвата валентных электронов, образующих металлическую связь. Этот процесс называют также окислением или анодной реакцией.

В водном растворе всегда есть ионы H^+ и OH^- как продукты частичного распада воды, а также содержится то или иное количество кислорода. При погружении в такой раствор железа его коррозия протекает в условиях образования микрогальванического элемента (рис. 74).

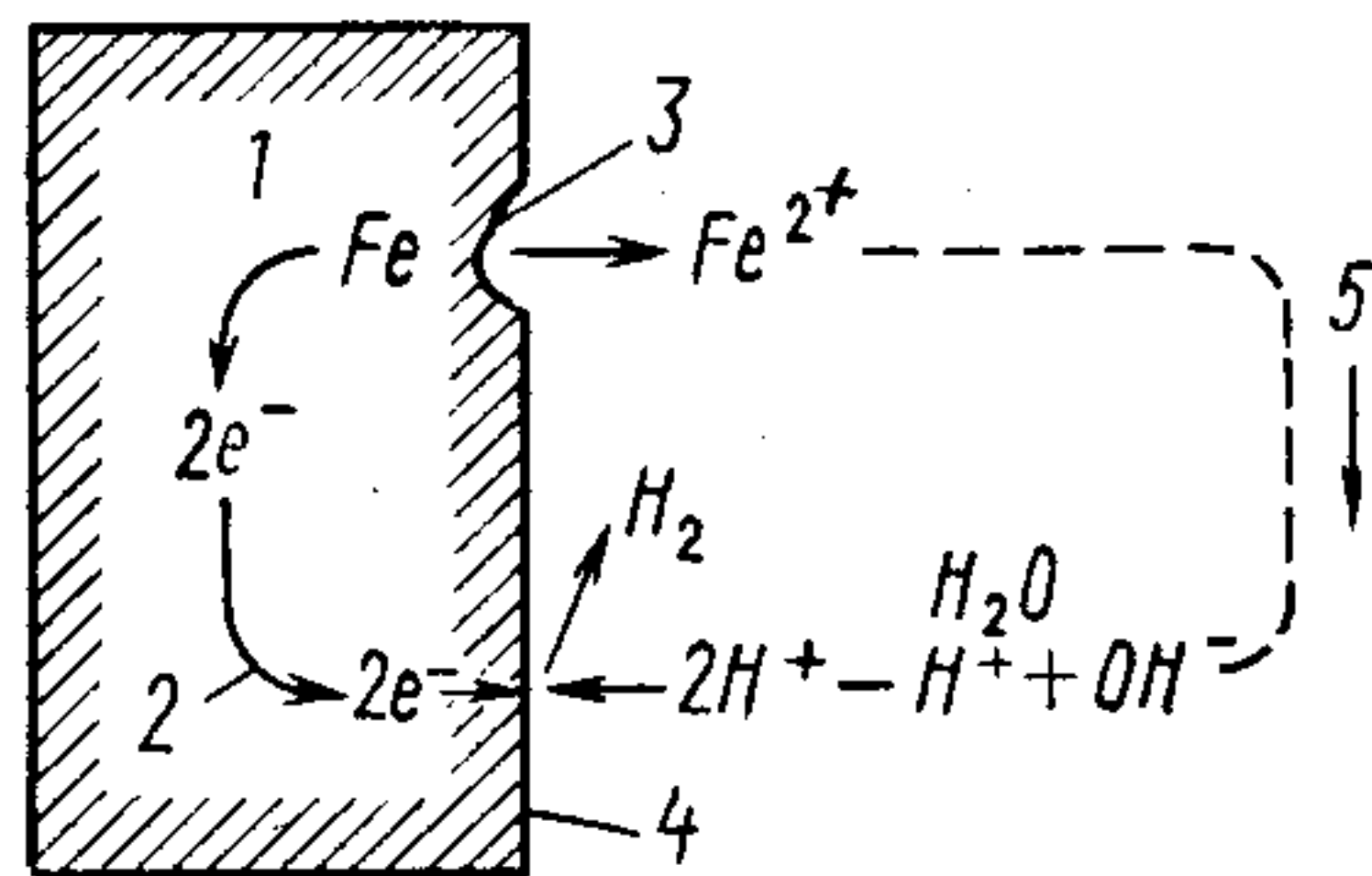


Рис. 74. Гальванический микроэлемент. Схема электрохимического коррозионного процесса для сплавов на основе железа (в среде раствора):

1 — металл; 2 — поток электронов; 3 — анод; 4 — катод; 5 — ток

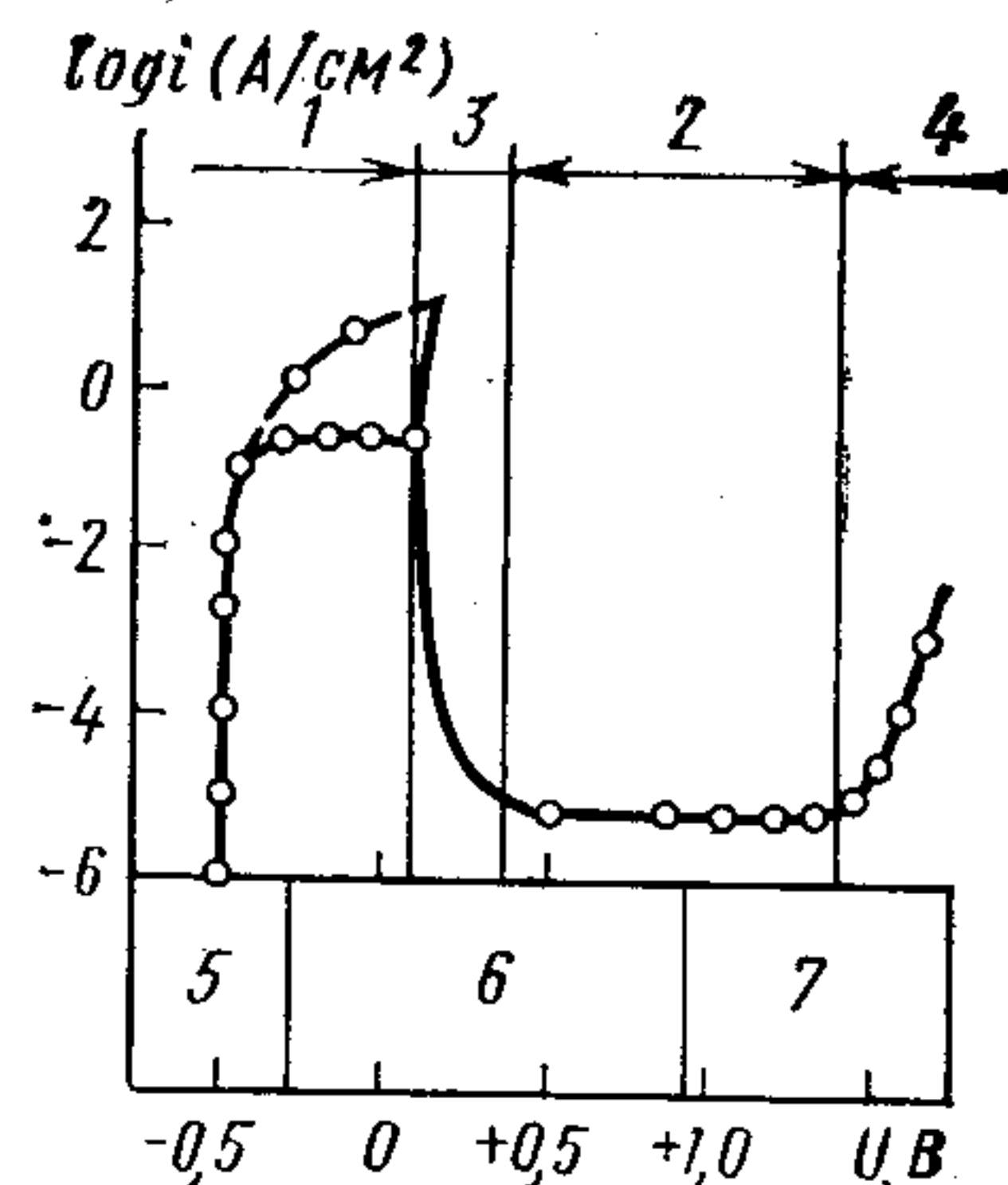
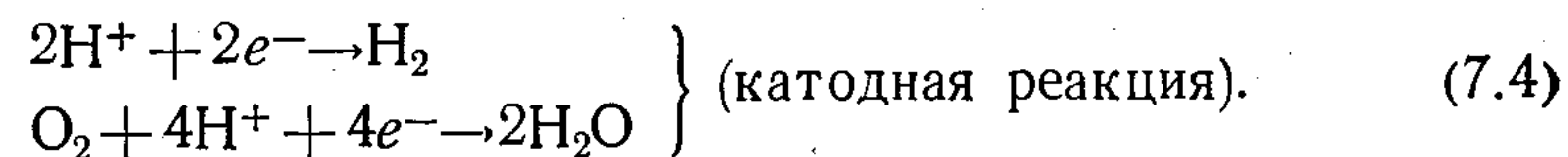
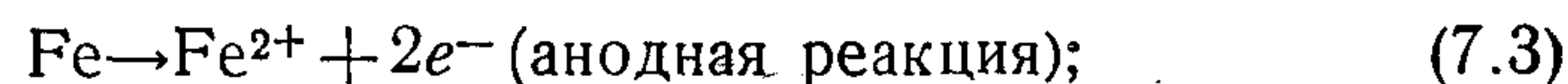


Рис. 75. Кривая поляризации. Соотношение между логарифмом анодного тока $\log i$ и электродным потенциалом U :

1 — активное состояние; 2 — пассивное состояние; 3 — переход из активного в пассивное состояние; 4 — перепассивация; 5 — область возможного образования водорода; 6 — область стабильного состояния; 7 — область возможного образования кислорода

Процесс коррозии можно выразить с помощью химических реакций



Для образования гальванического элемента необходимо одновременное протекание катодной и анодной реакций; в случае прекращения какой-либо из этих реакций прекращается и развитие коррозии. Одной из причин прекращения указанных реакций является переход металла в пассивное состояние из-за образования поверхностной пленки, предотвращающей дальнейшее окисление (анодная поляризация). По мере повышения окислительных свойств раствора коррозия металла достигает максимальной активности, после чего происходит резкое снижение активности вплоть до почти полного прекращения коррозии. В электрохимическом выражении это явление можно продемонстрировать с помощью кривой поляризации. На рис. 75 показана кривая поляризации для железа в водном растворе 1 N (5%) серной кислоты. При отрицательном электродном потенциале через раствор проходит анодный ток и соответственно возрастает скорость коррозии образца. При смещении электродного потенциала в положительную сторону в связи с активизацией образования оксидов железа более высокой валентности вся поверхность образца оказывается покрытой оксидной пленкой, что приводит к резкому уменьшению тока коррозии. Образующаяся при этом пассивная оксидная пленка тормозит скорость коррозии железа. Коррозионно-стойкие стали дают пример

эффективного использования пассивной оксидной пленки, образующейся в результате введения в состав стали хрома и никеля.

Коррозию классифицируют по разным принципам, в частности по механизму процесса, виду агрессивной среды и т. п. В настоящей книге принята следующая классификация: 1) межкристаллитная коррозия; 2) коррозионное растрескивание под напряжением; 3) точечная коррозия; 4) щелевая коррозия; 5) коррозионная усталость; 6) высокотемпературная коррозия. Ниже рассмотрены отдельные виды коррозии по этой классификации.

1. Межкристаллитная коррозия. Нестабильность границ кристаллического зерна структуры металла создает благоприятные условия для образования вторичных фаз, ликвации и диффузии. Следовательно, при некоторых условиях на границах зерна может снижаться концентрация тех элементов, которые способствуют повышению коррозионной стойкости, и повышаться концентрация вредных примесей. В таких условиях границы зерна становятся участком преимущественного проникания коррозии, распространение которой в глубь металла сопровождается разрушением по границам зерна. Схема межкристаллитной коррозии (МКК) показана на рис. 76.

Для выявления МКК коррозионно-стойкой стали ее подвергают нагреву до некоторой температуры, составляющей 450—850°С для аустенитной (коррозия этой стали возникает после кратковременной выдержки при этой температуре) и выше 900°С для ферритной стали (после нагрева этой стали необходимо быстрое охлаждение).

МКК сопровождается образованием карбида хрома (Cr_{23}C_6) по границам зерна, вследствие чего вблизи границ образуется зона пониженного содержания хрома, большая часть которого поглощается карбидом (рис. 77).

Таким образом, задача предотвращения МКК наплавленного металла требует использования аустенитной коррозионно-стойкой стали с пониженным содержанием углерода (стали D308L, 316L, 317L) или стали со стабилизированной структурой, образованной

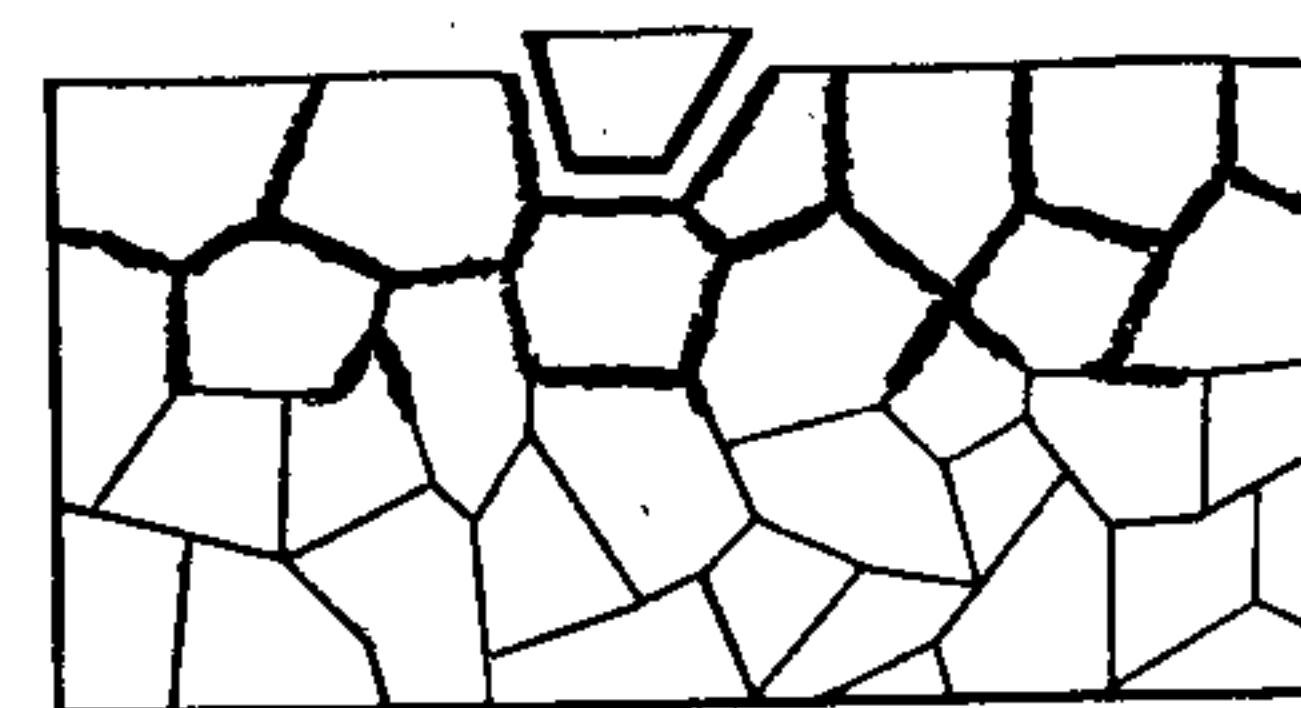


Рис. 76. Модель межкристаллитной коррозии

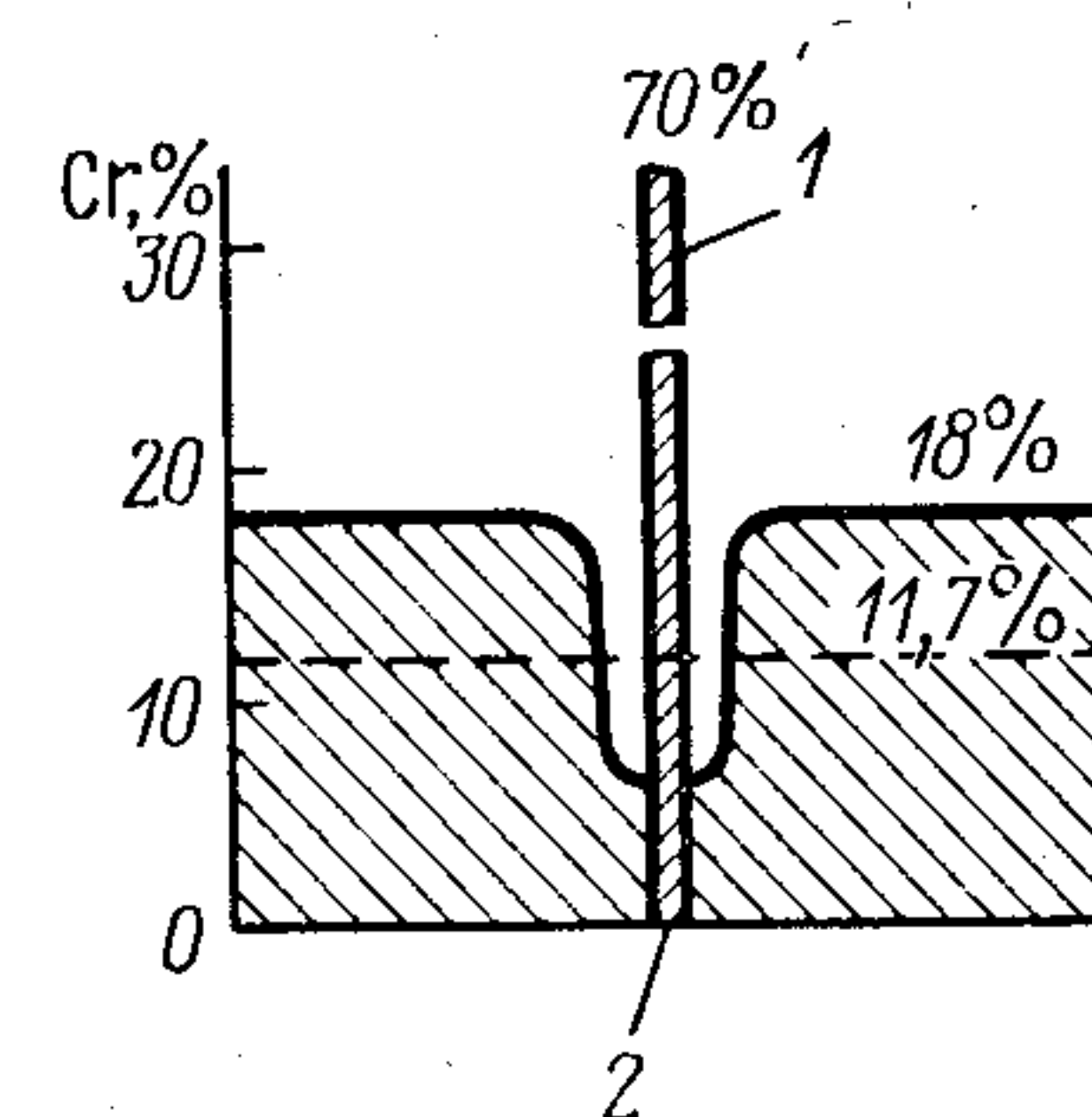


Рис. 77. Зона пониженного содержания хрома около границы кристаллического зерна:

1 — более 70% Cr в составе карбида; 2 — граница зерна

путем введения в ее состав ниобия или других элементов, стабилизирующих углерод (D347). Предотвращение МКК требует также снижения содержания фосфора и других примесей.

К числу элементов, способствующих развитию МКК аустенитной коррозионно-стойкой стали, относятся углерод, молибден, фосфор и некоторые другие. При незначительном содержании кремний также ускоряет МКК, но при его содержании выше некоторого предела он способствует повышению стойкости стали к указанной коррозии. Содержание никеля в стали необходимо согласовывать с концентрацией углерода, при низком уровне которого допустимо повышение содержания никеля. Согласно сообщениям, молибден способствует развитию МКК за счет образования σ -фазы и других интерметаллических соединений [8].

2. Коррозионное растрескивание под напряжением. Возникновение коррозионных трещин под влиянием напряжений, действующих в условиях коррозии, называют коррозионным растрескиванием под напряжением. Большинство поломок химического оборудования связано именно с этим явлением, которому было посвящено большое число исследований, вскрывших его сложность и зависимость от многочисленных факторов.

Коррозионное растрескивание под напряжением наблюдается лишь при наличии в растворе специфичных определенных для данного металла ионов и не возникает в чистых металлах. Эта разновидность коррозии не возникает также в случае развития общей коррозии.

Коррозионное растрескивание под напряжением может развиваться в двух формах, в том числе в виде межзеренных трещин, распространяющихся по границам кристаллического зерна, и внутризеренных трещин, пересекающих зерно. При работе деталей под малой нагрузкой в среде со слабыми агрессивными свойствами возникают межзеренные трещины, а при больших нагрузках в сильных агрессивных средах создаются условия для образования внутризеренных трещин. Форма коррозионного растрескивания зависит также от вида материала и его состояния.

Образование внутризеренных трещин инициируется обычно точечной коррозией.

Процесс коррозионного растрескивания под напряжением схематически показан на рис. 78. Зарождение и рост трещин коррозии под напряжением проходит через ряд ступеней, включающих возникновение локального скольжения дислокаций под действием механических напряжений (рис. 78, I); разрушение пассивной оксидной пленки и обнажение свежей металлической поверхности (II); начало развития коррозии от участка обнажения металла (III); образование новой пленки, переводящей этот участок в пассивное состояние (IV); дальнейший рост трещины при повторении цикла, включающего скольжение, коррозию и переход в пассивное состояние (V). Если после обнажения свежей металлической поверхности она переходит в пассивное состояние, то трещины коррозии под напряжением не образуются.

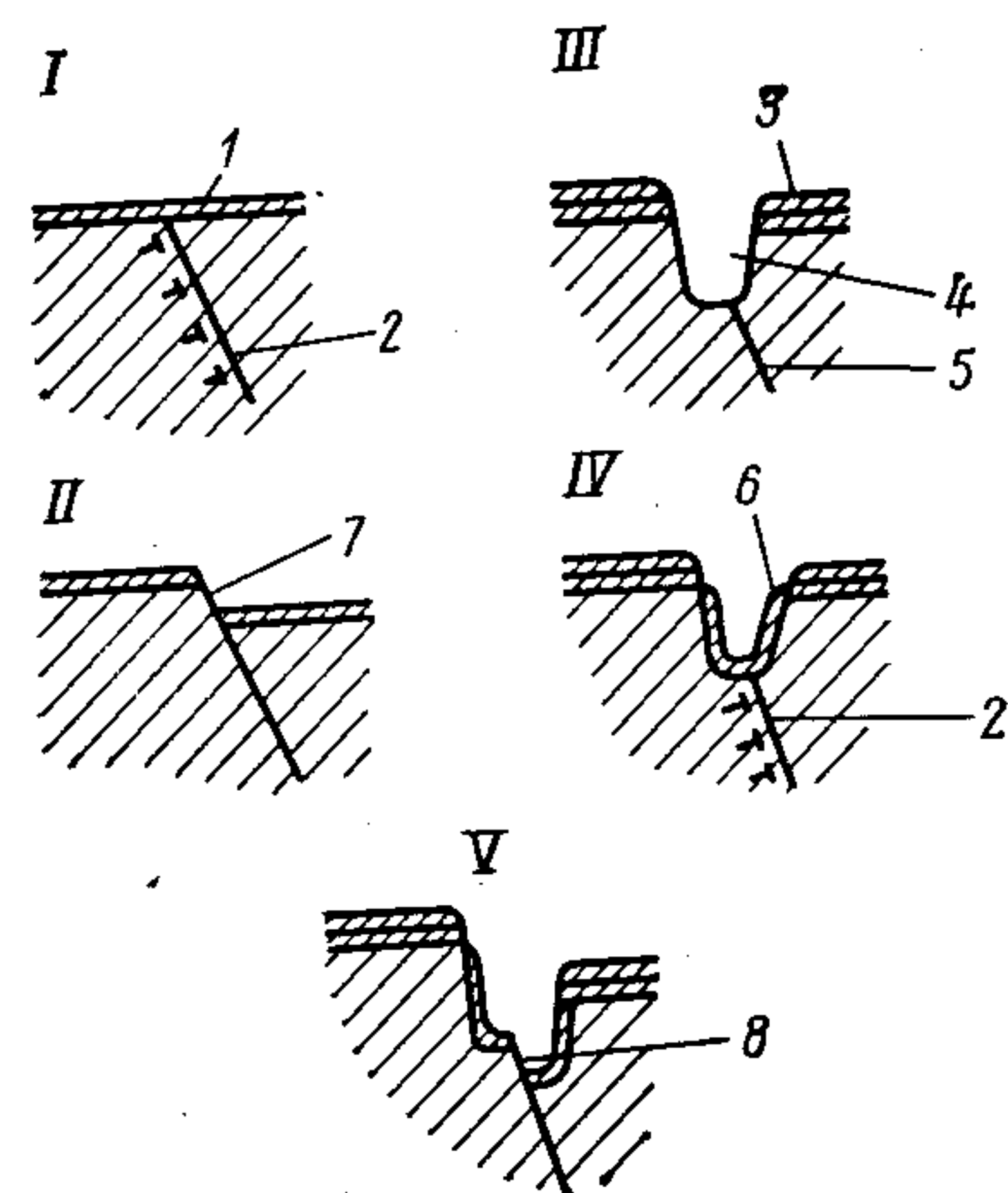


Рис. 78. Схема процесса зарождения и роста трещин коррозии под напряжением:

1 — оксидный слой; 2 — плоскость скольжения; 3 — продукты коррозии; 4 — образование язвин; 5 — плоскость скольжения в начальном состоянии; 6 — переход в пассивное состояние; 7 — незащищенная поверхность металла; 8 — разрушение защитной пленки и дальнейший рост язвины

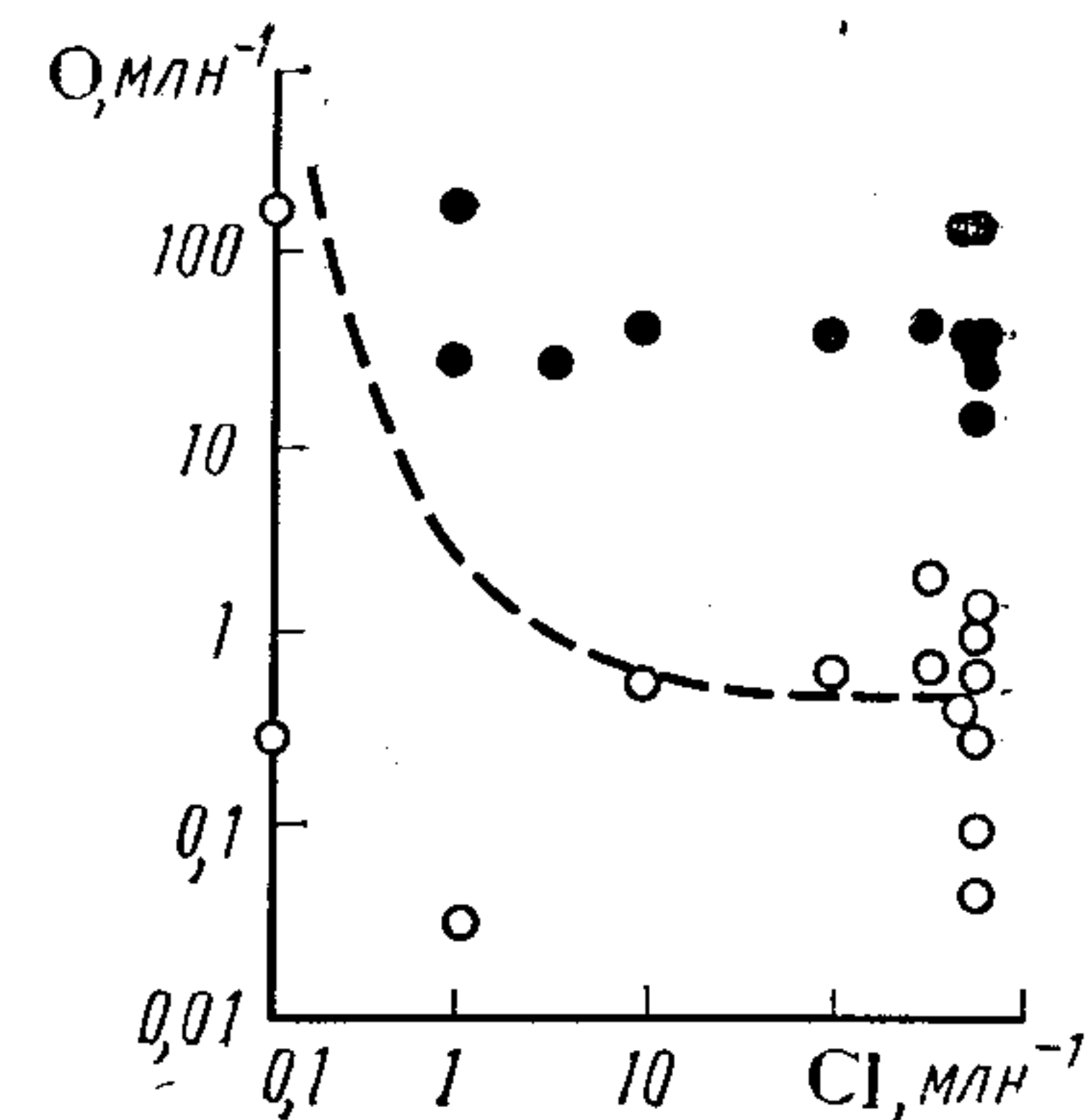


Рис. 79. Влияние концентрации хлоридов Cl и кислорода O в котельной воде, подвергнутой обработке фосфатами щелочных металлов, на коррозионное растрескивание под напряжением коррозионно-стойкой стали (по Вильямсу):

● — трещины есть; ○ — трещин нет

В аустенитной коррозионно-стойкой стали на развитие коррозионного растрескивания под напряжением большое влияние оказывают содержащиеся в растворе галоидные соединения (хлориды, бромиды) и кислород. В частности, повышение в горячей воде концентрации ионов Cl^- (рис. 79) создает условия для возникновения в стали трещин даже при концентрации кислорода ниже 1 млн^{-1} [9].

Испытания в кипящем водном растворе хлористого магния показали, что с повышением содержания никеля в коррозионно-стойкой стали время до возникновения трещин увеличивается, а при содержании более 45% Ni образование трещин полностью прекращается. Кроме того, углерод и кремний тормозят коррозионное растрескивание под напряжением, тогда как молибден, фосфор и азот стимулируют его. Вместе с тем в воде высоких параметров углерод способствует развитию коррозионного растрескивания под напряжением, а если названное растрескивание связано с точечной коррозией, то молибден начинает действовать как полезный элемент, тормозящий развитие коррозии. В табл. 7.4 приведены данные по влиянию различных элементов на коррозионное растрескивание под напряжением аустенитной коррозионно-стойкой стали в среде кипящего водного раствора хлорида магния и в воде высоких параметров [9].

3. Точечная коррозия. Коррозия, имеющая форму поверхностных язвин, отличается тем, что при некоторых условиях она может

7.4. Влияние некоторых легирующих элементов на коррозионное растрескивание под напряжением аустенитной коррозионно-стойкой стали

Элементы	45%-ный кипящий раствор MgCl ₂ (154°C)	Вода высоких параметров (300°C) с концентрацией 500 млн ⁻¹ ионов Cl ⁻ и 8 млн ⁻¹ кислорода
C	А	Д
Si	А	Б
Cu	Г	Б
Mo	Д	Б
Ni	А	Б
Cr	Г	Б
P	Д	Г
N	Г	Г
V	В	Б

Примечание. А — особо полезный; Б — полезный; В — не влияет; Г — вредный; Д — особо вредный.

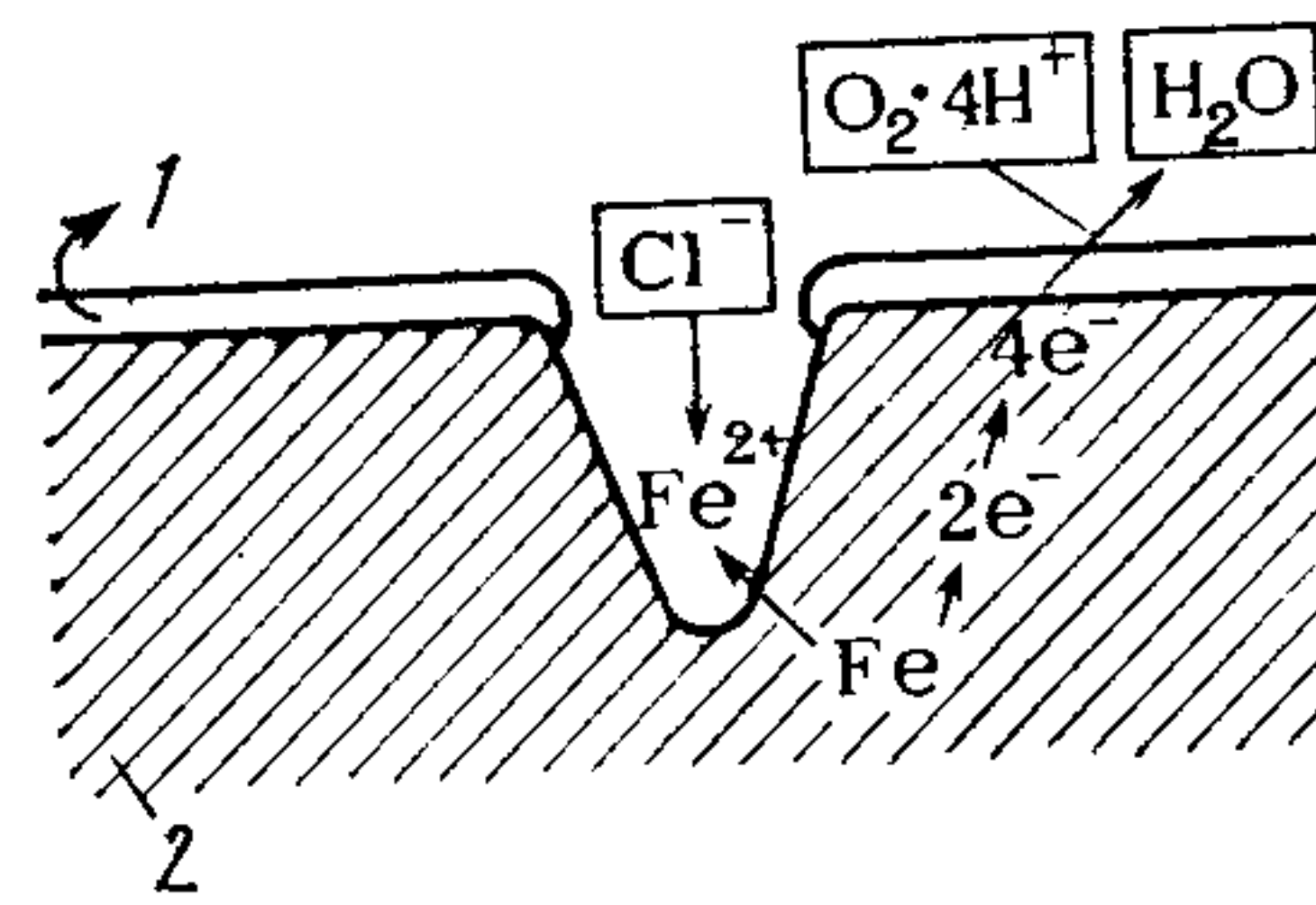


Рис. 80. Модель точечной коррозии: 1 — пассивная оксидная пленка; 2 — металл

успешно развиваться на микроскопических участках даже при пассивном состоянии большей части поверхности (рис. 80).

Точечная коррозия возникает в растворах, содержащих катионы галогенов (хлора, брома, йода), растворенный кислород и анионы трехвалентного железа, двухвалентной меди и других элементов. При возник-

новении зародыша точечной коррозии концентрация катионов хлора в образовавшейся язвине становится выше, чем в окружающей агрессивной среде, что вызывает дальнейший рост язвины из-за снижения плотности водородных ионов (величины pH). Хром и молибден вызывают торможение точечной коррозии [10].

4. Щелевая коррозия. Коррозия, обладающая большим сходством с точечной коррозией, зарождается в щелях, где создаются условия для повышения концентрации агрессивных компонентов состава среды. Точечная же коррозия, зарождаясь на микроучастках, вырастает в язвины, которые могут играть роль щелей и стимулировать щелевую коррозию. Поэтому при разработке конструкции и выборе материалов для каждого из ее элементов следует особое внимание уделять мерам, направленным на исключение условий зарождения и развития щелевой коррозии.

Металловедческие меры предотвращения этой коррозии совпадают с мерами, рекомендуемыми для защиты от точечной коррозии.

5. Коррозионная усталость. Снижение прочности металла, возникающее в результате совместного воздействия агрессивной среды и знакопеременной нагрузки, называют коррозионной усталостью. Разрушение в результате коррозионной усталости проявляется в большей степени, чем разрушение от раздельного воздействия двух названных факторов. Разрушение под действием коррозионной усталости отличается от разрушения в результате коррозионного растрескивания под напряжением по ряду следующих

аспектов: 1) разрушение может происходить только под воздействием знакопеременной или периодической нагрузки; 2) разрушению в результате коррозионной усталости подвержены и чистые металлы; 3) коррозионная усталость возникает в любых агрессивных средах.

При испытаниях на коррозионную усталость разрушение может наступить при любом наложенном напряжении, вызывающем внутри зерен металла скопление плоскостей скольжения [11]. В случае, когда предварительно подвергшийся коррозии металл испытывают на усталость без специальных сред, получаемые результаты существенно не отличаются от результатов обычных усталостных испытаний.

Для предотвращения коррозионной усталости следует, если позволяют экономические возможности, выбирать металл с высокой коррозионной стойкостью. Определенного эффекта достигают при добавлении к агрессивной среде ингибиторов коррозии.

6. Высокотемпературная коррозия. Во время работы при высоких температурах в условиях интенсивного течения химических, диффузионных и испарительных процессов на поверхности изделия зачастую образуется толстый слой продуктов коррозии. Высокотемпературная коррозия включает высокотемпературное окисление, жидкостную коррозию при высокой температуре, анодную коррозию на высокотемпературных участках при наличии большого температурного градиента и т. д. Ниже рассмотрено высокотемпературное окисление.

Для повышения стойкости металла к высокотемпературному окислению необходимо: 1) образование плотной и равномерной оксидной пленки на поверхности, низкий уровень коэффициентов диффузии ионов металла и окиси внутри пленки; 2) стойкость образующейся оксидной пленки к растрескиванию и отслоению; 3) быстрое восстановление защитной оксидной пленки после растрескивания или отслоения.

Всеми этими особенностями в должной мере обладает хром, являющийся одним из элементов, повышающих стойкость стали к высокотемпературному окислению. Структура оксидной пленки на

7.5. Упругость диссоциации оксидов при 1000 °C

Реакции	Упругость диссоциации, МПа
$FeO \rightleftharpoons Fe + \frac{1}{2}O_2$	$1,7 \cdot 10^{-16}$
$Fe_3O_4 \rightleftharpoons 3FeO + \frac{1}{2}O_2$	$2,8 \cdot 10^{-19}$
$Fe_2O_3 + \frac{2}{3}Fe_3O_4 \rightleftharpoons \frac{1}{6}O_2$	$1,7 \cdot 10^{-7}$
$CaO \rightleftharpoons CO + \frac{1}{2}O_2$	$1,6 \cdot 10^{-12}$
$NiO \rightleftharpoons Ni + \frac{1}{2}O_2$	$1,7 \cdot 10^{-11}$
$Cr_2O_3 \rightleftharpoons 2Cr + \frac{3}{2}O_2$	$2,5 \cdot 10^{-23}$
$Al_2O_3 \rightleftharpoons 2Al + \frac{3}{2}O_2$	$1,3 \cdot 10^{-36}$
$SiO_2 \rightleftharpoons Si + O_2$	$1,1 \cdot 10^{-29}$

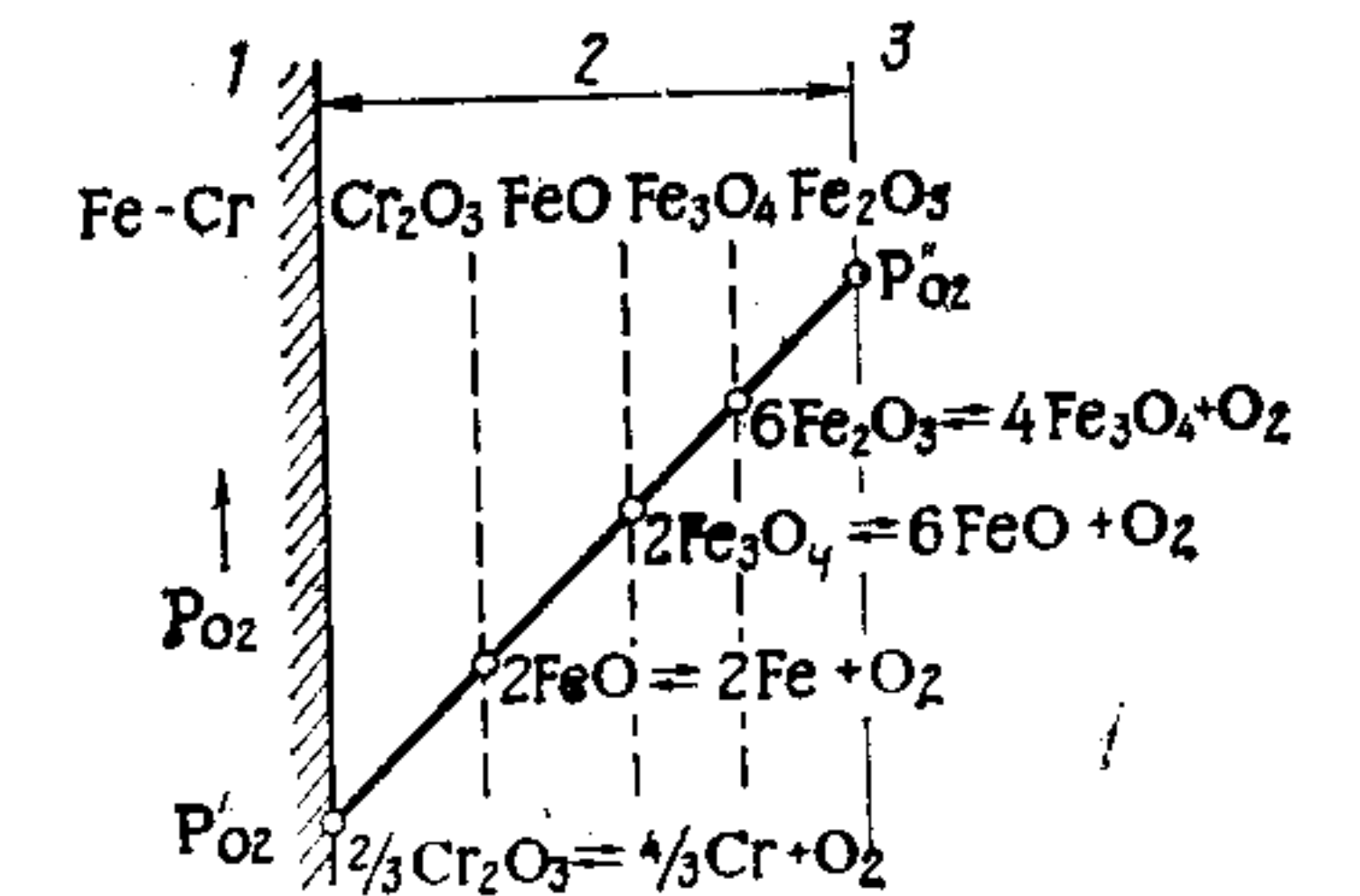


Рис. 81. Структура поверхностной оксидной пленки сплава системы Fe—Cr:

1 — сплав; 2 — оксиды; 3 — кислород воздуха

поверхности стали и сплава определяется парциальным давлением кислорода и упругостью диссоциации (табл. 7.5) [12].

Структура оксидной пленки хромистой стали по ее толщине показана на рис. 81 [12]. Парциальное давление кислорода внутри пленки в направлении к поверхности сплава постепенно снижается, однако хром способен к образованию оксида Cr_2O_3 в самом нижнем ее слое при самом незначительном парциальном давлении кислорода.

Стали и сплавы с высоким содержанием хрома имеют высокую стойкость к высокотемпературному окислению в связи с тем, что он обеспечивает быстрое образование плотной защитной пленки, состоящей из оксида Cr_2O_3 .

На рис. 82 показаны данные по предельной температуре применения коррозионно-стойкой стали без защитной атмосферы [12]. Наиболее стойкими к высокотемпературному окислению являются стали 310 и 446 с высоким содержанием хрома, высокой стойкостью обладают также никелевые сплавы «хастеллой» и «инконель».

Испытание на коррозионную стойкость. Ниже рассмотрены способы испытаний на стойкость к различным видам коррозии в соответствии с приведенной классификацией.

1. Испытание на стойкость к МКК выполняют по различным методикам; некоторые из которых перечислены в табл. 7.6.

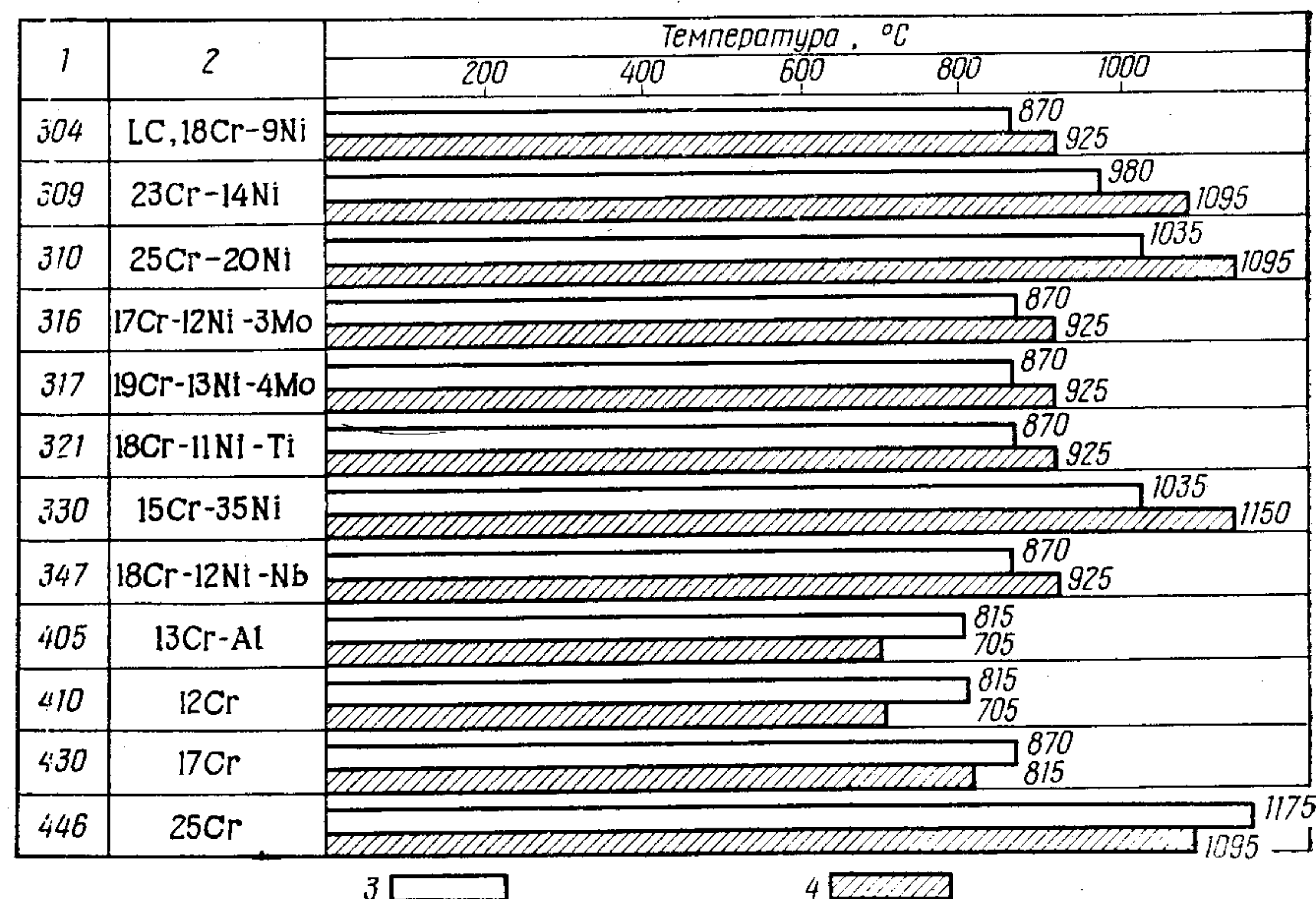


Рис. 82. Температура применения коррозионно-стойкой стали без защитной атмосферы (по Морису):

1 — марка стали (серии SUS японский промышленный стандарт); 2 — примерный состав стали, %; (LC — сталь с низким содержанием углерода); □ — работа в условиях периодического нагрева; ▨ — работа в условиях непрерывного нагрева

7.6. Испытание на стойкость к МКК

Способ испытания	Способ оценки	Среда испытания	Японский промышленный стандарт
Электролиз	Микроструктурный	Травление 10%-ной щавелевой кислотой	G0571
Погружение в горячую кислоту	По скорости коррозии	Испытание серной кислотой и сульфатом двухвалентного железа	G0572
	По скорости коррозии	Испытание 65%-ной азотной кислотой (способ Хью)	G0576
	По относительной скорости коррозии	Испытание в азотной и фтористоводородной кислотах	G0574
	По склонности к возникновению трещин	Испытание в серной кислоте с сульфатом меди (способ Штраусса)	G0575

2. Испытание на стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением осуществляют в агрессивных жидких средах, состав которых приведен в табл. 7.7. Японским промышленным стандартом G0576 установлен способ испытаний на стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением в среде кипящего 42%-ного раствора хлористого магния. Испытание осуществляют при постоянной нагрузке, обеспечивающей в образцах постоянное напряженное состояние.

3. Испытания на стойкость к точечной коррозии осуществляют различными способами, в том числе включающими испытание образцов металла в водном растворе хлорида трехвалентного железа или растворе поваренной соли с добавлением окислителя, способ измерения потенциала точечной коррозии и др.

а. Испытание в хлориде трехвалентного железа осуществляют путем погружения образцов в раствор, содержащий 2—10% $FeCl_3$ с добавлением 1/20 N HCl с выдержкой их в течение 4—48 ч при постоянной температуре в интервале 20—60° C. Стойкость к точечной коррозии оценивают взвешиванием образцов до и после испытаний. Простота проведения испытаний и хорошая сопоставимость данных составляют преимущество данного способа, однако зависимость результатов от способа размещения образцов снижает надежность получаемых результатов.

б. Испытание осуществляют в растворе поваренной соли, морской воде или искусственной морской воде, насыщенной воздухом или кислородом, с добавлением надлежащего окислителя. Стойкость к точечной коррозии оценивают взвешиванием или по количеству образующихся язвин и их глубине.

7.7. Агрессивные жидкости, ускоряющие коррозионное растрескивание под напряжением

Вещества, вызывающие растрескивание	Исследуемая сталь	Состав агрессивной жидкости	Температура
NO_3^-	Углеродистая	60% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + +3% NH_4NO_3 20% NH_4NO_3	Кипения »
OH^-	»	30% NaOH + окислитель	»
H_2S	Высокопрочная	0,5% уксусной кислоты + H_2S (до насыщения)	18—20°C
Cl^-	Аустенитная коррозионно-стойкая	42% MgCl_2 5~20% NaCl + окислитель	Кипения »
$\text{H}_2\text{S}_x\text{O}_6$ (политионовая кислота)	То же	Дистиллированная вода + SO_2 (3,25 ч + 15 мин) + H_2S (30—40 пузырьков/с, 3 ч) 6% H_2SO_3 (0°C) + H_2S (1 ч) через 48 ч повторяют до исчезновения запаха SO_2	18—20°C »

в. Критический потенциал точечной коррозии определяют по диаграмме анодной поляризации, построенной для водного раствора поваренной соли или раствора серной кислоты в потенциодинамическом режиме.

4. Испытание на стойкость к щелевой коррозии не включено в стандарт, и каждый исследователь выбирает способ испытаний по своему усмотрению. Устройство для испытания на стойкость к щелевой коррозии, представляющее собой электрически замкнутую

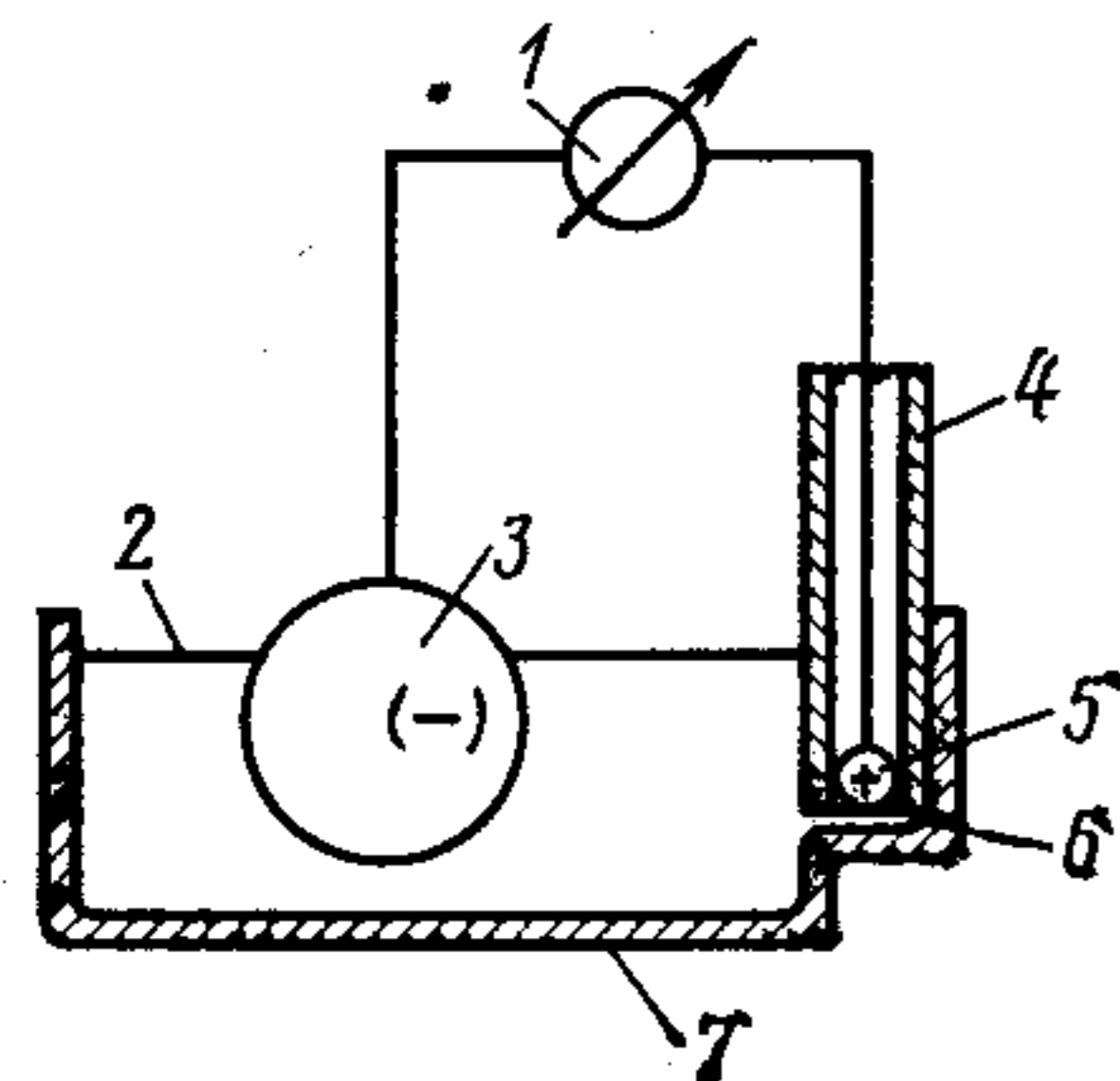


Рис. 83. Схема устройства для испытания на стойкость к щелевой коррозии:

1 — амперметр; 2 — водный раствор поваренной соли; 3 — шар большого диаметра; 4 — тefлоновая трубка; 5 — шар малого диаметра; 6 — щель; 7 — стеклянная емкость

систему из двух шаров, показано на рис. 83. Шар малого диаметра в этом устройстве — образец из испытуемого материала, шар большого диаметра изготовлен из стали, отличающейся от стали образца. Агрессивная среда — раствор поваренной соли с различными ингибиторами окисления, добавляемыми с целью изучения их эффективности. О стойкости к щелевой коррозии судят по показаниям амперметра.

5. Испытание на стойкость к общей коррозии по японскому промышленному стандарту G0591 проводят для оценки коррозионной стойкости аустенитных коррозионно-стойких сталей, в частности молибденосодержащей стали 316 и стали 316j1L с содержанием молибдена и меди, путем 6-часовой выдержки испытуемых образцов в кипящем 5%-ном растворе серной кислоты.

ПРИМЕНЕНИЕ НАПЛАВКИ

В настоящей главе приведены некоторые практические рекомендации, относящиеся к применению наплавки для восстановления и повышения износостойкости деталей машин разнообразного назначения.

Строительные машины. Наплавку применяют с целью повышения износостойкости различных деталей строительных машин, в частности при ремонте бульдозеров и одноковшовых экскаваторов для восстановления изношенных деталей.

Рабочие органы и другие детали этих машин работают в условиях интенсивного износа при контактировании с грунтом или скальными породами. К числу деталей, подвергаемых восстановлению наплавкой, относятся режущие кромки бульдозерных отвалов, зубья ковшов экскаватора и детали ходовой части (катки, траки, ленивцы, звездочки, башмаки и др.).

Интенсивность изнашивания деталей зависит от условий работы строительных машин: На рис. 84 показана зависимость относительного износа деталей из углеродистой стали (износ определен по отношению к износу низкоуглеродистой стали с твердостью $HV 120$) от твердости стали [1]. При работе в контакте с песком повышение твердости материала сопровождается линейным снижением относительного износа. Вместе с тем при работе в условиях умеренного и сильного изнашивания (гравий, щебень) кривая твердость — износ имеет ломаный характер: повышение твердости до $HV 400—500$ сопровождается заметным снижением износа, но при дальнейшем ее повышении относительный износ почти не изменяется. Округляя значения, соответствующие перелому кривой, относительный износ можно приближенно выразить в следующем виде:

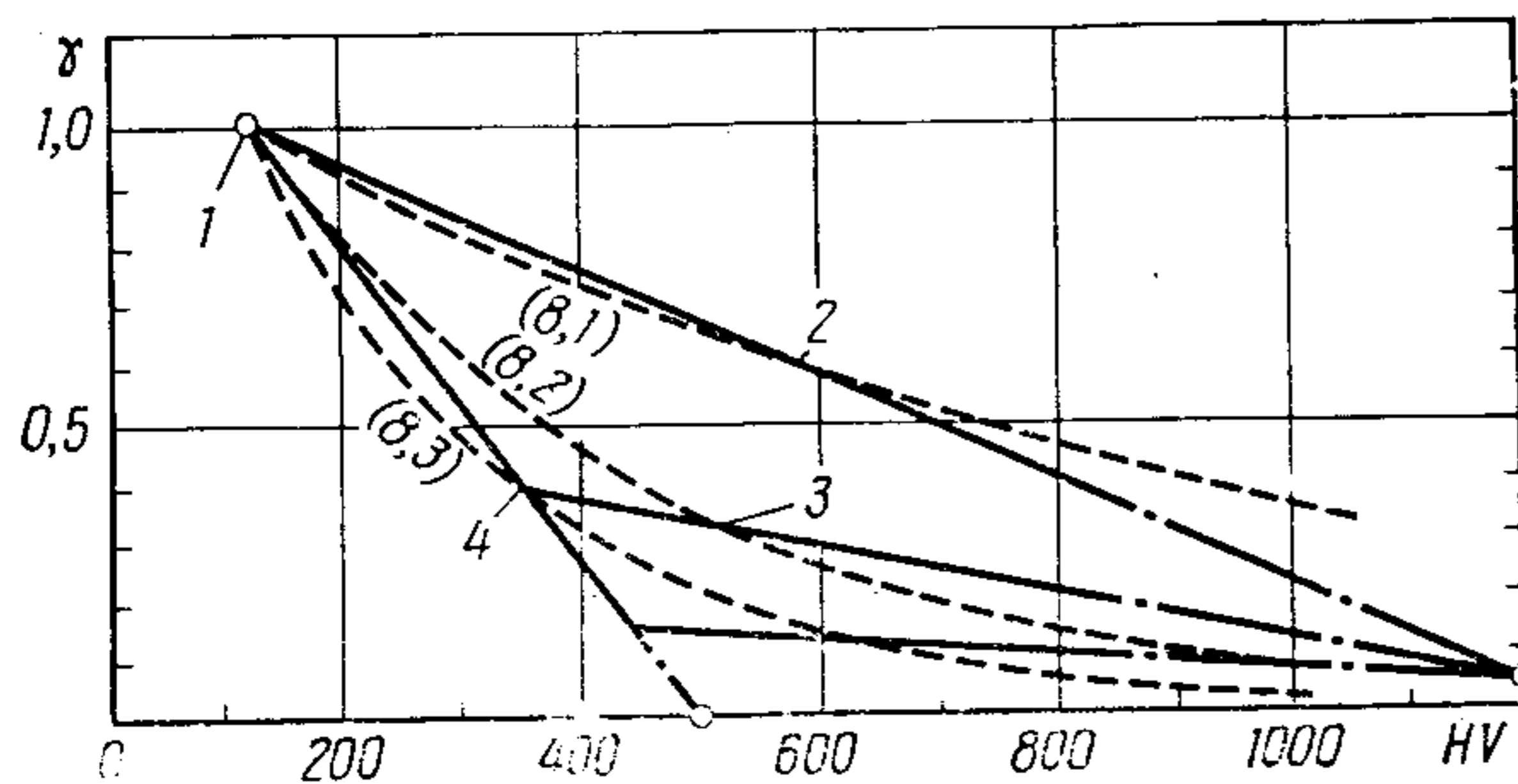
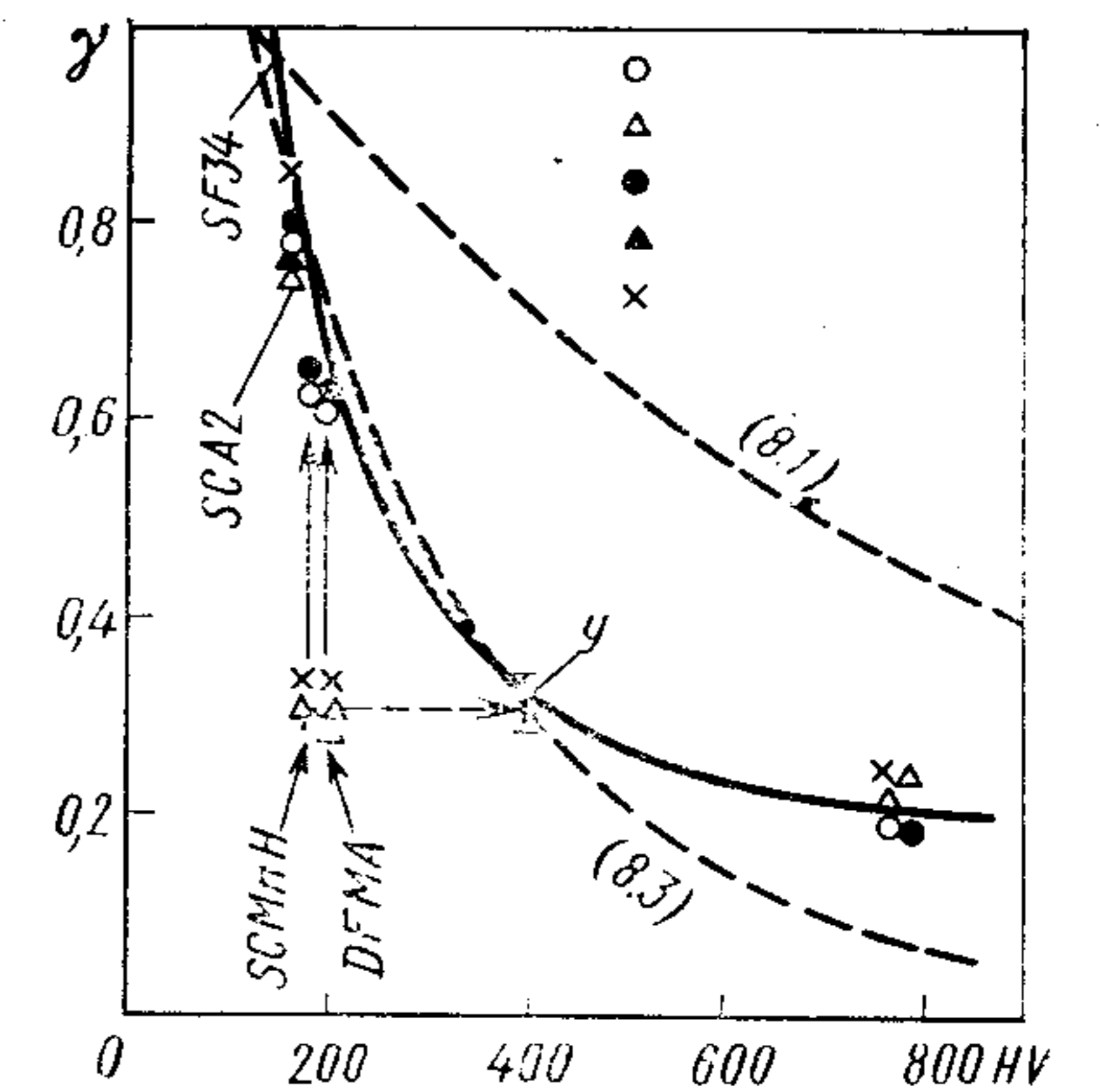


Рис. 84. Зависимость относительного износа γ образцов из углеродистой стали от ее твердости:

— — средние экспериментальные данные, — — результаты расчета по уравнениям (8.1), (8.2) и (8.3); 1 — низкоуглеродистая сталь ($HV 120$); 2 — условия незначительного изнашивания (песок); 3 — условия изнашивания средней интенсивности (пизолит); 4 — условия интенсивного изнашивания (щебень)

Рис. 85. Относительный износ γ ножей строительных машин, по данным К. Дайтэ; y — упрочнение:

○ — одноковшовый экскаватор, условия незначительного изнашивания; △ — одноковшовый экскаватор, условия интенсивного изнашивания; ● — бульдозер, условия незначительного изнашивания; ▲ — бульдозер, условия интенсивного изнашивания; × — скрепер



нос имеет ломаный характер: повышение твердости до $HV 400—500$ сопровождается заметным снижением износа, но при дальнейшем ее повышении относительный износ почти не изменяется. Округляя значения, соответствующие перелому кривой, относительный износ можно приближенно выразить в следующем виде:

Условия незначительного изнашивания: $\gamma = 1,15e^{-1,15x}$; (8.1)

Условия изнашивания средней интенсивности: $\gamma = 1,40e^{-2,8x}$; (8.2)

Условия интенсивного изнашивания: $\gamma = 1,65e^{-4,1x}$; (8.3)

$x = HV/1000$.

Эти уравнения зависимости величины относительного износа от твердости материала образцов хорошо согласуются с экспериментальной зависимостью для реальных деталей машин [1, 2, 3]. На рис. 85 приведены данные по относительной износостойкости ножей режущих органов строительных машин, работающих в условиях изнашивания различной интенсивности. При работе деталей в сложных условиях основным фактором, определяющим их износостойкость, является правильный выбор износостойкого материала.

Катки, траки, ленивцы и другие детали гусеничной ходовой части подвергаются обычно автоматической наплавке под флюсом или в среде углекислого газа, обеспечивающей высокопроизводительное нанесение ровного слоя износостойкого сплава на рабочие по-

8.1. Режимы автоматической наплавки под флюсом износостойких покрытий [4]

Детали	I_d, A	U_d, B	Температура, °C		Средняя толщина наплавки, мм	Число слоев
			подогрева	металла наплавки		
Катки	325—350	28	250	200—250	6	3
Ленивцы	325—350	28	250	200—250	7	3
Траки	350—375	30	200	150—200	4	2

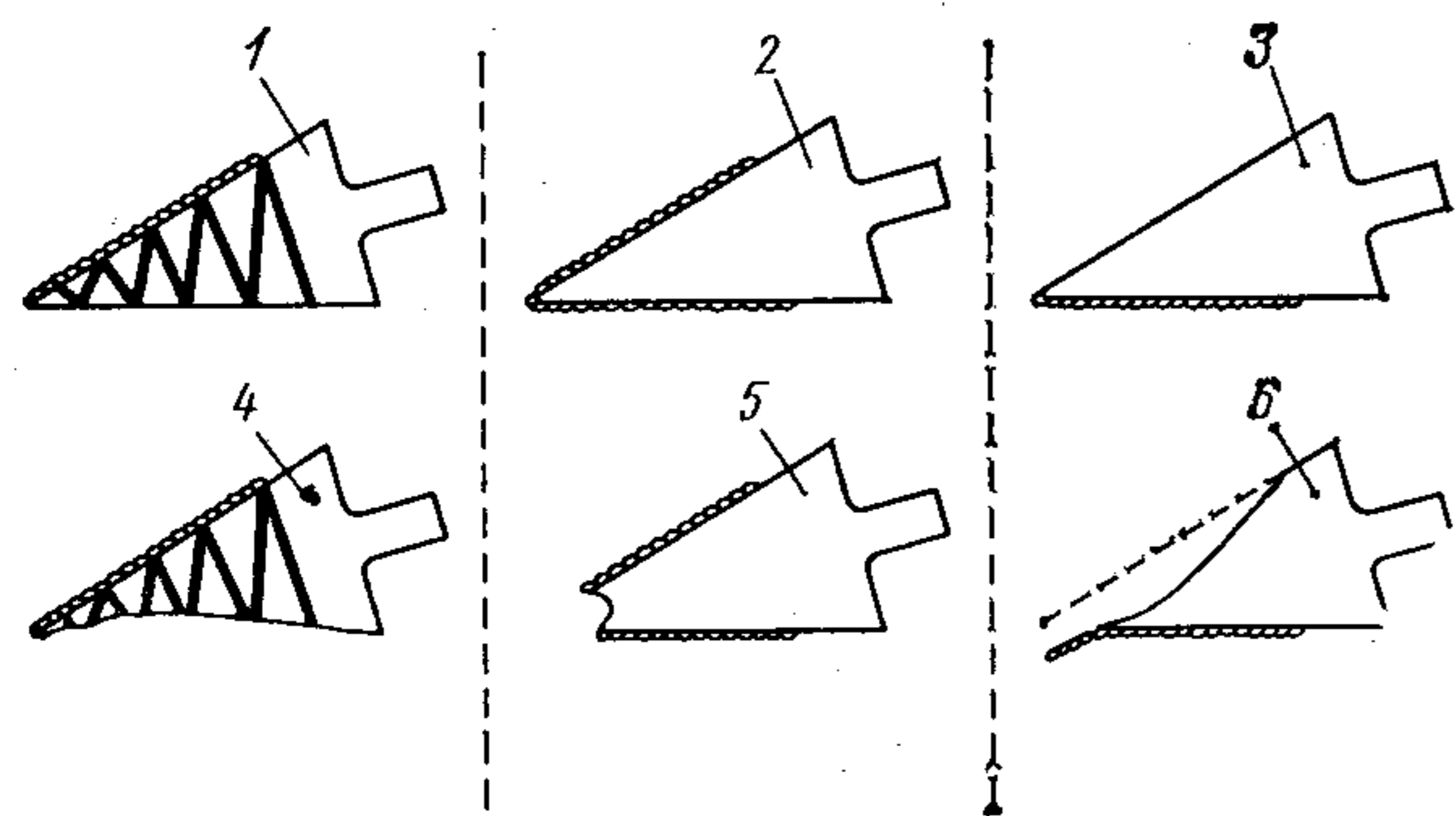


Рис. 86. Примеры наплавки зубьев:

1 — правильная наплавка (сверху сплошная, по боковым поверхностям полосчатая); 2 — неправильная наплавка (сплошная по верхней и нижней поверхностям); 3 — неправильная наплавка (сплошная по нижней поверхности); 4 — при отсутствии покрытия на нижней поверхности преимущественный ее износ обеспечивает самозаточку зубьев и длительную их службу; 5 — износ покрытия на переднем конце зуба вызывает его притупление и сокращение

срока службы; 6 — износ основного металла по верхней поверхности лишает опоры нижний наплавленный слой и снижает износостойкость зуба

поверхности деталей (табл. 8.1). Зубья и ведущие звездочки подвергаются ручной или полуавтоматической наплавке.

На рис. 86 показаны примеры правильной и неправильной наплавки зубьев ковша экскаватора. Рис. 87 иллюстрирует процесс наплавки траков, рис. 88 — внешний вид наплавленного трака.

Землечерпальные суда. В зависимости от назначения машины этого класса подразделяют на землесосные снаряды, драговые землесосы, храповые дноуглубительные снаряды, многоковшовые землечерпалки, одночерпаковые драги и др. Наиболее широкое применение имеют землесосные снаряды, служащие для выемки с морского дна песка и породы с помощью ротационной врубной головки и выбрасывания грунта с помощью насоса на большое расстояние от места его выемки.

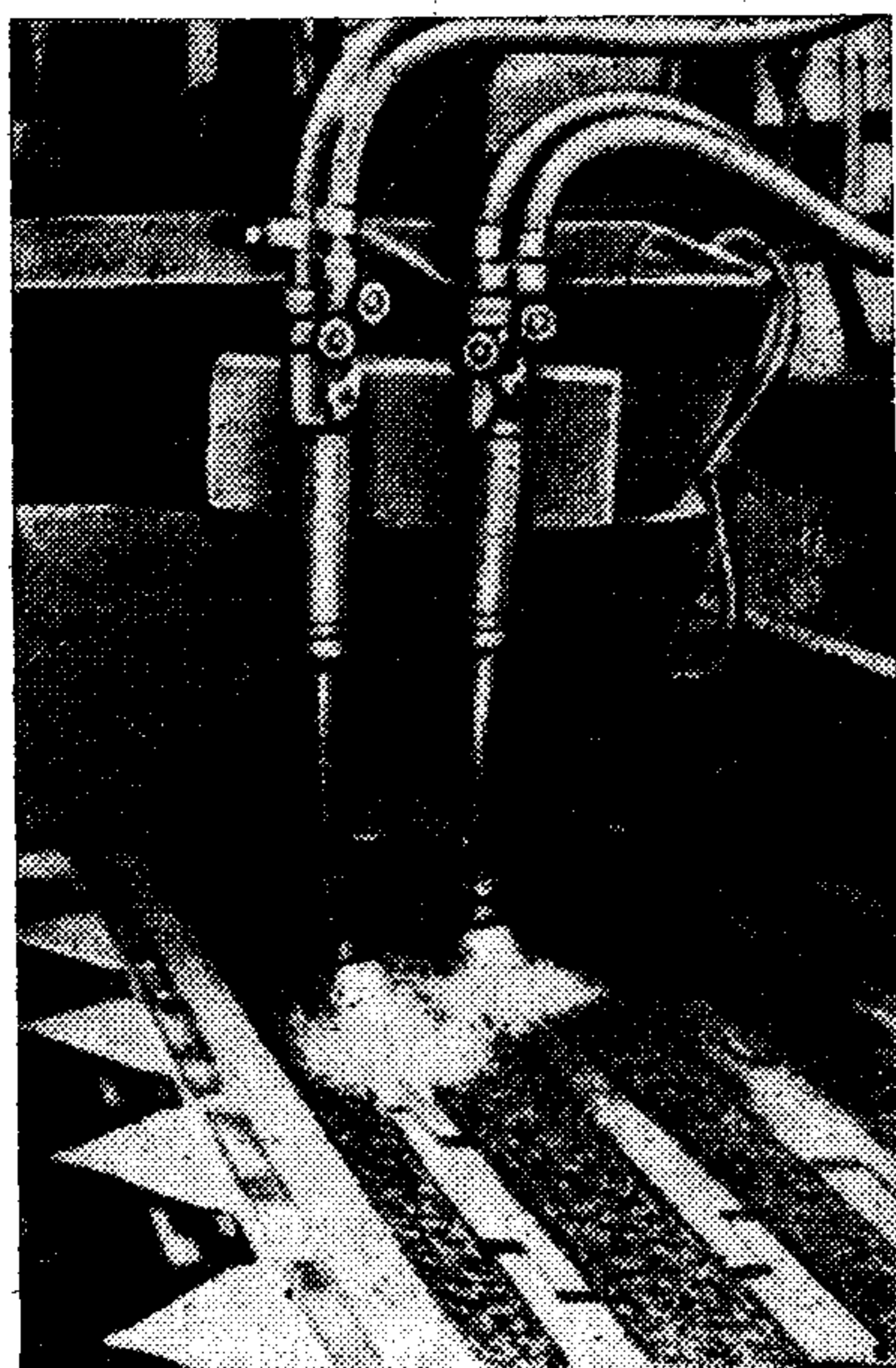
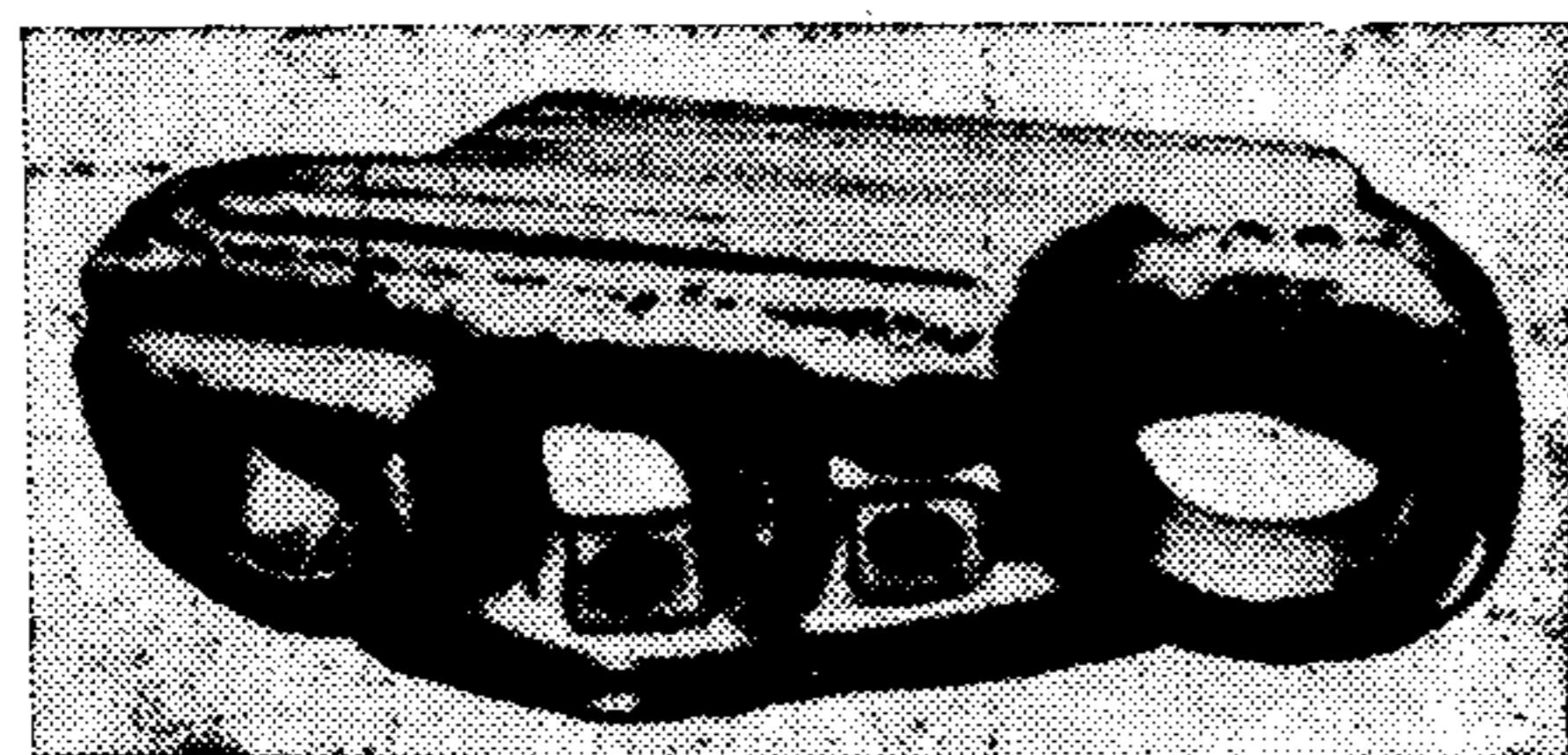


Рис. 87. Наплавка трака

Рис. 88. Внешний вид наплавленного трака



8.2. Стали для деталей землесосных снарядов, подвергающихся интенсивному износу

Детали	Сталь, марка	Углеродный эквивалент, %	Свариваемость
Врубная головка	Обычная литая, SC46	0,35	А
	То же, SC49	0,4	А
	Низкомарганцовистая литая, SCA1	0,45	Б
Режущие органы	Обычная литая, SC46	0,35	А
	То же, SC49	0,4	А
	Низкомарганцовистая литая, SCA2	0,5	Б
	То же, SCA3	0,55	Б
	Высокомарганцовистая литая, CSMnH2	—	Г
	Броневая	1,2	Г
	Среднеуглеродистая, S45C	0,55	Б
То же, S55C	0,65	В	
Низколегированная, SNCM9	0,9	Г	
Корпуса и рабочие колеса насосов	Обычная литая, SC46	0,35	А
	То же, SC49	0,4	А
	Низкомарганцовистая литая, SCA2	0,5	Б
	То же, SCA3	0,55	Б
	Хромомолибденовая литая, SCA51	0,5	Б
	То же, SCA52	1,25	Г
	Марганцевокремнистая литая, SCA31	0,5	В
	Хромомарганцовистая литая, SCA22	0,7	В
	То же, SCA23	0,75	В
	Легированный медью чугун	0,65	Г
Высокохромистый чугун	—	Г	
Сваи и грунтопроводы драг	Низкоуглеродистая, SS41	0,25	А
	Высокопрочная с $\sigma_B = 500$ МПа	0,35	А
	Высокопрочная с $\sigma_B = 550$ МПа	0,4	А
Шкивы	Обычная литая, SC49	0,4	А
	То же, SC55	0,5	Б

Примечание. А — особо хорошая; Б — хорошая; В — удовлетворительная; Г — плохая.

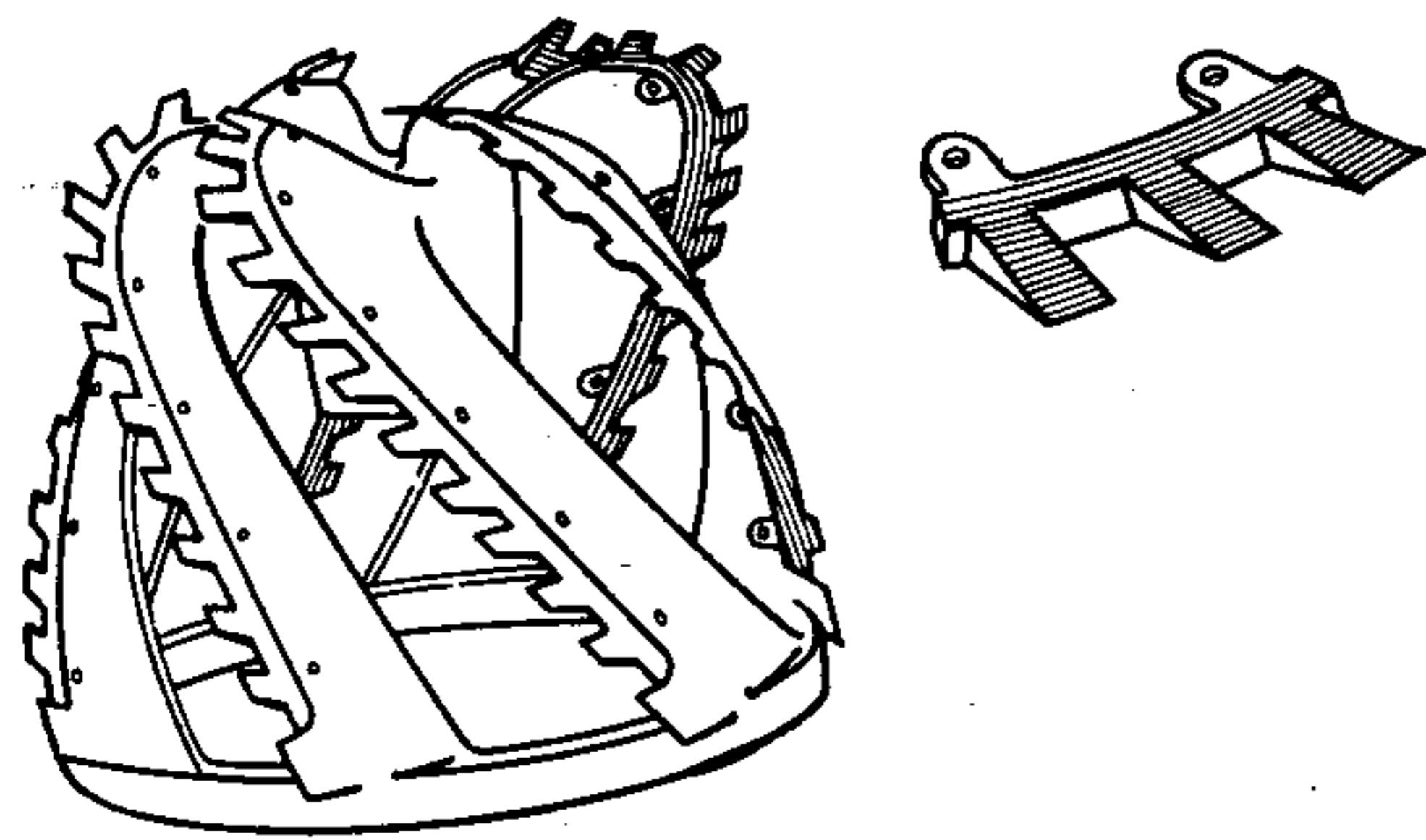


Рис. 89. Режущий орган врубной головки

Наплавке подвергают следующие основные детали землесосных снарядов: корпуса насосов, рабочие колеса, ножи врубных головок, изготавливаемых, как видно из табл. 8.2, из сталей различных типов [5].

Врубная головка (рис. 89) содержит каркас с закрепленными на нем зубьями, которые при работе землесосного снаряда врубляются в породу.

Для выемки глины и другого мягкого и вязкого грунта используют врубные головки лопастного типа, подвергающиеся абразивному износу. Для наплавки таких врубных головок используют обычные наплавочные материалы, предназначенные для повышения стойкости к абразивному изнашиванию.

Для выемки мягких грунтов используют рабочие органы со вставными фиксируемыми пластинами, а для выемки скального грунта — рабочие органы, наплавленные материалами особо высокой твердости, к числу которых относятся мартенситные наплавочные материалы и карбид вольфрама (рис. 90) [5]. Для предотвра-

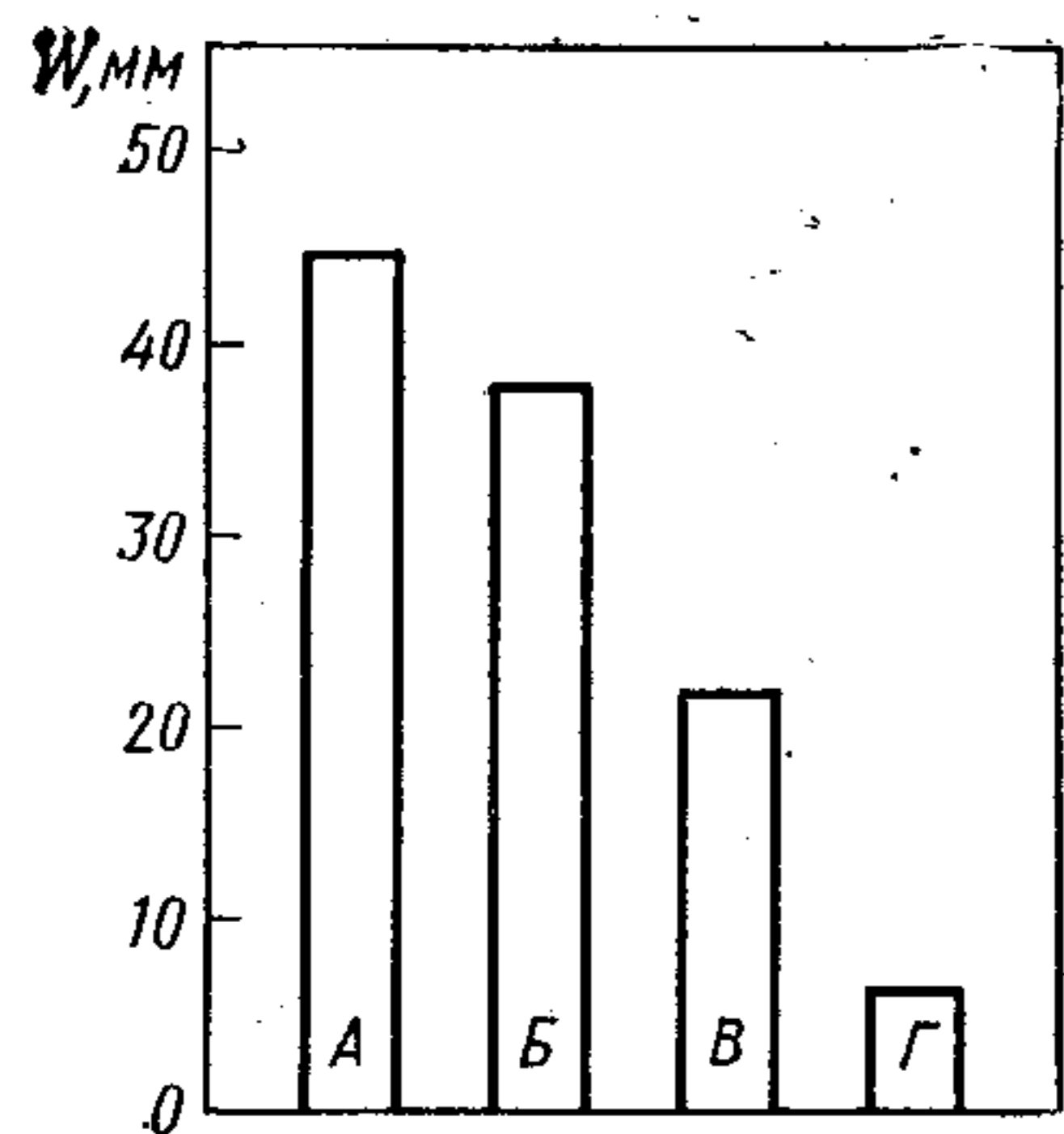


Рис. 90. Диаграмма сравнительной износостойкости режущих органов землесосных снарядов, наплавленных различными материалами (на диаграмме показан износ w на 10 тыс. м³ вынутого твердого песчаного грунта):

А — без наплавки; Б — наплавка сорбитными материалами; В — наплавка мартенситными материалами (HV 650); Г — полосчатая наплавка карбидом вольфрама на мартенситный наплавленный слой (HV 650)

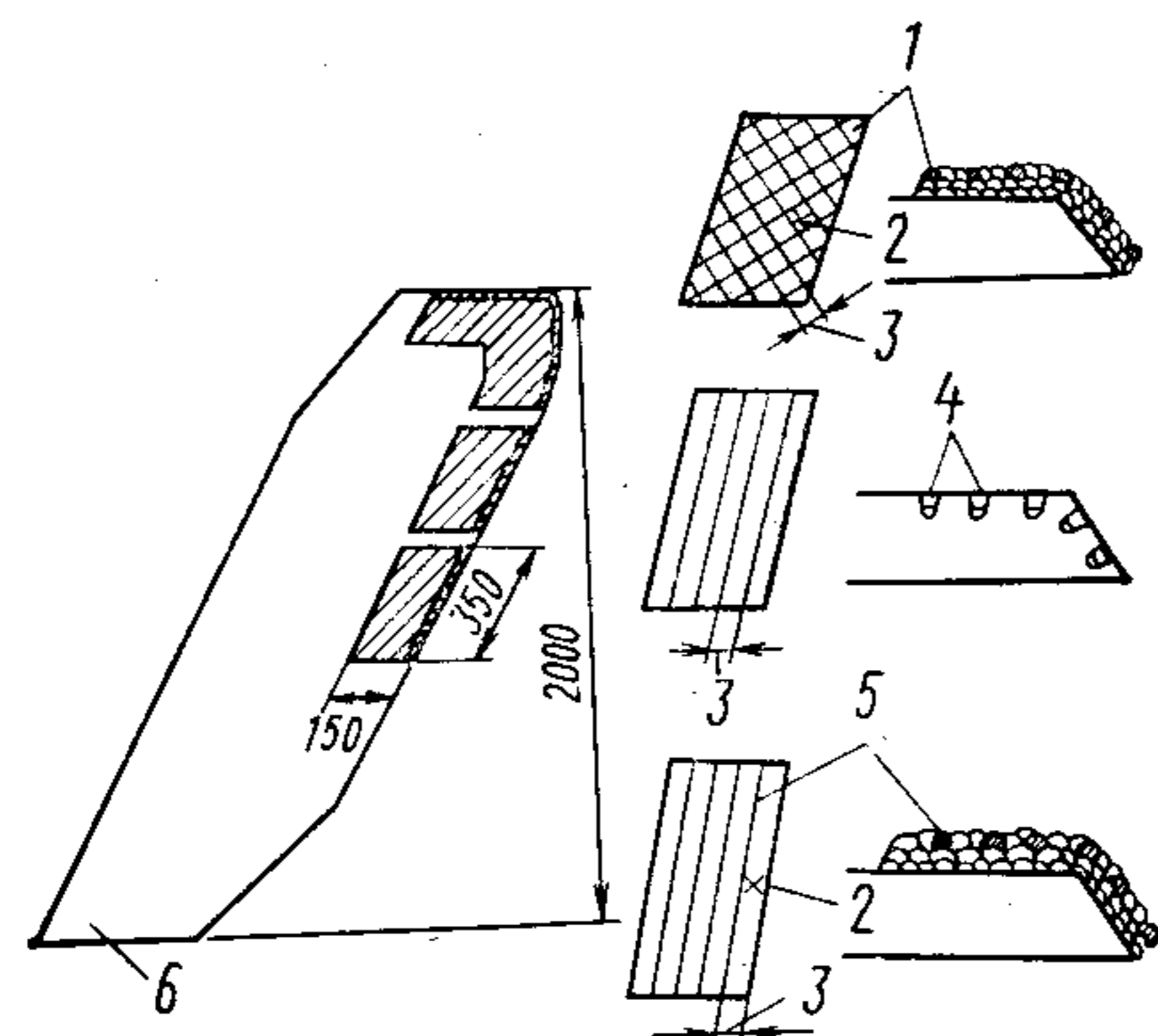


Рис. 91. Способы наплавки валков на режущие органы землесосных снарядов:

1 — сетчатая наплавка карбидом вольфрама; 2 — мартенситный наплавочный материал DF3C; 3 — расстояние между валками 300 мм; 4 — темные участки — валки карбида вольфрама, светлые участки — наплавка мартенситным материалом DF3C; 5 — параллельные валки, наплавленные карбидом вольфрама; 6 — основной металл — литая низкомарганцовистая сталь

щения охрупчивания и отрыва от подложки при наплавке этими материалами применяют способы сетчатого и полосчатого наложения валков (рис. 91).

Корпус насоса (рис. 92) представляет собой стальную емкость, внутри которой монтируют рабочее колесо (крыльчатку). Во время работы насоса при скоростном вращении рабочего колеса через его корпус проходит морская вода со взвешенным в ней грунтом, что вызывает абразивный износ в сочетании с эрозионным износом, обусловленным высокой скоростью движения морской воды и грунта через корпус насоса.

На участках максимального износа наносят подслои электродами с покрытием основного типа с использованием подкладок — пластин из низкоуглеродистой стали. Затем выполняют износостойкую наплавку с использованием таких материалов, как боросодержащая мартенситная сталь, высокохромистая сталь и карбид вольфрама.

При восстановлении изношенных крупногабаритных корпусов насосов землесосных снарядов, для которых расходуют сотни килограммов наплавочного материала, существует опасность деформации изделия под влиянием термического цикла наплавки, для предотвращения которой следует избегать концентрации тепла, например, путем разделения наплавляемой поверхности на отдельные небольшие участки и выбора оптимальной схемы (порядка) их наплавки.

При изготовлении новых корпусов насосов для увеличения срока службы следует применять износостойкую наплавку, особенно на участке входного патрубка, работающего в условиях наиболее интенсивного износа. Высоких результатов достига-

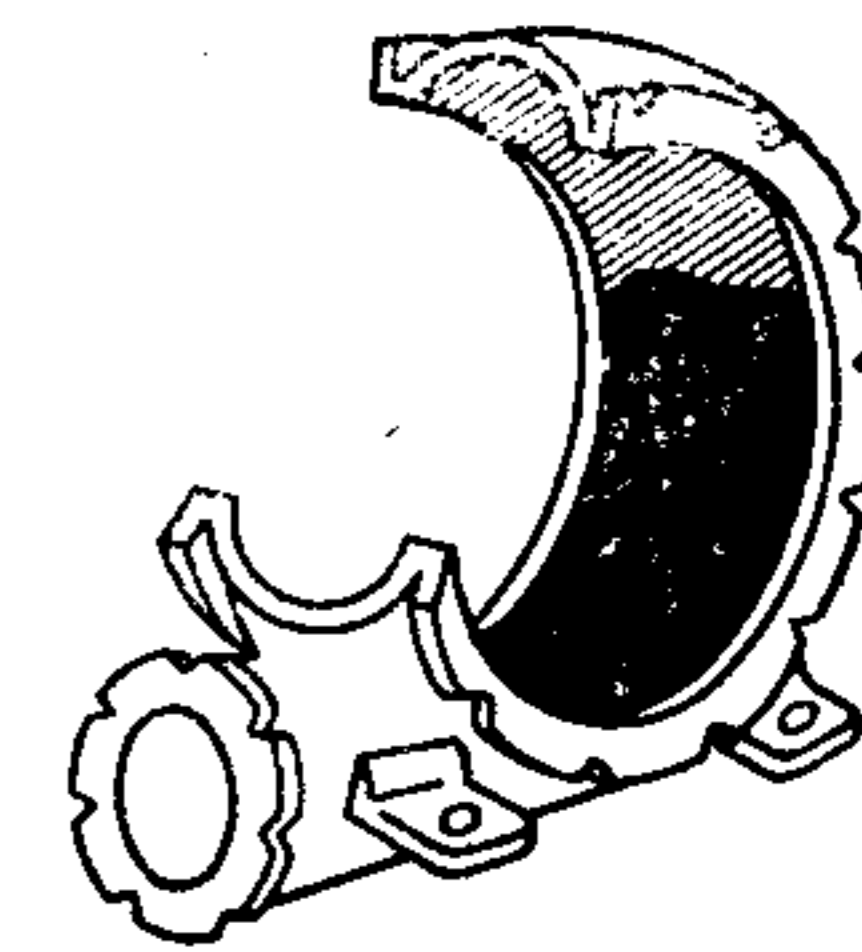


Рис. 92. Корпус насоса

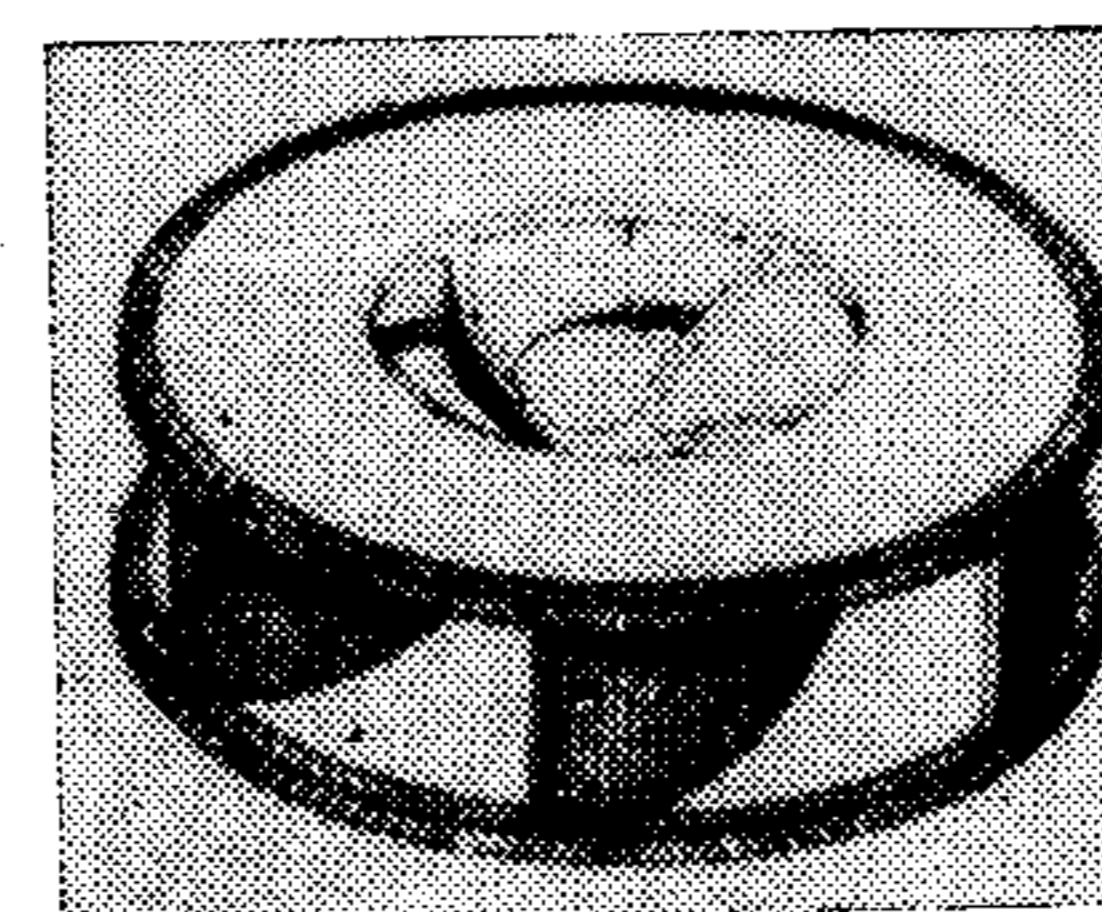


Рис. 93. Рабочее колесо насоса



Рис. 94. Наплавка врубной головки

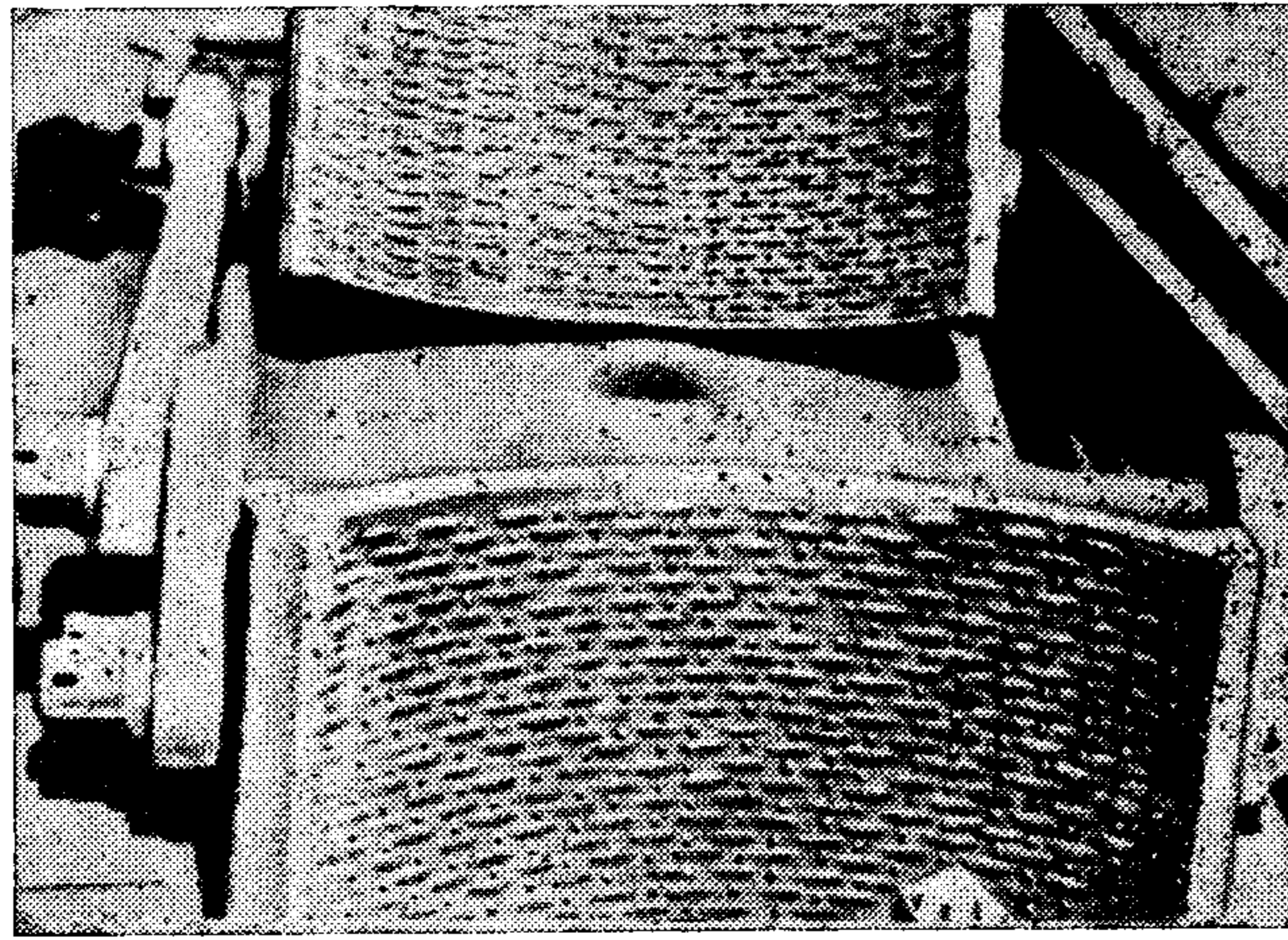


Рис. 95. Хомут драговой свай

ют при наплавке этих участков карбидом вольфрама или высокохромистыми железными сплавами.

На рис. 93 схематически показано рабочее колесо землесосного насоса. Износ рабочих колес существенно не отличается от износа корпусов. В большинстве случаев особенно сильный износ наблюдается по краям лопастей.

При наплавке рабочих колес, как и корпусов, есть опасность возникновения сильной деформации, для предотвращения которой необходимы особые меры. На рис. 94 показана наплавка рабочего органа землесосного снаряда, а на рис. 95 — вид хомута драговой свай после наплавки.

Металлургическое оборудование. Наплавке подвергают прокатные валки, конусы засыпных аппаратов доменных печей, направляющие и другие элементы металлургического оборудования. Приведенные в табл. 8.3 примеры наплавки валков прокатных станов различного назначения включают большое разнообразие применяемых для них наплавочных материалов [6].

При восстановлении изношенных валков наплавкой важнейшее значение имеет содержание углерода в основном металле. При содержании углерода в пределах 0,3—0,8% наплавка протекает сравнительно успешно, при содержании 0,8—1,5% С перед износостойкой наплавкой необходимо наплавлять мягкий подслои или проводить предварительную термообработку валков. При содержании более 1,5% С наплавка становится невозможной, хотя в последнее время такие валки пытаются восстанавливать способом электрошлаковой наплавки с использованием явления сверхпластичности металла в процессе протекания мартенситных превращений [7].

При эксплуатации валки подвергаются изнашиванию трением, усугубляемому термическим растрескиванием и влиянием водяного пара, что приводит к возникновению неоднородного износа, пока-

8.3. Состав и твердость стальных прокатных валков различного назначения

Оборудование	Состав, %						Твердость по Шору
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	
1. Стальные литые валки горячей прокатки, рабочие валки двухвалковых клетей обжимного стана	0,6—1,0	0,3—0,8	0,5—0,9	0,5—1,5	0,2—0,5	—	30—40
	1,2—1,6	0,3—1	0,5—1	0,5—1,5	0,2—0,5	—	40—50
Валки четырехвалковых черновых клетей стана листовой прокатки, рабочие валки первых четырехвалковых чистовых клетей стана листовой прокатки	0,8—1,2	0,3—1	0,5—1	0,5—1,5	0,3—0,8	—	45—60
	0,65—1,1 1,4—1,8	0,3—0,8 0,3—1	0,5—0,9 0,5—1	0,5—1,5 0,5—1,5	0,2—0,5 0,2—0,5	—	35—40 43—47
Опорные валки первых четырехвалковых чистовых клетей стана листовой прокатки	1,6—2,1 1,6—2,3	0,3—1 0,3—1	0,5—1 0,5—1	0,5—1,5 0,5—1,5	0,2—0,5 0,2—0,5	—	45—50 45—50
	0,6—1,3 1,3—1,8	0,3—1 0,3—1	0,5—0,9 0,5—0,9	0,8—1,2 0,8—1,2	0,2—0,5 0,2—0,5	—	30—40 37—48
Валки сортового стана: для черновой прокатки для прокатки в промежуточных клетях для чистовой прокатки	1,5—2,2	0,3—1	0,5—0,9	0,8—1,2	0,2—0,5	—	40—52

Оборудование	Состав, %							Твердость по Шору
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Co	
Валки заготовочного стана	0,8—2,2	0,3—1	0,5—0,9	0,8—1,2	0,2—0,5	—	—	30—45
Валки черновых клетей проволочного стана	0,8—2,2	0,3—1	0,5—0,9	0,8—1,2	0,2—0,5	—	—	35—50
2. Стальные литые валки двухвалковых черновых клетей обжимного стана (горячая прокатка)	0,3—0,7	0,4—1	0,4—1	0,8—2	0,2—0,8	—	—	30—45
Рабочие валки четырехвалковой клетки дрессировочного стана	0,7—1,2	0,15—1,5	0,15—0,9	0,7—2,5	0,05—0,6	0,05—2	—	90—100
Опорные валки четырехвалковой клетки дрессировочного стана	0,7—1	0,15—1,5	0,15—0,6	0,7—2,5	0,05—0,35	0,05—2	—	55—75
Валки стана Сендзимира: рабочие	1,3—1,7	0,15—0,5	0,15—0,5	10,5—13,5	0,6—1,2	0,2—0,9	0,2—0,7	85—90
первые промежуточные	1,3—1,7	0,15—0,5	0,15—0,5	10,5—13,5	0,6—1,2	0,2—0,9	0,2—0,7	75—85
вторые промежуточные	1,3—1,7	0,15—0,5	0,15—0,5	10,5—13,5	0,6—1,2	0,2—0,9	0,2—0,7	75—85
Формующие ролики	1,3—1,7	0,15—0,85	0,15—0,5	10,5—13,5	0,6—1,2	0,2—0,9	0,2—3,5	70—85
Ролики правильных машин, направляющие ролики и ролики других различных назначений	0,7—1,2	0,15—1,5	0,15—0,9	0,7—2,5	0,05—0,6	0,05—2	—	70—95

занного на рис. 96 на примере опорного вала. При таком изнашивании не исключено образование поверхностного слоя повышенной твердости, который перед наплавкой следует удалить до обнажения основного металла со стабильной структурой. На рис. 97 показан опорный валок в процессе автоматической наплавки под флюсом с использованием механизма для вращения детали. Для предотвращения образования трещин и других дефектов в наплавленном металле, исключения большого разброса твердости по восстанавливаемой поверхности вала необходимо применение предварительного и сопутствующего подогрева и последующей термообработки.

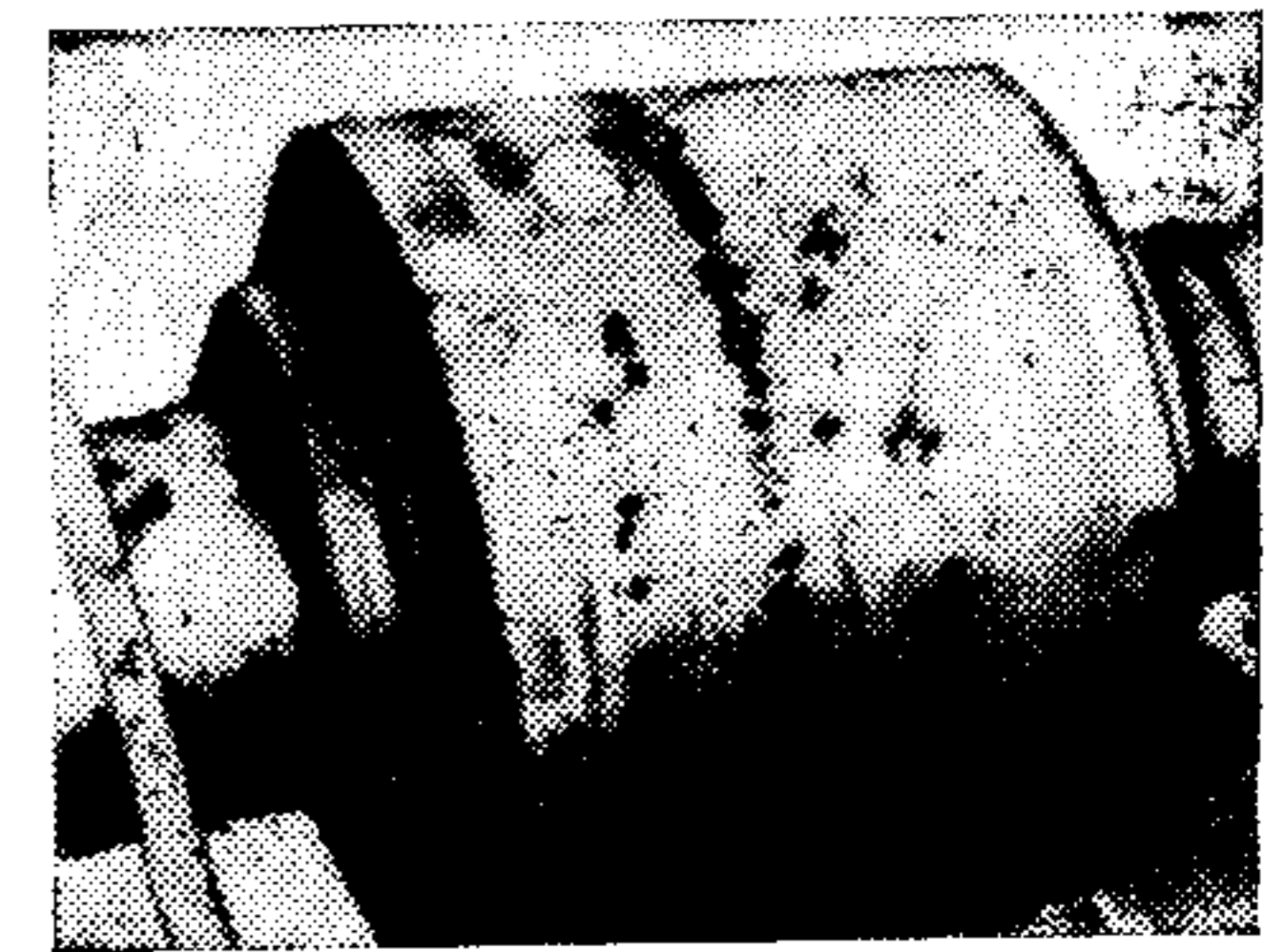


Рис. 96. Изношенный опорный валок прокатного стана

На рис. 98 показана поверхность вала, подвергнутого наплавке, термообработке и последующей отделочной обработке. Особое внимание необходимо уделить обеспечению точности размеров восстанавливаемой поверхности, исключению коробления изделия, связанного с его нагревом и охлаждением.

Типичным примером высокопроизводительной наплавки ленточным электродом является ее применение для износостойкой наплавки слоев большой толщины при ремонте прокатных валков.

Железнодорожный подвижной состав. Восстановительной наплавке подвергают разнообразные по форме и размерам детали железнодорожного подвижного состава (табл. 8.4), что затрудняет механизацию наплавочных работ. Кроме того, неодинаковый износ поверхности детали позволяет осуществлять лишь ручные или полуавтоматические способы наплавки.

Для наплавки деталей железнодорожного подвижного состава,

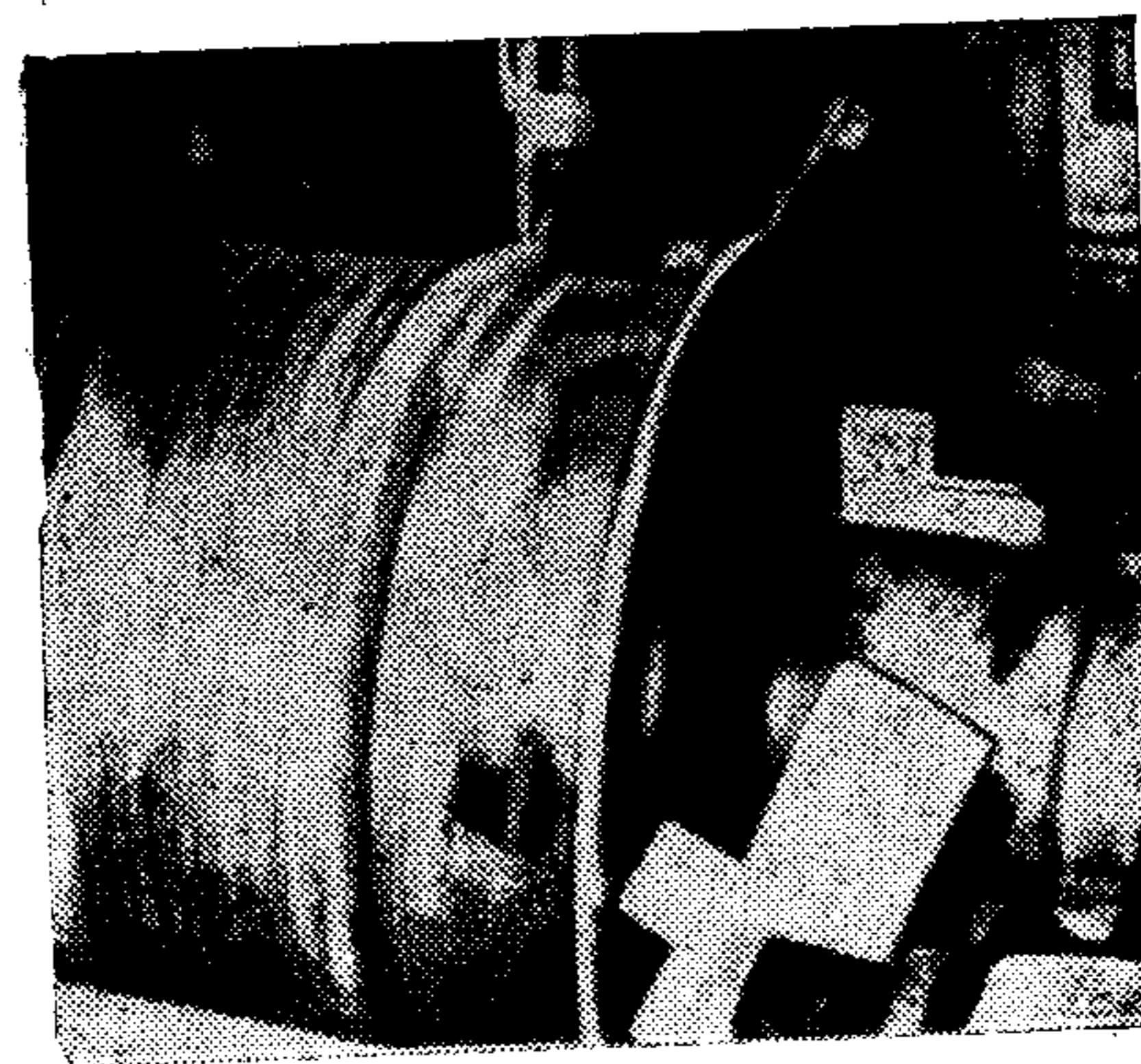
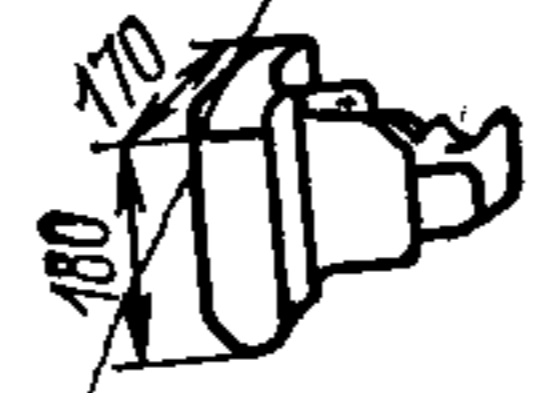
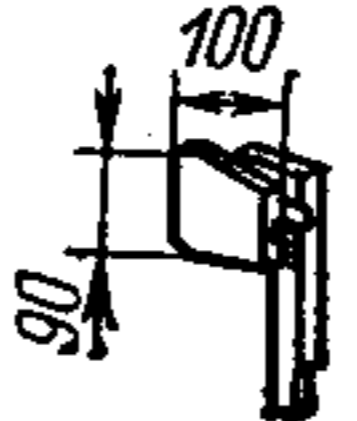

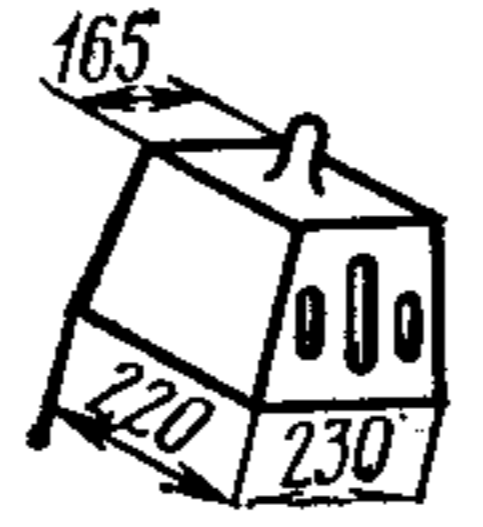
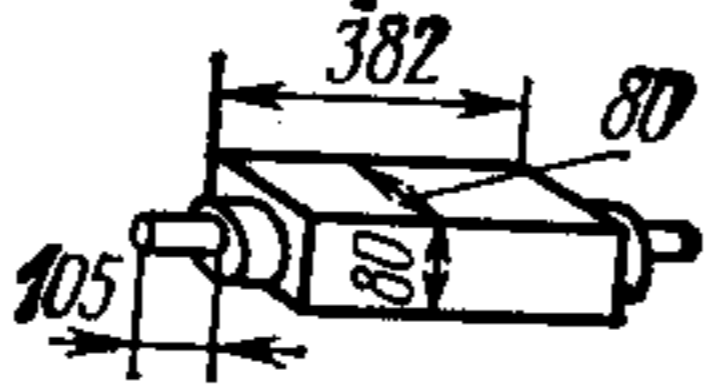
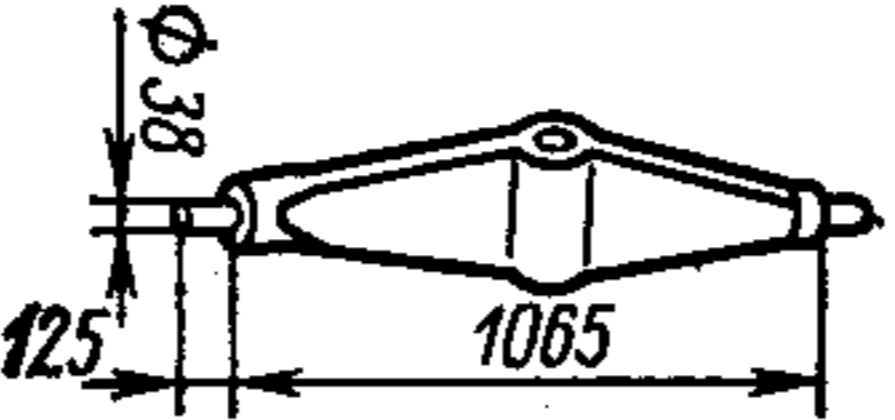
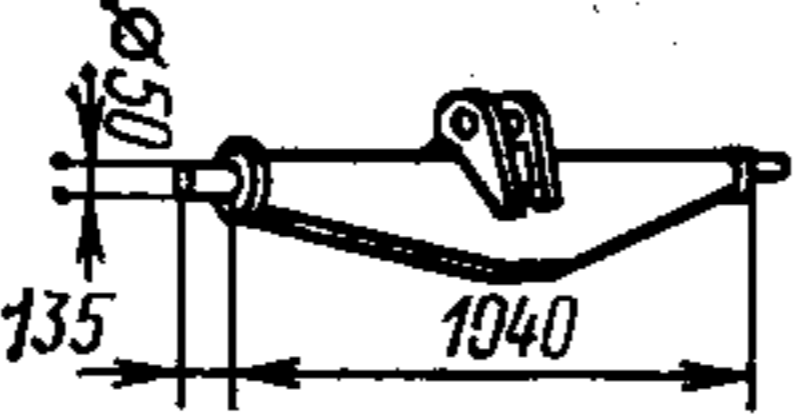


Рис. 97. Наплавка опорного вала прокатного стана


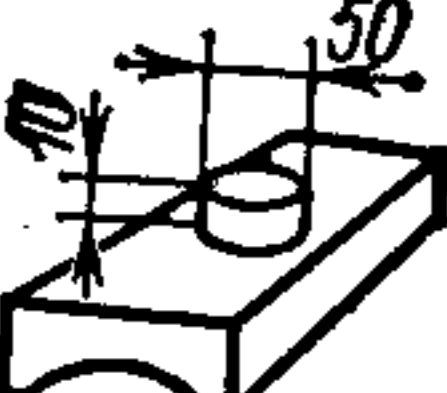


Рис. 98. Поверхность вала после наплавки, термообработки и чистовой механической обработки

8.4. Основные детали, подверженные наплавке
(из публикации Накамура)

Деталь	Марка стали	Форма и размеры
Зуб корпуса сцепки	SCC60 * SC46 SCA2 (низкомарган- цовистая)	
Защелка автосцепки	SC46	
Щека автосцепки	SS41 SF55	
Кулиса автосцепки	SC46	
Ось балансира	SS41	
Тормозной рычаг (товарный и пассажирский вагоны)	SS41 S30C	
Тормозной рычаг (моторный вагон)	SS41	

Продолжение табл. 8.4

Деталь	Марка стали	Форма и размеры
Опора щеки автоматической сцепки	SS41	
Опорная плита	BC 5C	

* Используют в устройствах для принудительной сцепки.

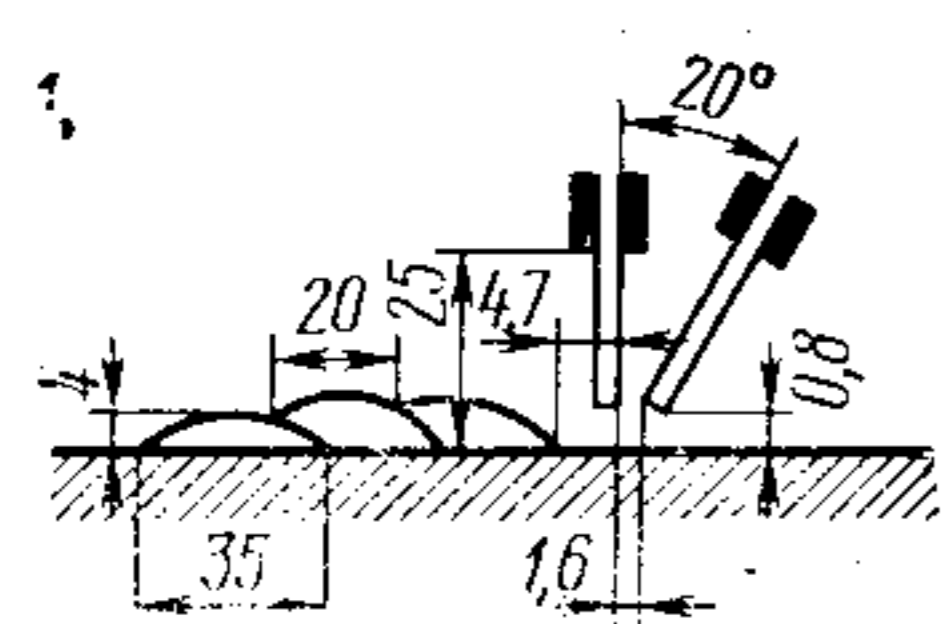
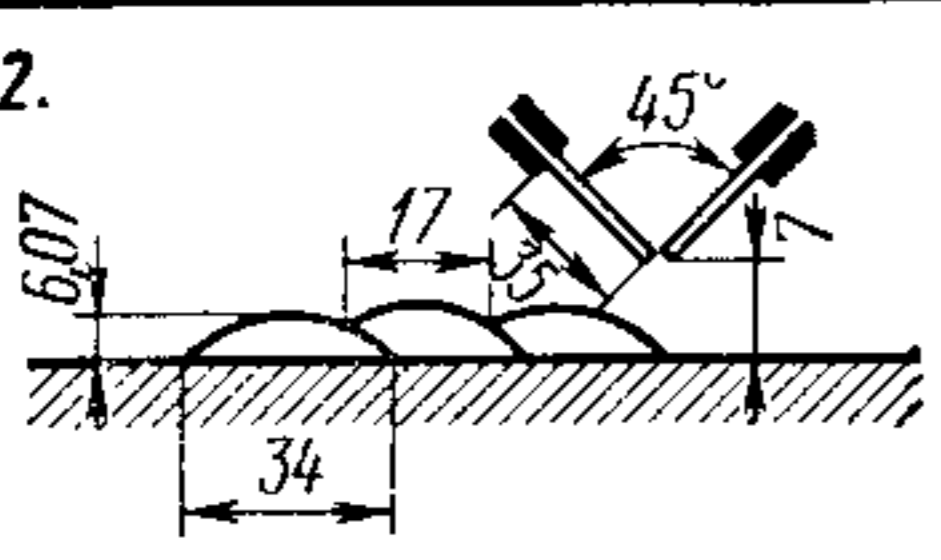
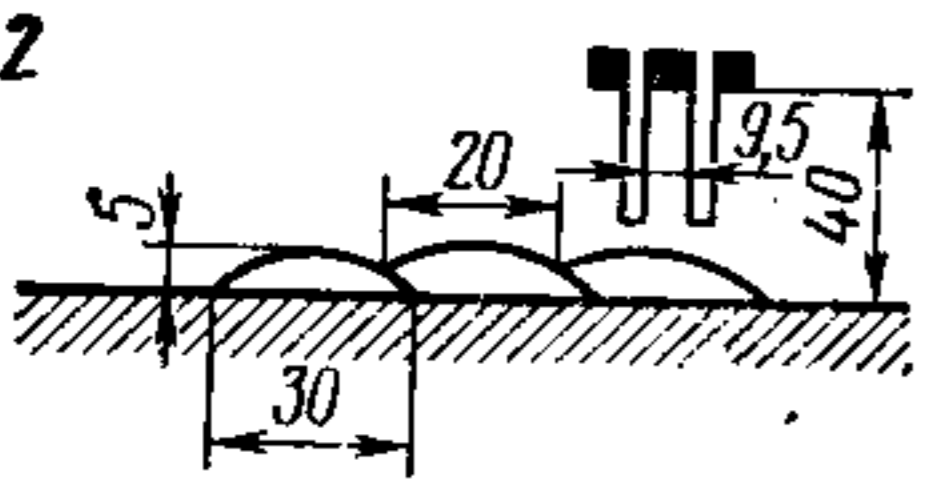
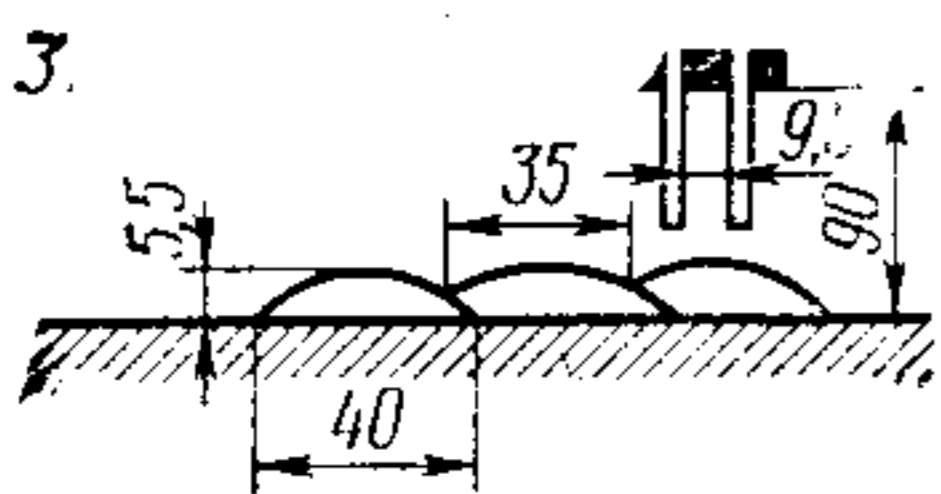
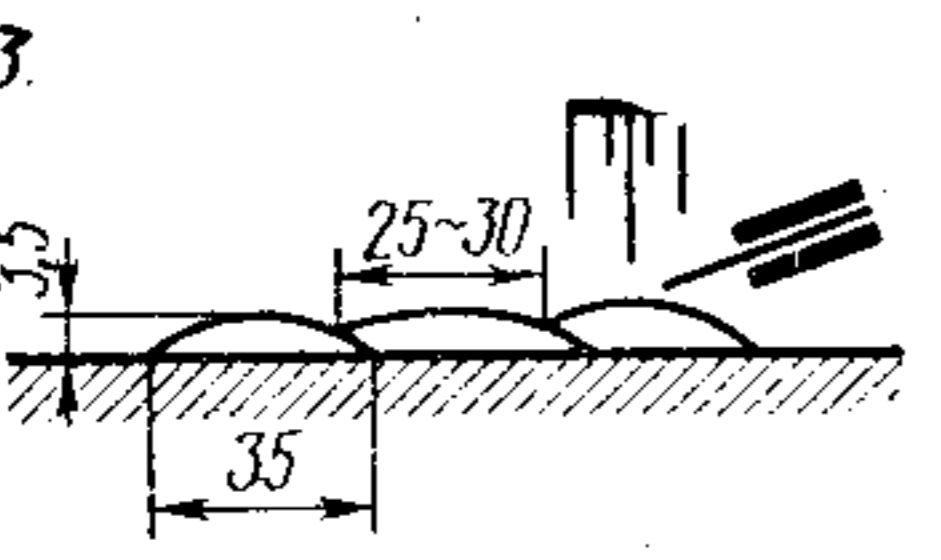
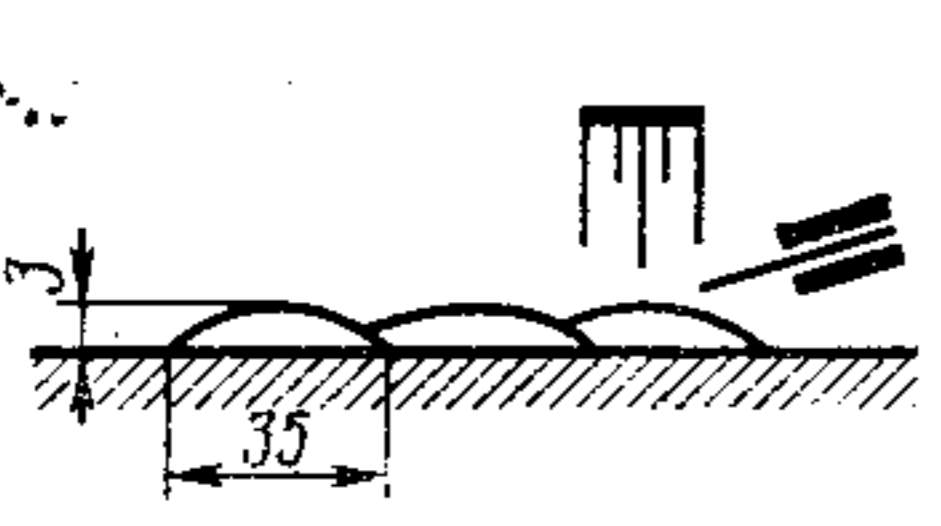
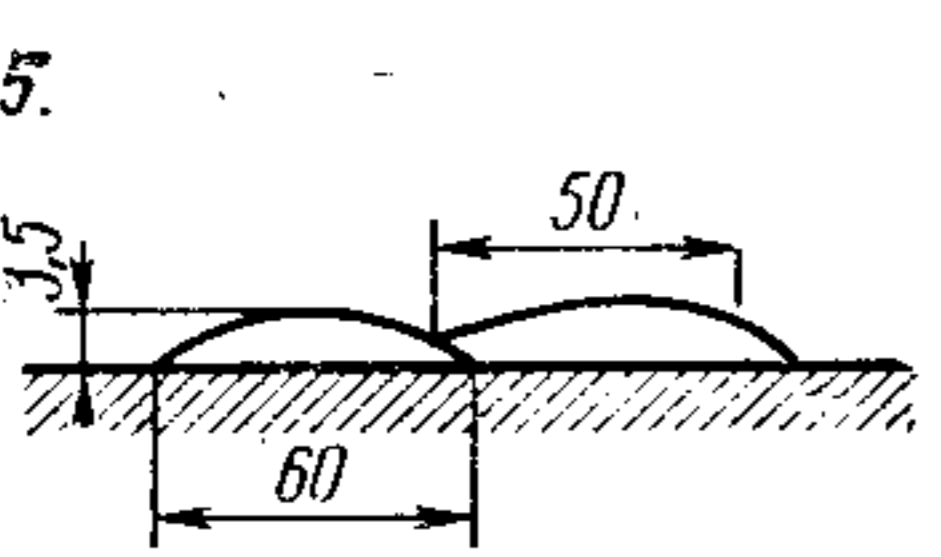
изнашивающихся в результате трения металлических поверхностей, используют наплавочный материал твердостью HV 250—350. При попытке заменить ручную наплавку покрытыми электродами более производительными способами обычно обращаются к сварке в среде углекислого газа.

Процесс наплавки включает следующие операции: зачистка наплавляемой поверхности наждачным кругом; установка наплавляемой поверхности детали в горизонтальное положение (с помощью специального сварочного приспособления; измерение величины износа детали и сопоставление размеров с требуемыми; предварительный подогрев (например, до 150°C); наплавка с учетом износа с периодическим измерением толщины наплавленного слоя; окончание наплавки в момент, когда толщина слоя обеспечивает получение требуемого размера с учетом припуска на последующую механическую обработку; проверка правильности выполнения наплавки; последующая термообработка для снятия напряжений при температуре $\sim 650^{\circ}\text{C}$ (для некоторых деталей: рычагов, подвесок, кронштейнов и т. п. термообработку после наплавки не проводят); механическая обработка детали под окончательные размеры; контроль качества.

При наплавке следует иметь в виду, что использование чрезмерной силы тока может стать причиной возникновения сварочных дефектов.

Сосуды высокого давления. Сосуды высокого давления изготовляют из плакированной стали, получаемой прокаткой или сваркой взрывом, либо из обычного толстого листа с последующей наплавкой. В последнее время в связи с увеличением габаритов сосудов высокого давления, предназначенных для атомной энергетики и химической промышленности (установки для десульфурации мазута и т. п.), расширилось применение стального листа особо большой

8.5. Наплавка сосудов высокого

Наплавка	Эскиз	Наплавляемая сталь, содержание углерода, толщина слоя H	Электродные проволоки, лента	
			Марка стали, C , %	Диаметр, сечение, мм
Дуговая флюсом	1. 	AISI* 304, $C \leq 0,6\%$, двухслойная, $H \geq 6$ мм, в среднем 8 мм	AISI* 309, $C < 0,05$	4,7+4,7
	2. 	AISI 304, $C \leq 0,08\%$, двухслойная, $H \geq 9,5$ мм, в среднем 14 мм	AISI 309 и AISI 312 (29-9)	4,8+4,8
Двухэлектродная под флюсом с поперечным колебанием электродов; N — частота колебаний; A — амплитуда колебаний	$N = 40$ кол/мин; $A = 10$ мм 2. 	AISI 304, $C < 0,08\%$, двухслойная, $H \geq 6$ мм, в среднем 9 мм	AISI 309, $C < 0,06\%$	2,5+2,5
	$N = 40$ кол/мин; $A = 20$ мм 3. 	AISI 304, $C \leq 0,08\%$, двухслойная, $H \geq 4$ мм	AISI 309, $C < 0,04\%$	3,2+3,2
	3. 	AISI 304, двухслойная, $H \geq 7$ мм	AISI 308 и AISI 309	1,6 (электродная) + 2,4 (присадочная)
3. 	AISI 347, двухслойная, $H \geq 6$ мм, второй слой — сталь 347			
Автоматическая ленточным электродом под флюсом	5. 	AISI 304, однослойная, $H \geq 5$ мм	AISI 308, $C < 0,04\%$	60×0,5

* AISI — американский институт черной металлургии. Обозначения на эскизах: 1 —

давления атомных реакторов

Флюс, защитный газ	Режим наплавки						Производительность, наплавки, кг/ч	Средняя глубина, мм	Доля участия основного металла, %
	I_d , А	U_d , В	v , см/мин	Вылет электрода, мм	Плотность тока, А/мм ²				
Керамический флюс с добавлением хрома для компенсации потерь	300—350 (переменный)	20—24	20—23	25	18	8	1	20	
То же	480 (переменный)	27	30	35	27	15	1,5	20	
»	375 (постоянный прямой полярности)	35	16	40	37	8	1	15	
»	550 (постоянный прямой полярности)	36	18	90	32	32	1,2	18	
Аргон или смесь азота (80%) с водородом (20%)	300 (постоянный, обратной полярности)	30	16—17	20	150	12	0,5	10	
Керамический флюс (с большим добавлением хрома)	450 (постоянный)	28	12	20	15	13	≤ 1	20	

Италия; 2 — Франция; 3 — Швейцария, 4 — ФРГ; 5 — Нидерланды.

8.6. Состав сталей для сосудов высокого давления

Назначение	Тип стали	Марка стали по стандарту ¹	Состав, %									
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	
Установка для десульфурации мазута	Хромомолибденовая	SCMV4 (A387G22)	До 0,15	До 0,5	0,3—0,6	До 0,035	До 0,035	—	2—2,5	0,9—1,1	—	
			До 0,15	До 0,5	0,3—0,6	До 0,035	До 0,035	—	2,75—3,25	0,9—1,1	—	
Атомные реакторы	Марганцево-молибденоникелевая	SQV2A (A533B)	До 0,25	0,15—0,3	1,15—1,5	До 0,035	До 0,04	0,4—0,7	—	0,45—0,6	—	
			До 0,27	0,15—0,35	0,5—1	До 0,025	До 0,025	0,5—0,9	0,25—0,45	0,5—0,7	До 0,05	

¹ Указаны марки по японскому стандарту, в скобках — по стандарту американского общества по испытаниям материалов.

8.7. Состав металла антикоррозионных покрытий, наплавленных на внутренние поверхности сосудов высокого давления

Изделия	Марка наплавленной стали	Гарантированный состав, %										Гарантированная толщина наплавки, мм	Содержание феррита, %
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb				
Установка для десульфурации мазута	304	≤ 0,08	≤ 0,9	≤ 2,5	≤ 0,04	≤ 0,03	9—11	18—21	—	≥ 3,2	4—10		
	347	≤ 0,08	≤ 0,9	≤ 2,5	≤ 0,04	≤ 0,03	9—11	18—21	От C % X8 до 1	≥ 3,2	4—10		
	410	≤ 0,12	≤ 0,9	≤ 1,0	≤ 0,04	≤ 0,03	≤ 0,6	11—13,5	—	≥ 6,4	—		
Атомные реакторы	304	≤ 0,06	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 0,045	≤ 0,035	8—12	18—21	—	≥ 3,2	> 5		

толщины, из которого сосуды могут быть изготовлены только с помощью наплавки. В зарубежных странах для наплавки сосудов высокого давления используют разнообразные способы (табл. 8.5) [8], а в Японии для этой цели применяют преимущественно способ автоматической наплавки ленточными электродами.

Для корпусов сосудов высокого давления атомных реакторов и установок для десульфурации мазута применяют разнообразные стали (табл. 8.6), в том числе марганцевомолибденоникелевую, хромомолибденоникелевую и хромомолибденовую. В табл. 8.7 приведены данные составов металла, наплавленного на внутренние поверхности сосудов высокого давления.

В связи со сложностью конструкции таких сосудов секции корпуса и днище подвергают наплавке по отдельности до сборки. Для электростанции мощностью 500 МВт необходимы сосуды высокого давления высотой 21 м при внутреннем диаметре 4,7 м. Сосуды таких размеров изготовляют из стального листа толщиной 120 мм.

Схема технологии изготовления сосуда высокого давления показана на рис. 99 [9]. После изготовления секции корпуса (обечайки) выполняют ее наплавку, предварительно подвергнув пескоструйной обработке поверхности для удаления с них загрязнений. Тщательное выполнение зачистки служит залогом качественной бездефектной наплавки.

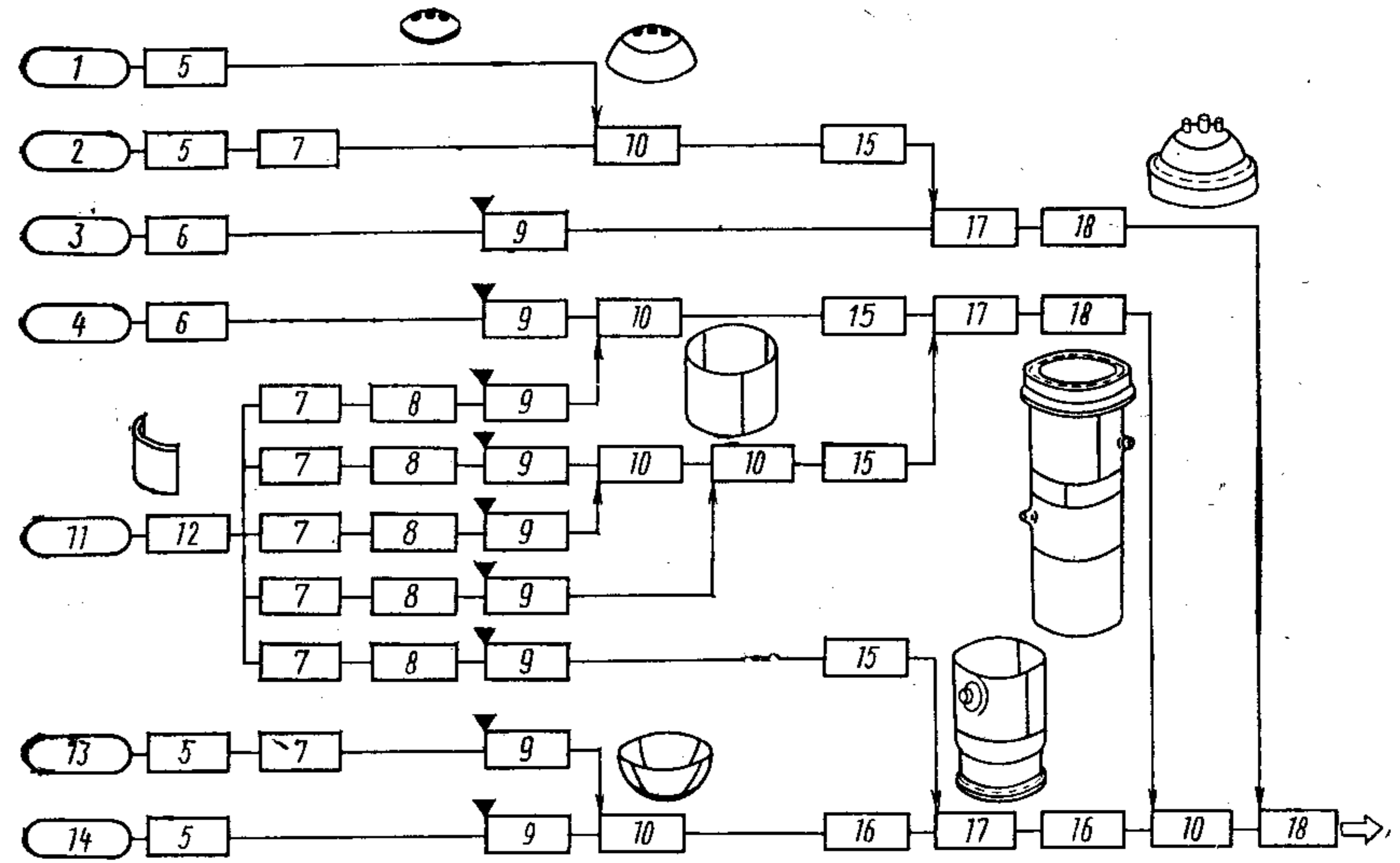


Рис. 99. Технологическая схема изготовления сосуда высокого давления:

1 — центральный диск верхней крышки; 2 — накладка верхней крышки; 3 — фланец верхней крышки; 4 — фланец корпуса; 5 — прессование заготовки, закалка и отпуск, выполнение разделки; 6 — выполнение разделки, механическая обработка; 7 — сварка продольных швов; 8 — закалка и отпуск; 9 — наплавка; 10 — сварка кольцевых швов; 11 — секция корпуса; 12 — прессование заготовки и выполнение разделки; 13 — накладка днища; 14 — центральный диск днища; 15 — электрошлаковая сварка расходным накопником; 16 — сварка; 17 — сварка окружных швов и отжиг; 18 — чистка и испытание водой под давлением

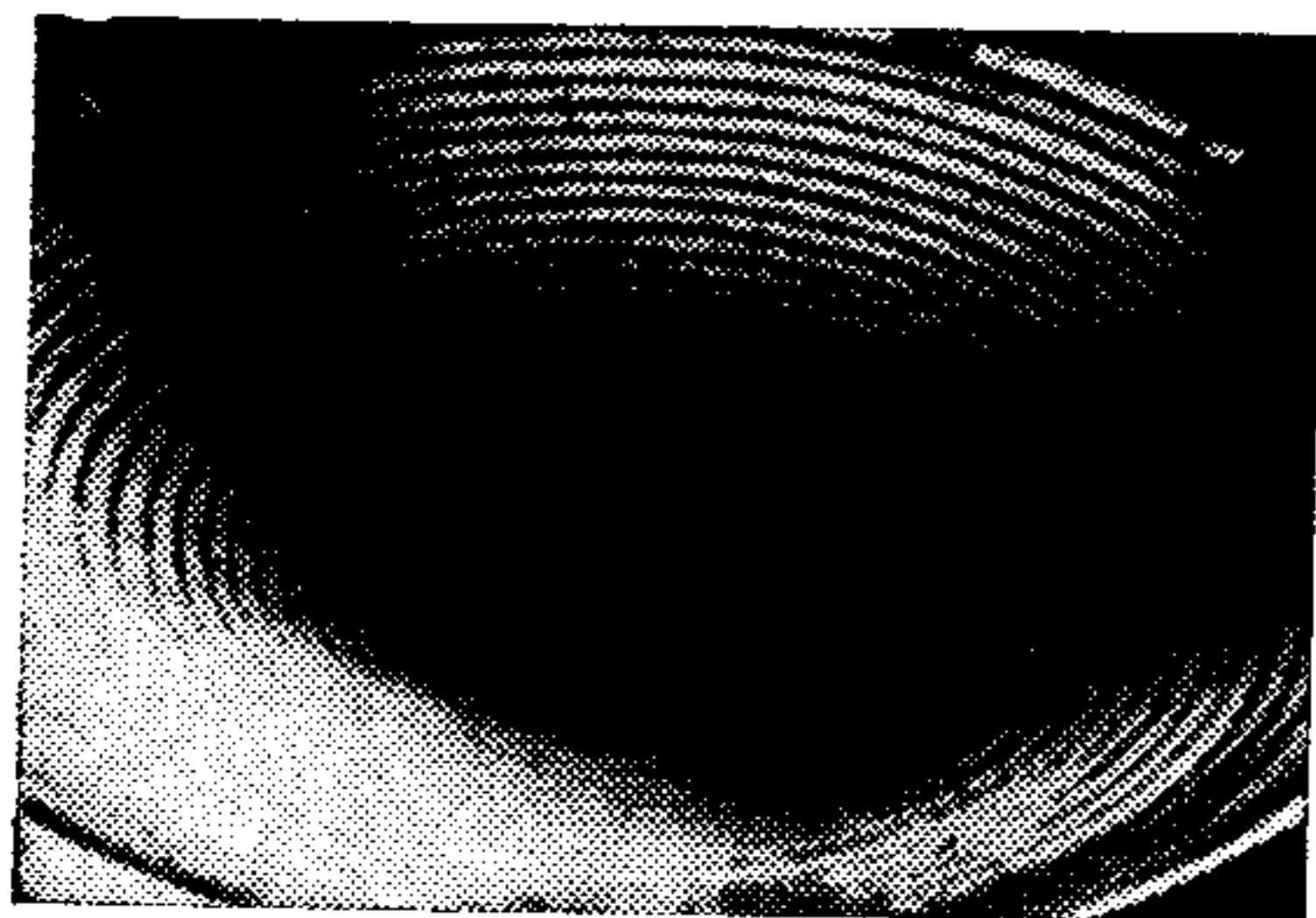


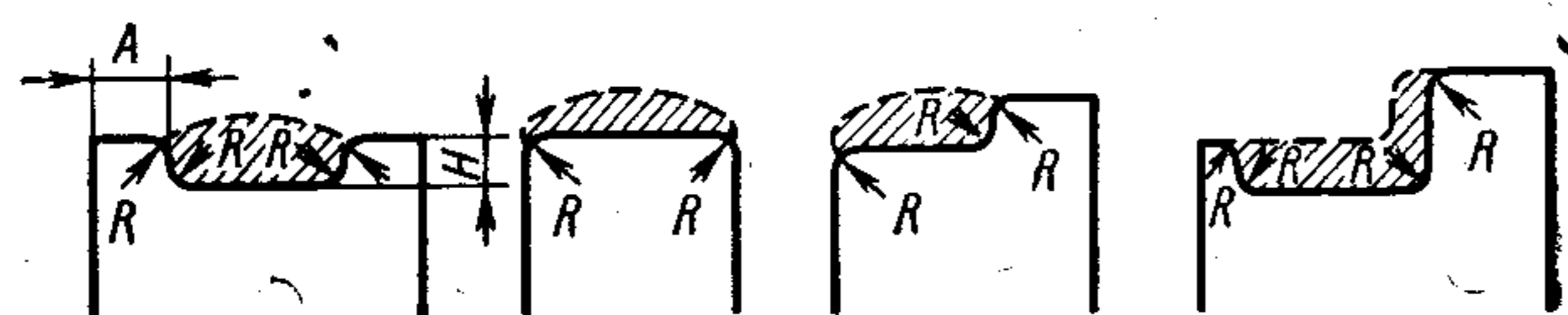
Рис. 100. Наплавленная поверхность дна сосуда высокого давления

На рис. 100 показана наплавленная внутренняя поверхность дна сосуда высокого давления [10]. Обечайки корпуса устанавливают обычно на роликовые стенды, и наплавку выполняют по окружности кольцевыми валиками; днище и крышку корпуса наплавляют по спирали.

После наплавки сосуды подвергают длительной термообработке. Учитывая жесткие условия их работы, высокие требования по эксплуатационной надежности таких ответственных изделий, выбор наплавочных материалов для данного назначения и процесс наплавки осуществляют особенно тщательно.

Прочие изделия. Для наплавки клапанов используют стеллит [11]. С целью снижения влияния основного металла на состав на-

Рис. 101. Схемы выполнения разделки поверхности клапанов перед наплавкой



8.8. Температура предварительного подогрева при наплавке стеллита на различные стали

Сталь, марки	Температура подогрева, °С
	1-я ступень
Углеродистая, SS, SF, WSB, SC	200—450
Низкоуглеродистая, F11, F22, F5a, WC6, WV9, C5	300—450
Высокохромистая SUS403, SUS431	400—600
Коррозионно-стойкая типа 18-8, SUS304, SUS316	400—600

Примечание. Температура подогрева для 2-й ступени 600—700°С.

плавленного слоя при выполнении разделки поверхности детали под наплавку необходимо предусматривать скругление острых внутренних и наружных ее углов (рис. 101). Для предотвращения образования трещин в наплавленном слое предварительный подогрев клапанов проводят в две ступени, включая первичный нагрев, выдержку при этой температуре, подъем температуры подогрева до заданной и поддержание этой температуры до окончания наплавки (табл. 8.8).

Для предотвращения растрескивания металла после наплавки осуществляют последующую термообработку деталей по режиму, приведенному в табл. 8.9.

8.9. Режим термообработки деталей после наплавки стеллита

Сталь, марки	Режим термообработки	
	Температура, °С	Охлаждение
Углеродистая, SS, SF, WCB, SC	620—650	Замедленное
Низколегированная, F11, F22, F5a, WC6, WC9, C5	650—700	»
Высокохромистая, SUS403, SUS431	650—700	»
Коррозионно-стойкая типа 18-8, SUS304, SUS316	950—1100	Быстрое

Прессование металлов, широко используемое в автомобильной и других отраслях промышленности, требует применения разнообразных штампов (рис. 102). Перед их наплавкой выполняют разделку поверхности по одной из форм, показанных на рис. 103 [12]. Разделка по форме *a* отличается простотой выполнения, а по форме *b* обеспечивает гарантированный уровень свойств наплавленного металла.

Для реставрации штампов обычно применяют дуговую наплавку покрытыми электродами из высокохромистой аустенитной проволоки. Наплавку осуществляют после предварительного подогрева штампа до температуры 300—400°С.

Высокие требования к точности изготовления штампов требуют принятия мер для предотвращения деформации деталей при наплавке. Одна из таких мер связана с определенной последовательностью проведения наплавки отдельными небольшими участками в

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИИ НАПЫЛЕНИЯ

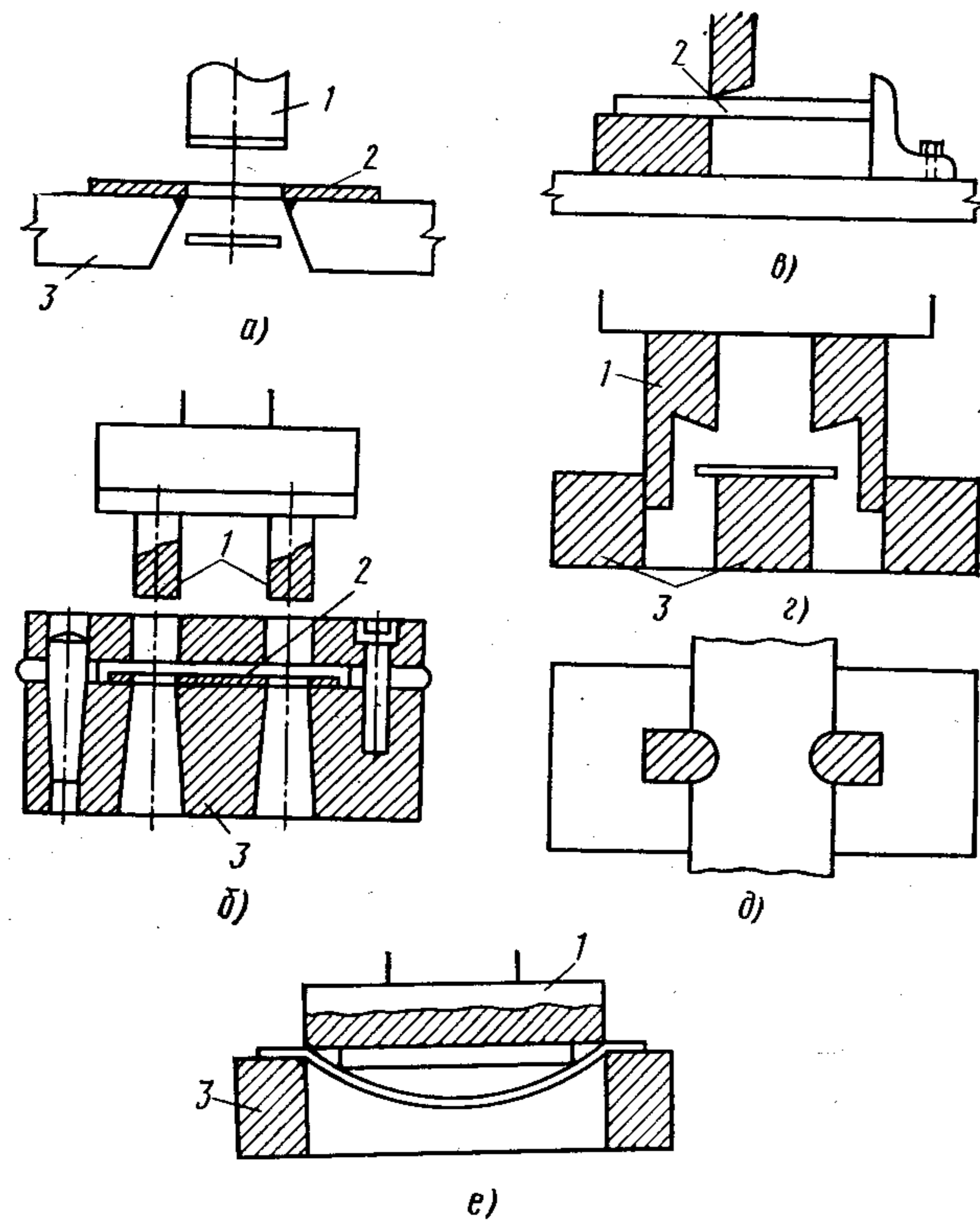


Рис. 102. Конструкция штампов различного назначения:

а — вырубной штамп; б — вырубной штамп с направляющей и фиксирующей плитой; в, г — обрубной штамп; д — подрубной штамп; е — кромкоотрубной штамп; 1 — пуансон; 2 — заготовка; 3 — матрица

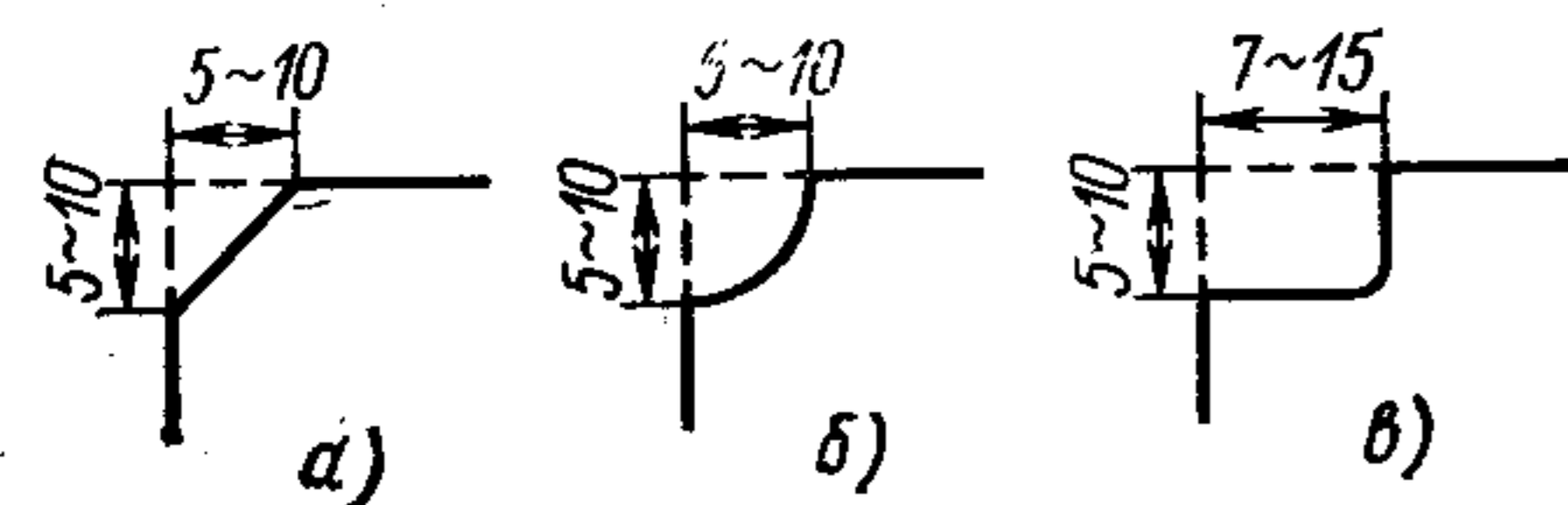


Рис. 103. Схема разделки поверхности штампа перед наплавкой

шахматном порядке, с симметричным расположением и т. п. Наплавку следует проводить на режиме, обеспечивающем минимальное проплавление основного металла.

9.1. Общие сведения. Напыление представляет собой процесс нанесения покрытия на поверхность детали с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы порошка или капли расплавленного напыляемого материала, осаждающиеся на основном металле при ударном столкновении с его поверхностью.

Первоначально напыление покрытий осуществляли с помощью истекающей из сопла горелки струи воздуха или нагретого газа, обеспечивающей мелкое распыление расплавленного металла и его осаждение на поверхности изделия. Этот способ впоследствии развился в технологию распыления жидких расплавов, широко используемую в современной порошковой металлургии. Первая установка для напыления, созданная в 1910 г. Шоопом (Швейцария), была предназначена для нанесения на подготовленную соответствующим образом поверхность изделия покрытия из расплавленного металла, имеющего низкую температуру плавления, с помощью струи горячего сжатого воздуха [1]. Установка, разработанная для этого метода, получилась громоздкой и малопродуктивной.

История напыления насчитывает уже десятки лет, в течение которых совершенствовался способ упрочнения деталей машин, разрабатывались новые источники нагрева, имеющие высокие энергетические характеристики; создавалась аппаратура для непрерывной подачи напыляемого материала в виде проволоки или порошка; разрабатывалось и изготовлялось комплектное оборудование, типы и модификации которого к настоящему времени стали достаточно многочисленными.

Существующую технологию напыления в зависимости от применяемого источника тепловой энергии можно разделить на два основных вида: газопламенное напыление, при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании смеси горючего газа с кислородом, и электрическое напыление, основанное на использовании теплоты, выделяющейся при горении электрической дуги.

Газопламенное напыление за длительный период применения подвергалось существенным усовершенствованиям как по линии модернизации оборудования, так и в направлении улучшения качества напыляемых материалов. В настоящее время газопламенное напыление используют для нанесения покрытия из керамических тугоплавких материалов. Газопламенный метод находит ши-

рокое применение в технике для напыления и последующего оплавления покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе никеля и кобальта.

Одним из специальных видов газопламенного напыления является напыление, при котором используется энергия взрыва (детонация) ацетилено-кислородной смеси. Детонационный метод позволяет наносить покрытия из тугоплавких материалов.

Самой популярной и старой разновидностью электрического напыления является дуговая металлизация. Ранее при такой металлизации использовали дугу, горящую на переменном токе, что не позволяло получать устойчивый процесс распыления проволоки. В настоящее время для создания дуги в электрометаллизаторах используют постоянный ток, обеспечивающий лучшую стабильность процесса нанесения покрытия. Разработанный в последнее время способ электроимпульсного нанесения покрытий дал хорошие результаты при нанесении покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей машин. В настоящее время этот метод продолжают совершенствовать.

В процессе больших качественных и количественных изменений, происходящих в современном промышленном производстве, напылению суждено стать одной из перспективнейших технологий, широкое применение которой будет сопровождаться повышением производительности оборудования для нанесения покрытий с оснащением его средствами механизации и автоматизации.

В качестве исходных материалов для напыления используют металлическую проволоку, керамические прутки, порошковые металлы и сплавы, порошковые керамические материалы. Увеличение многообразия форм и видов напыляемых материалов, радикальное повышение их качества сопровождалось постепенным повышением и качества самих покрытий, получаемых напылением. Современный уровень технологии напыления позволяет осуществлять восстановление и упрочнение деталей машин и механизмов порошковыми композиционными материалами и получать специальные покрытия, обладающие уникальными свойствами.

Таким образом, напыление развилось в особую технологию поверхностной обработки материалов, отличающуюся большим своеобразием и областями применения.

В ряду современных способов поверхностной обработки материалов напыление занимает особое место.

Преимущества технологии напыления. 1. Возможность нанесения покрытий на изделия, изготовленные практически из любого материала. Напылением можно наносить покрытия на изделия, изготовленные не только из металла, но и из стекла, фаянса и фарфора, органических (включая дерево, ткань, бумагу, картон) и многих других материалов. Этим преимуществом не обладает ни один из известных способов поверхностной обработки, из которых одни пригодны только для металлов, а другие, хотя и обладают многими ценными преимуществами, применимы не для всех материалов.

2. Возможность напыления разных материалов с помощью одного и того же оборудования.

3. Отсутствие ограничений по размеру обрабатываемых изделий. Покрытие можно напылить как на большую площадь, так и на ограниченные участки больших изделий. При нанесении же металлопокрытия электролитическим осаждением, погружением в расплав или диффузионным насыщением (азотированием, цементацией и др.) возможности обработки изделия ограничены размерами ванны либо печи. Напыление приносит большие экономические выгоды в случае неприемлемости других способов упрочнения, например, когда необходимо нанести покрытие на часть большого изделия.

4. Возможность применения для увеличения размеров детали (восстановление и ремонт изношенных деталей машин). Во избежание выбраковки изделия, при механической обработке которого срезан излишний металл, или при реставрации деталей с большим износом, напыление, как и наплавку, можно использовать как способ восстановления размеров деталей. Напылением можно наносить слой толщиной в несколько миллиметров, тогда как при электролитическом хромировании, например, осуществляемом с целью повышения износостойкости, толщина слоя составляет 6—300 мкм.

5. Относительная простота конструкции оборудования для напыления, его малая масса, несложность эксплуатации оборудования для напыления, возможность быстро и легко перемещаться. В комплекте оборудования для газопламенного напыления достаточно иметь компрессор, который можно также использовать для предварительной пескоструйной обработки поверхности изделия, горелку для напыления и газовые баллоны. Если же имеется источник электроэнергии, то напыление можно проводить электрическими методами.

6. Возможность широкого выбора материалов для напыления. Для напыления можно использовать различные металлы, сплавы, соединения металлов с оксидами, пластмассы, различные химические соединения и их смеси. Возможно также нанесение многослойных покрытий разнородными материалами, что обеспечивает получение покрытий со специальными свойствами.

7. Небольшая деформация изделий под влиянием напыления. Многие способы поверхностной обработки изделия требуют нагрева до высокой температуры всего изделия или значительной его части, что часто становится причиной его деформации.

8. Возможность использования напыления для изготовления деталей машин различной формы. Напыление производят на поверхность формы-оправки, которую после окончания процесса удаляют: остается оболочка из напыленного материала.

9. Простота технологических операций напыления, относительно небольшая трудоемкость, высокая производительность нанесения покрытия.

10. Не требуется специальной дорогостоящей обработки (очистки) продуктов, загрязняющих окружающую среду, в отличие от

НАПЫЛЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

средств очистки и нейтрализации при гальванических видах обработки изделий.

Недостатки технологии напыления. 1. Малая эффективность нанесения покрытий на мелкие детали из-за низкого коэффициента использования напыляемого материала (отношение массы покрытия к общей массе израсходованного материала). В таких случаях поверхностную обработку мелких деталей целесообразно осуществлять гальваническим, химическим, физическим и другими способами (например, диффузионным насыщением, электролитическим, из расплавов металлов и пр.).

2. Вредные условия работы операторов во время предварительной обработки поверхности изделий. Для предварительной подготовки поверхности перед напылением используют пескоструйную или дробеструйную обработку с помощью кварцевого песка, корунда, стальной или чугунной дроби. Эта операция сопровождается загрязнением рабочего участка и ухудшает условия работы оператора, обслуживающего установку.

3. Выделение дыма и аэрозолей во время напыления. Процесс напыления сопровождается образованием облака мельчайших частиц напыляемого материала, взаимодействие которых с окружающим воздухом сопровождается образованием различных соединений и дыма. Вредность соединений и дыма для здоровья людей требует мощных вытяжных устройств.

Напыление имеет отличительные особенности, знание которых необходимо для правильного выбора технологии нанесения покрытий для каждого конкретного случая. Для выбора оптимального способа нанесения покрытия необходимо учитывать форму и размеры изделий; требования, предъявляемые к точности нанесения покрытия, его эксплуатационным свойствам; затраты на основное и вспомогательное оборудование, наплавочные материалы и газы, на предварительную и окончательную обработку покрытий; условия труда и другие факторы производственного и социального характера.

Благодаря совершенствованию технологии и модернизации оборудования напыление доведено до достаточно высокого технического уровня. В качестве напыляемого материала можно использовать практически все материалы, существующие в твердом виде, которые в процессе напыления не испаряются и не изменяют значительно своих свойств. В момент столкновения расплавленных частиц с поверхностью основного материала происходит их сцепление с подложкой и быстрое охлаждение, которое сопровождается неравномерной усадкой осажденного материала покрытия и возникновением в нем структурных напряжений, что затрудняет образование плотного слоя без его растрескивания и разрушения.

Напыляемые материалы применяют в виде проволоки, прутков и порошка. Проволоку и прутки используют при газовом, дуговом и электроимпульсном напылении, а порошки — при плазменном, детонационном и газопламенном напылении.

10.1. НАПЫЛЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ВИДЕ ПРОВОЛОКИ

При напылении металлами или сплавами, обрабатываемых волочением, их используют в виде проволоки, преимущество которой связано с возможностью непрерывной и равномерной ее подачи в высокотемпературную зону горелки.

Алюминий. Алюминиевое покрытие используют для защиты черных металлов от коррозии, а в случае последующего диффузионного отжига покрытия происходит диффузия алюминия в основной металл, что позволяет получать слой, обладающий стойкостью к высокотемпературному окислению. Проволоку с алюминиевым покрытием используют в качестве электрических проводов.

Для напыления используют алюминиевую проволоку, содержащую не менее 99,85% Al (согласно японскому промышленному стандарту H2102).

Цинк. Цинковое покрытие используют для защиты черных металлов от коррозии. Проволоку для напыления изготавливают из наиболее чистого цинка — не менее 99,995% Zn (согласно японскому промышленному стандарту H2107). Для напыления следует использовать цинковую проволоку, специально изготовленную для этой

цели. Чем чище цинковая проволока, тем мельче она распыляется и тем плотнее и качественнее получаемое покрытие.

Молибден. В связи с хорошей адгезией молибдена к черным металлам его часто используют для нанесения подслоя, на который затем напыляют слой требуемого материала. Само молибденовое покрытие используют как средство повышения жаростойкости. Молибден является единственным промышленным металлом, обладающим стойкостью к горячей концентрированной соляной кислоте. Для напыления используют материал с содержанием не менее 99,95% Мо.

Олово и его сплавы. Лужение как способ повышения кислотостойкости и коррозионной стойкости широко используют в производстве пищевой тары. Для этой цели используют олово самой высокой чистоты, уделяя особое внимание содержанию мышьяка.

Баббитовое покрытие, состоящее из олова и свинца, используют во вкладышах подшипников. Состав баббита (белого металла) утвержден японским промышленным стандартом Н5401 (1958 г.).

Медь и ее сплавы. Для напыления используют проволоку из следующих материалов на основе меди:

1) чистая медь (не менее 99,9% Cu) используется для нанесения электропроводных и декоративных покрытий;

2) алюминиевая бронза (5—12% Al) с добавлением небольшого количества железа, никеля и марганца обладает высокой коррозионной стойкостью, особенно в морской воде, а также стойкостью к действию серной и соляной кислот, однако она не обладает стойкостью к азотной кислоте. Кроме того, бронза хорошо противостоит коррозионной усталости, является эрозиянностойкой и износостойкой;

3) фосфористая бронза с содержанием 0,03—0,35% P, применяемая в качестве раскислителя обеспечивает покрытие, обладающее высокой износостойкостью; ее используют для упрочнения новых и восстановления изношенных частей валов и подшипников скольжения судовых механизмов. Красивый светло-коричневый цвет покрытия фосфористой бронзы может быть использован для декоративной отделки;

4) латуни, обладая хорошей коррозионной стойкостью, корродируют в морской воде при повышенных температурах. Для напыления используют судостроительную латунь, стойкую к морской воде;

5) свинцовистая бронза представляет собой медный сплав, содержащий 23—42% Pb. Покрытие антифрикционной свинцовистой бронзы, обладающее стойкостью к схватыванию при высоких удельных нагрузках, широко используют в подшипниках, работающих в режиме высоких скоростей и удельных нагрузок. Японским промышленным стандартом Н5403 (1958 г.) определены три сорта антифрикционной свинцовистой бронзы.

Никель и его сплавы. При проволочном напылении используют следующие материалы этой группы:

1) чистый никель применяют для защиты от эрозионного воздействия; никель растворяется в азотной кислоте и царской водке, до-

вольно медленно растворяется в соляной и серной кислотах, не корродирует в воде и устойчив в большинстве химических соединений;

2) нихром (сплав 80% Ni и 20% Cr) практически не окисляется при высокой температуре и хорошо противостоит действию некоторых кислот и щелочей, что предполагает нанесение нихромового слоя на изделие с целью повышения его жаростойкости и коррозионной стойкости. Вместе с тем покрытие из нихрома нестойко при высокой температуре в среде, содержащей сероводород и сернистый газ, а также в азотной и соляной кислотах. Для напыления используют также проволоку хромоникелевого сплава NCHW2, хотя он уступает нихрому по стойкости к окислению и жаростойкости;

3) монель обладает высокой коррозионной стойкостью и кислотостойкостью, хорошо противостоит действию соленой воды, в нейтральных и щелочных растворах практически не корродирует. По отношению к слабым кислотам обладает сравнительно хорошими антикоррозионными свойствами.

В табл. 10.1 сопоставлены результаты испытаний на коррозионную стойкость для монель-металла и коррозионно-стойкой стали.

10.1. Результаты испытаний на коррозионную стойкость (г/см²) для монель-металла и коррозионно-стойкой стали SUS304

Агрессивная среда	Монель	Сталь SUS304	Режим испытаний
30%-ная H ₂ SO ₄	0,0261	0,1975	10 сут, 80°C
10%-ная H ₂ SO ₄	0,0078	0,2886	31 сут, 26°C
10%-ная HCl	0,0381	0,3679	31 сут, 26°C
100%-ная HCl	0,098	0,1327	20 сут, 18°C

Углеродистая и низколегированная стали. Эти стали наиболее широко используют для повышения износостойкости деталей машин. Их широко применяют также для реставрации изношенных деталей. Японский промышленный стандарт Н8302—1977 определяет сорта используемых для напыления углеродистой и низколегированной сталей, составы и поставку (проволока, порошок) сталей, свойства упрочненных слоев.

Коррозионно-стойкая сталь. Предназначенную для напыления сталь, обладающую высокой коррозионной стойкостью и жаростойкостью, подразделяют на четыре сорта: сорт 1 (мартенситная) и сорта 2, 3, 4 (аустенитная).

1. Мартенситная коррозионно-стойкая сталь. Быстрое охлаждение металла системы Fe—Cr, находящегося в области аустенитного или аустенитно-ферритного состояния, обеспечивает получение структуры мартенсита. Высокоуглеродистые стали при этом приобретают высокие износостойкость и коррозионную стойкость.

2. Аустенитная коррозионно-стойкая сталь. Сплавы систем Fe—Cr—Ni и Fe—Cr—Ni—Mn при номинальной температуре имеют структуру аустенита. Аустенитные стали обладают высокой корро-

зионной стойкостью и жаростойкостью. Выбор соответствующей марки стали в значительной степени определяется параметрами рабочей среды, поэтому должен быть основан на предварительных испытаниях образцов.

Серебро. Этот металл используют для напыления электрических контактов и нанесения покрытия на оси перед напрессовкой деталей (толщина покрытия $\sim 0,1$ мм).

10.2. ПРУТКОВЫЕ НАПЫЛЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

На современном рынке предлагаются наплавочные материалы в виде прутков, прессованных из оксидов металлов. Поскольку оксиды получают обычно в виде порошка, для изготовления прутков применяют методы порошковой металлургии. В порошок добавляют связующие, затем прессуют и спекают. Прутковый напыляемый материал, разработанный американской фирмой «Norton», имеет торговое название «Rokide». Прутки под этим названием, используемые для газопламенного напыления, поставляют в виде следующих сортов, различающихся по составу: «Rkide A» — оксид алюминия (глинозем), «Rokide ZS» — силикат циркония, «Rokide Z» — диоксид циркония, «Rokide C» — оксид хрома, «Rokide MA» — магнезиальная шпинель.

10.3. ПОРОШКОВЫЕ НАПЫЛЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Некоторые твердые и хрупкие металлы и сплавы для напыления, а также химические соединения, из которых обычными способами невозможно изготовить проволоку или прутки, могут поставляться в виде порошков. Порошковые материалы экономически более выгодны, поскольку изготовление проволоки или прутков из твердых и хрупких материалов требует дорогостоящих специальных способов. Практически любой напыляемый материал можно изготовить в виде порошка.

Плазменное, детонационное и газопламенное напыление некоторыми материалами может быть осуществлено только путем использования порошковых материалов.

Форма, гранулометрический состав, сыпучесть порошковых напыляемых материалов оказывают влияние на технологические параметры процесса напыления и свойства получаемых покрытий. Размер частиц порошка следует выбирать в зависимости от характеристик источника тепловой энергии (горелки) и теплофизических свойств напыляемого материала — температуры плавления, удельной теплоемкости, плотности и других параметров.

Применение мелкодисперсного порошка обычно способствует повышению плотности напыляемого покрытия. Недостаток такого покрытия заключается в том, что в нем содержится большое количество оксидов, образовавшихся в результате перегрева частиц при движении в высокотемпературном потоке газа.

При напылении порошка, состоящего из смеси частиц разного

размера, однородность покрытия нарушается из-за большого различия между крупными и мелкими частицами по степени расплавления и скорости их движения в напылительной струе. Для напыления обычно используют порошки, подобранные по грануляции таким образом, чтобы размеры их не выходили за пределы 44—74 мкм. В последнее время при напылении мощными плазменными горелками используют мелкие порошки с размером частиц в несколько микрометров.

Металлы и сплавы. Ниже перечислены металлы и сплавы, применяемые для напыления:

1) алюминий используют для защиты черных металлов от коррозии; при нагреве за счет диффузии алюминия в основной металл образуется упрочненный слой, стойкий к окислению при высокой температуре. Плазменное напыление порошка алюминия используют для образования электропроводного покрытия;

2) цинк обеспечивает защиту черных металлов от коррозии (в Японии практически не применяют);

3) сплавы цинка с алюминием напыляют для получения антикоррозионных покрытий. При высоком содержании алюминия ($\sim 50\%$) эти сплавы малопластичны, из них трудно изготовить проволоку волочением, для напыления такие сплавы используют в виде порошка;

4) медь и ее сплавы обычно применяют для наплавки, напылением наносят только электропроводные покрытия;

5) молибден используют в качестве подслоя перед последующим нанесением на него желаемого материала. Кроме того, он пригоден для повышения износостойкости и коррозионной стойкости к соляной кислоте. Напыление порошка молибдена осуществляют плазменным способом;

6) вольфрам — наиболее тугоплавкий из всех металлов. Его необходимо применять в чистом виде при незначительном содержании примесей, особенно железа. Он интенсивно окисляется на воздухе при сравнительно невысокой температуре. В инертной и восстановительной среде может выдерживать высокую температуру. Вольфрамовое покрытие имеет хорошее сцепление с керамическими поверхностями. При плазменном напылении получают вольфрамовое покрытие, значительно превосходящее соответствующие покрытия, наносимые электролитическим или вакуумным (сублимационным) способом;

7) коррозионно-стойкая сталь и нихром используют как напыляемый материал не только в форме проволоки, но и в виде порошка, который имеет некоторые специфические особенности. Покрытие из коррозионно-стойкой стали обладает антикоррозионными свойствами и износостойкостью. Нихромовые покрытия являются антикоррозионными и жаростойкими. При напылении керамики и других материалов слой нихрома может быть использован как подслой;

8) прочие сплавы — сплав олова со свинцом (баббит) и антифрикционную свинцовистую бронзу можно применять в виде порошка и проволоки. Оба сплава используют в подшипниках.

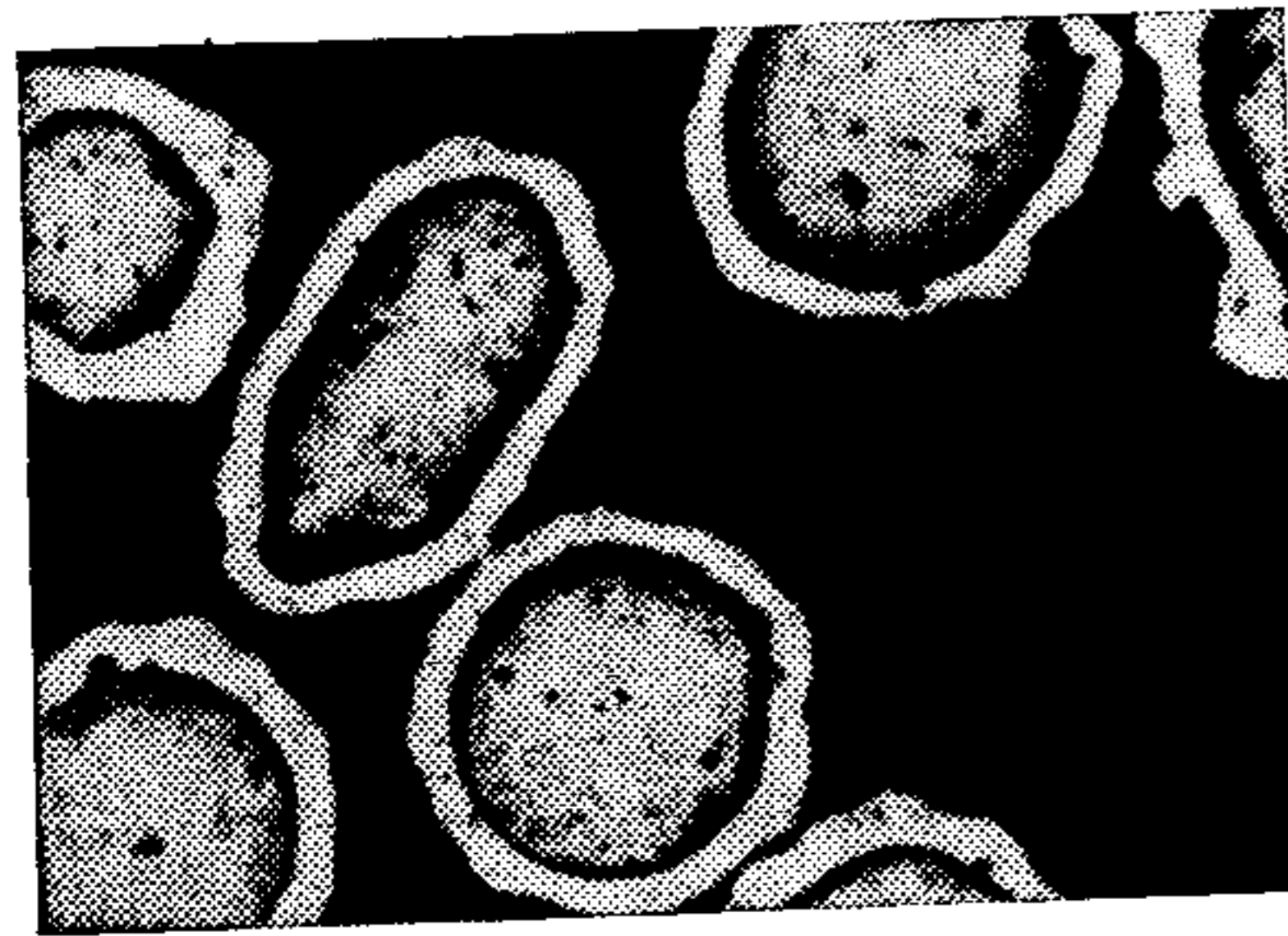


Рис. 104. Частицы плакированного порошка, состоящего из никеля (82%) и алюминия (18%) ($\times 330 \times 7/10$)

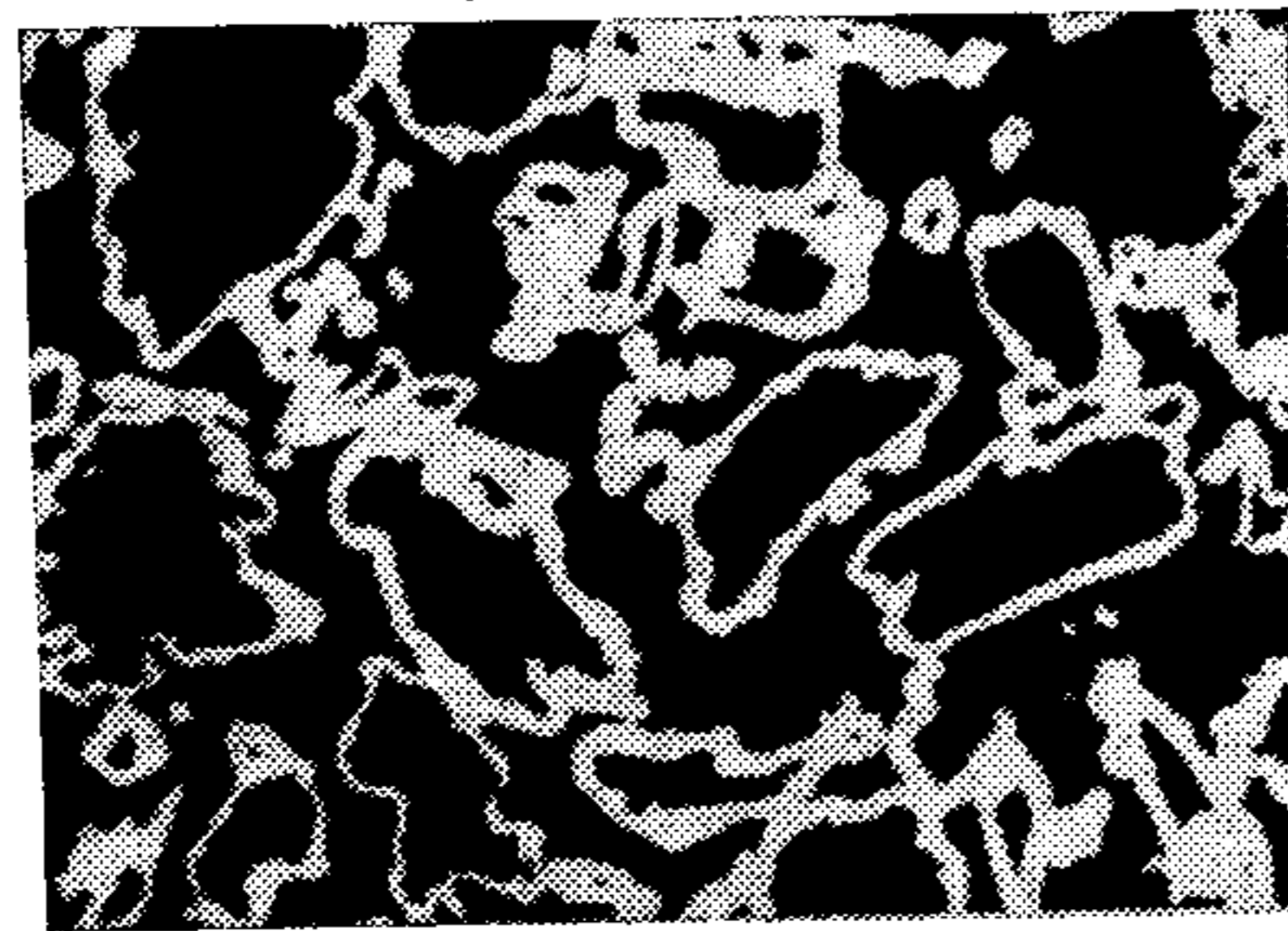


Рис. 105. Частицы плакированного порошка, состоящего из никеля (85%) и графита (15%) ($\times 390 \times 7/10$)

Композиционные материалы. Для напыления иногда используют плакированные порошки, частицы которых состоят из ядра — основы размером от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров, окруженного плакирующим слоем второго компонента (толщина слоя 2—3 мкм). Частицы плакированного порошка показаны на рис. 104 [3].

Плакированные порошки могут быть получены из самых разнообразных материалов, применение которых для напыления обеспечивает нанесение композиционных покрытий. Такие материалы, по внешнему виду являясь однородными, представляют собой в сущности механическую смесь различных компонентов. В случае напыления отдельных компонентов порошка, входящих в состав покрытия, оно может разрушиться из-за отсутствия должного сцепления между составляющими смеси, тогда как при использовании плакированного порошка опасность такого разрушения полностью отсутствует. Напыление плакированным порошком имеет и другие преимущества, связанные, в частности, с повышением коэффициента использования материала и отсутствием окисления основного компонента при напылении, поскольку он защищен плакирующим слоем второго компонента. В процессе напыления плакированным порошком под действием высокотемпературной газовой струи происходят экзотермические реакции между компонентами порошка с образованием между ними интерметаллического соединения. Теплота экзотермических реакций способствует повышению прочности сцепления покрытия с основным металлом. К числу сочетаний материалов, склонных к экзотермическим взаимодействиям, в частности относятся никель — алюминий. Покрытие из алюминиды никеля может успешно работать при высоких температурах (до 650°C), обладая высокой термо- и износостойкостью.

Композиционное покрытие в виде сочетания двух разнородных материалов обладает свойствами, присущими каждому из материалов. В частности, плакированный порошок, сочетающий никель с графитом (рис. 105) [3], обеспечивает получение покрытия с хорошей обрабатываемостью резанием при удовлетворительной стойко-

сти к эрозионному износу. Композиционное покрытие, содержащее Ni, Cr и Al, обладает стойкостью к окислению в воздушной среде при высокой температуре. Этот композиционный материал пригоден также для напыления подслоя под керамику. Композиционный материал, сочетающий молибден с алюминием, применяют для нанесения покрытий на поверхности подшипников скольжения и реставрации деталей из углеродистой стали. При этом он обладает высокой износостойкостью.

Существуют плакированные порошки, состоящие из кобальт-карбида вольфрама*, никель-карбида хрома и др., позволяющие получать износостойкие покрытия, а также порошки, сочетающие никель с фтористым кальцием, оксид никеля с фтористым кальцием, алюминий или алюминиевую бронзу с полиэфиром для нанесения покрытий, обладающих низким коэффициентом трения.

Самофлюсующиеся сплавы. Нанесение покрытий из самофлюсующихся сплавов и последующее их оплавление позволяет получить слои без пор и с высокой плотностью. Покрытия из самофлюсующихся сплавов можно использовать и без последующего оплавления. Самофлюсующиеся сплавы представляют собой сплавы на основе никеля, хрома и никеля или кобальта, содержащие добавки бора и кремния. Покрытия из этих сплавов обладают высокими износостойкостью, коррозионной стойкостью и стойкостью к окислению в воздушной среде при высоких температурах. Из-за низкой пластичности эти сплавы поставляют для напыления в виде порошков.

Составы нескольких видов самофлюсующихся сплавов определены японским промышленным стандартом H8303 (1976) (табл. 10.2). Сплавы MSFNi называют сплавами типа колмоной, а MSFCo — ти-

10.2. Состав самофлюсующихся сплавов

Сплав	Состав, %									
	Ni	Cr	B	Si	C	Fe	Co	Mo	Cu	W
MSFNi1	Остаточное	0—10	1—2,5	1,5—3,5	До 0,25	До 4	До 1	—	До 4	—
MSFNi2	То же	9—11	1,5—2,5	2—3,5	До 0,5	До 4	До 1	—	—	—
MSFNi3	»	10—15	2—3	3—4,5	0,4—0,7	До 5	До 1	—	—	—
MSFNi4	»	12—17	2,5—4	3,5—5	0,4—0,9	До 5	До 1	До 4	До 4	—
MSFNi5	»	15—20	3—4,5	2—5	0,5—1,1	До 5	До 1	—	—	—
MSFCo1	10—30	16—21	1,5—4	2—4,5	До 1,5	До 5	Остаточное	До 7	—	До 10
MSFCo2	0—15	19—24	2—3	1,5—3	До 1,5	До 5	То же	—	—	4—15

* При плазменном напылении карбида вольфрама (с размером частиц 50—90 мкм) неизбежна потеря до 35% C.

10.3. Свойства покрытий, получаемых напылением самофлюсующимися сплавами

Сплав	Твердость HRC в состоянии после напыления	Примечание
<i>Сплавы на основе никеля</i>		
MSFNi1	15—30	Хорошая обрабатываемость резанием, высокие вязкость, ударная вязкость, коррозионная стойкость и жаростойкость
MSFNi2	30—40	Удовлетворительная обрабатываемость твердосплавными пластинками, высокие вязкость, ударная вязкость, коррозионная стойкость и жаростойкость
MSFNi3	40—50	Удовлетворительная обрабатываемость твердосплавными пластинками, однако предпочтительно шлифование; высокие вязкость, ударная вязкость, коррозионная стойкость и жаростойкость
MSFNi4	50—60	Плохая обрабатываемость резанием, хорошая шлифуемость при мокром шлифовании; применяют в интересах повышения износостойкости, коррозионной стойкости и жаростойкости
MSFNi5	55—65	Плохая обрабатываемость резанием, хорошая шлифуемость при мокром шлифовании; особо высокая износостойкость, в частности при эрозивном изнашивании и трении скольжения
<i>Сплавы на основе кобальта</i>		
MSFCo1	35—50	Удовлетворительная обрабатываемость твердосплавными пластинками, однако рекомендуется шлифование; высокие вязкость, ударная вязкость, коррозионная стойкость при высоких температурах и жаростойкость
MSFCo2	50—65	Плохая обрабатываемость резанием, хорошая шлифуемость при мокром шлифовании; высокая коррозионная стойкость при высоких температурах и износостойкость
<i>Сплавы с добавлением карбида вольфрама</i>		
MSFWC1	45—55	Самофлюсующийся сплав на основе кобальта, в матрице сплава распределены частицы карбида вольфрама; особо высокая износостойкость
MSFWC2	55—65	Самофлюсующийся сплав на основе никеля, в матрице сплава распределены частицы карбида вольфрама; особо высокая износостойкость

10.4. Состав самофлюсующихся сплавов, разработанных для наплавки рельсов, %

Сплавы	Ni	Cr	B	Si	Mo	Fe	C	Mn
F303	37	13	0,7	2	5	Остальное	—	—
F307 Рельсовая сталь*	37	13	0,5	2 0,1—0,3	4,5	»	—	—
	—	—	—	—	—	—	0,6—0,75	0,7—1,1

* Рельсовая сталь, выплавленная в кислородном конвертере; масса 1 м рельса равна 60 кг.

па стеллит. Для наплавки используют также порошковые сплавы типа MSFWC, представляющие собой механическую смесь самофлюсующихся сплавов с карбидом вольфрама (20—80%). В табл. 10.3 приведены свойства покрытий, полученных напылением самофлюсующимися сплавами, а в табл. 10.4 — составы самофлюсующихся сплавов, разработанных для наплавки рельсов [4].

10.4. КЕРАМИКА

К керамике относят такие соединения, как оксиды металлов, бориды, нитриды, силикаты и карбиды. Керамика является тугоплавким материалом, для плавления которого необходима температура до 3000°C, так что газопламенное напыление не обеспечивает температуры, необходимой для напыления керамическими материалами. При использовании плазменного и детонационного способов температура плавления напыляемого материала не имеет значения, поэтому названными способами можно напылять любые материалы, способные к расплавлению при нагреве. Тем не менее в настоящее время из большого многообразия керамических материалов для напыления наиболее широко используют только оксиды и карбиды.

Оксиды. По сравнению с другими высокотемпературными материалами оксиды имеют наиболее низкие теплопроводность и электропроводность и значительную прочность при высоких температурах. Оксиды можно разделить на простые и сложные. Простые оксиды представляют собой соединение одного металла с кислородом, а сложные — соединения оксидов двух металлов или более. Наиболее высокие температуры, как правило, могут выдерживать простые оксиды. Сложные оксиды в большинстве своем являются тугоплавкими материалами, однако их температура плавления более низкая, чем температура плавления входящих в них компонентов.

Не все оксиды при высоких температурах химически устойчивые. Например, в восстановительной среде при высокой температуре оксиды таких металлов, как церий, хром, никель, олово, титан

10.5. Температура потери устойчивости оксидов бериллия, магния, циркония и тория при взаимодействии с различными материалами, °С

Оксид	C	W	Mo	ThO ₂	ZrO ₂	MgO ₂	BeO
BeO	2300	2000	1900	2100	1900	1800	—
MgO	1800	2000	1600	2200	2000	—	1800
ZrO ₂	1600	1600	2200	2200	—	2000	1900
ThO ₂	2000	2200	1900	—	2200	2200	2100

и цинк, легко восстанавливаются и превращаются в металлы или низшие оксиды, имеющие невысокие температуры плавления. Напротив, тугоплавкие оксиды ниобия, марганца, ванадия и урана становятся неустойчивыми при нагреве в окислительной среде, превращаясь в оксиды более высокой валентности, имеющие более низкую температуру плавления. При нагреве оксида хрома до 2000°С начинается его активное испарение, тогда как оксиды бериллия, магния, циркония и тория остаются устойчивыми до высоких температур. Температура, при которой эти материалы становятся неустойчивыми и взаимодействуют при нагревании в вакууме с другими материалами, очень высока (табл. 10.5) [5].

Во время нагрева диоксида циркония при температуре около 1200°С протекает эндотермическая реакция, сопровождающаяся усадкой из-за структурных превращений (рис. 106) [5, 6]. При отжиге диоксида циркония с добавками оксида кальция или оксида магния эти превращения можно подавить, и такой диоксид циркония называется стабилизированным. Покрытия из стабилизированного диоксида циркония обладают

большой стойкостью к тепловым ударам и реже отделяются от основы, чем покрытия из нестабилизированного ZrO₂.

Карбиды. Температура плавления карбидов металлов значительно выше температур плавления самих металлов. Температуры, при которых происходит размягчение карбидов, превышают 3000°С. При нагреве в окислительной атмосфере некоторые карбиды могут разрушаться, однако большинство из них обладает в этих условиях лучшей жаростойкостью по сравнению с жаростойкими металлами, а значительная часть карбидов имеет большую стойкость к окислению, чем углерод и графит. Эта особенность карбидов и достаточный уровень механических

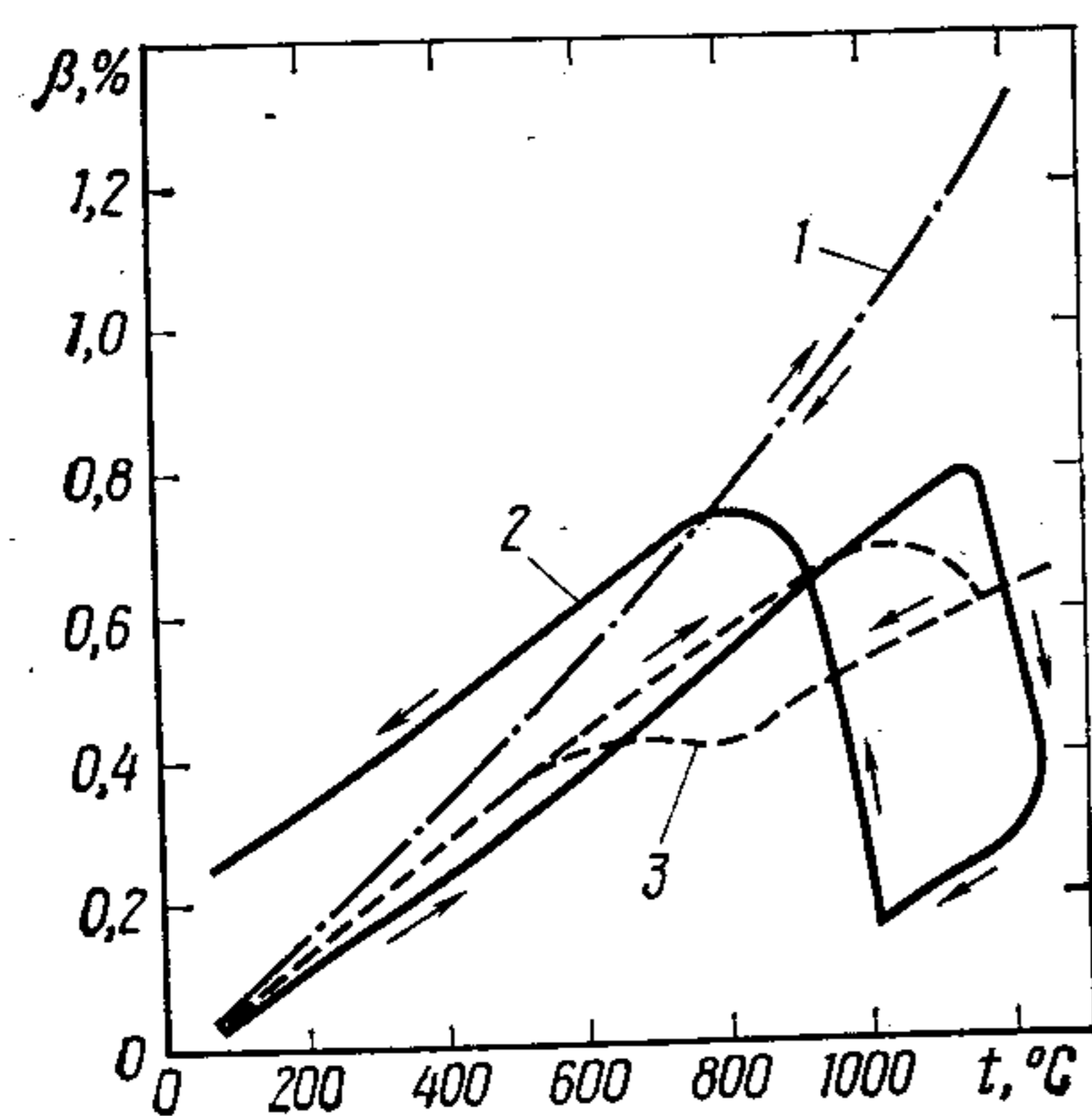


Рис. 106. Относительное линейное расширение диоксида циркония:

1 — с кубической кристаллической решеткой (стабилизированного); 2 — с ромбоэдрической кристаллической решеткой (нестабильного); 3 — метастабильного

свойств при высокой температуре предполагает их использование в качестве жаростойкого покрытия.

Особенно высокой жаростойкостью обладают карбиды кремния и титана. Почти все карбиды имеют высокие теплопроводность и электропроводность, а карбиды кремния, титана и вольфрама, обладая особо высокой твердостью, находят широкое применение для изготовления режущих и шлифовальных инструментов, а также для напыления с целью повышения износостойкости. Для напыления в основном применяют карбиды вольфрама, хрома, титана, циркония и тантала. Наиболее широкое применение получил карбид вольфрама. Как напыляемые материалы, карбиды нередко применяют в смеси со связующим, в качестве которого для карбида вольфрама используют кобальт (12—17%), а для карбида хрома — сплавы никеля (15—25%).

ТЕХНОЛОГИЯ НАПЫЛЕНИЯ

По типу источника тепловой энергии, которая используется для расплавления напыляемого материала, напыление подразделяют на газопламенное и электрическое. При газопламенном напылении нагрев напыляемого материала осуществляют теплотой сгорания смеси горючего газа с кислородом, а при электрическом — теплотой электрической дуги. Повышение интереса к технологии напыления сопровождалось совершенствованием оборудования и улучшением напыляемых материалов, что создало предпосылку для постепенного повышения свойств напыленных покрытий.

11.1. ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ

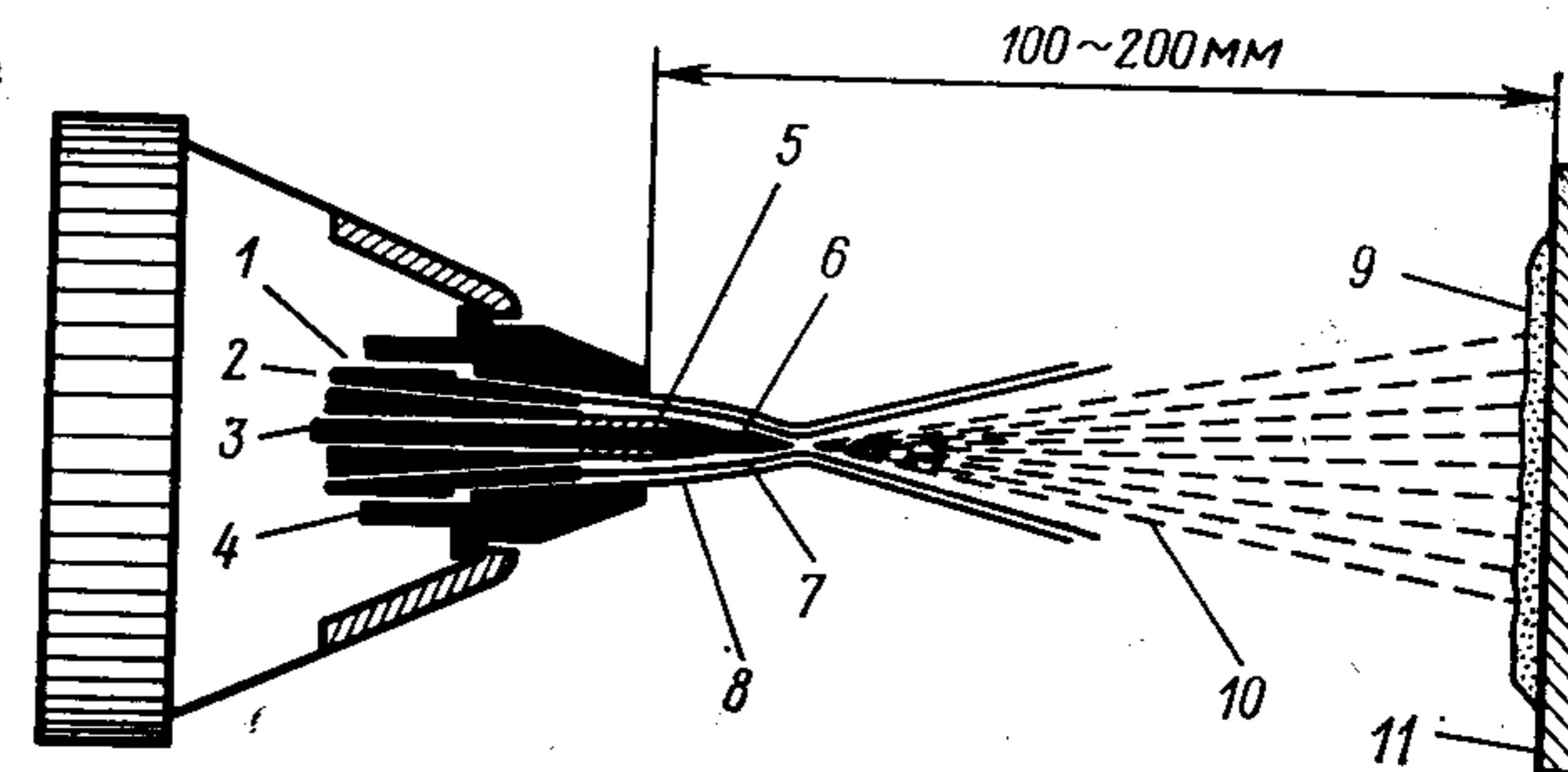
Газопламенное напыление в зависимости от состояния напыляемого материала может быть трех типов: напыление проволокой, прутком и порошком.

На рис. 107 показан принцип газопламенного напыления проволокой, аналогичного напылению прутком. В обоих случаях напыляемый материал, имеющий форму прутка или проволоки, подают через центральное отверстие горелки и расплавляют пламенем горючей смеси. Расплавленные частицы металла подхватываются струей сжатого воздуха и в мелкораспыленном виде направляются на поверхность изделия. Проволока подается с заданной скоростью роликами, приводимыми в движение встроенной в горелку воздушной турбиной, работающей на сжатом воздухе, используемом при напылении, или электродвигателем через редуктор. В случае подачи проволоки воздушной турбиной невозможно точно регулировать скорость подачи проволоки и поддерживать ее постоянно на одном уровне. В этом случае горелка более компактна и имеет меньшую массу, что позволяет осуществлять ручное напыление.

Горелка (пистолет) с приводом от электродвигателя позволяет более точно регулировать подачу проволоки и поддерживать ее постоянную скорость. Однако такие горелки имеют большую массу, поэтому их устанавливают в механизированных установках для напыления. Для напыления обычно используют проволоку диаметром не более 3 мм, однако при напылении легкоплавкими металлами (алюминий, цинк и т. п.) в интересах повышения произво-

Рис. 107. Газопламенное напыление проволокой:

1 — сжатый воздух; 2 — ацетилено-кислородная или пропано-кислородная горючая смесь; 3 — проволока; 4 — насадок; 5 — ядро ацетилено-кислородного пламени; 6 — оплавливающийся конец проволоки; 7 — факел пламени; 8 — воздушный поток; 9 — покрытие; 10 — поток частиц напыляемого материала; 11 — основной материал

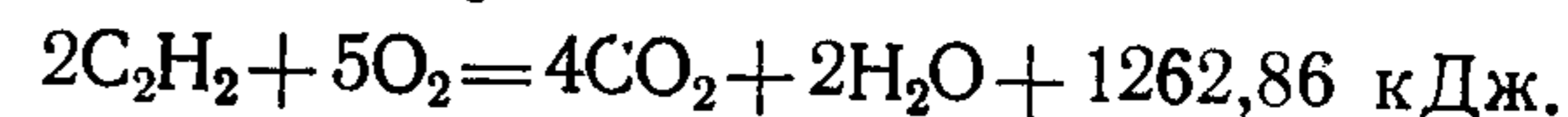


дительности процесса допускается использование проволоки диаметром 5—7 мм.

При напылении порошком последний поступает в горелку сверху из бункера через отверстие, разгоняется потоком транспортирующего газа (смесь кислорода с горючим газом) и на выходе из сопла попадает в пламя, где происходит его нагрев. Увлекаемые струей горячего газа частицы порошка попадают на напыляемую поверхность. В порошковых горелках, как и в проволоочных, подача напыляемого материала в пламя и разгон образующихся расплавленных частиц могут осуществляться струей сжатого воздуха.

Схема установки для напыления проволокой показана на рис. 108. В этой установке редуктор снижает давление сжатого воздуха, поступающего из воздушной емкости, а осушитель удаляет из воздуха влагу и масло. В качестве горючего газа в большинстве случаев используют ацетилен, можно также применять пропан и водород.

При полном сгорании ацетилена в среде кислорода протекает следующая химическая реакция:



Это значит, что для полного сгорания на одну часть по массе ацетилена необходимо 2,5 части по массе кислорода, однако на практике для напыления используют смесь при соотношении в смеси кислорода и ацетилена, равном 1,1. При сгорании смеси такого состава образуется нейтральное пламя, поскольку во время горения в него поступает дополнительный кислород из окружающего воздуха. На начальном участке факела, который образуется непосредственно у выхода из сопла, газообразные продукты имеют вос-

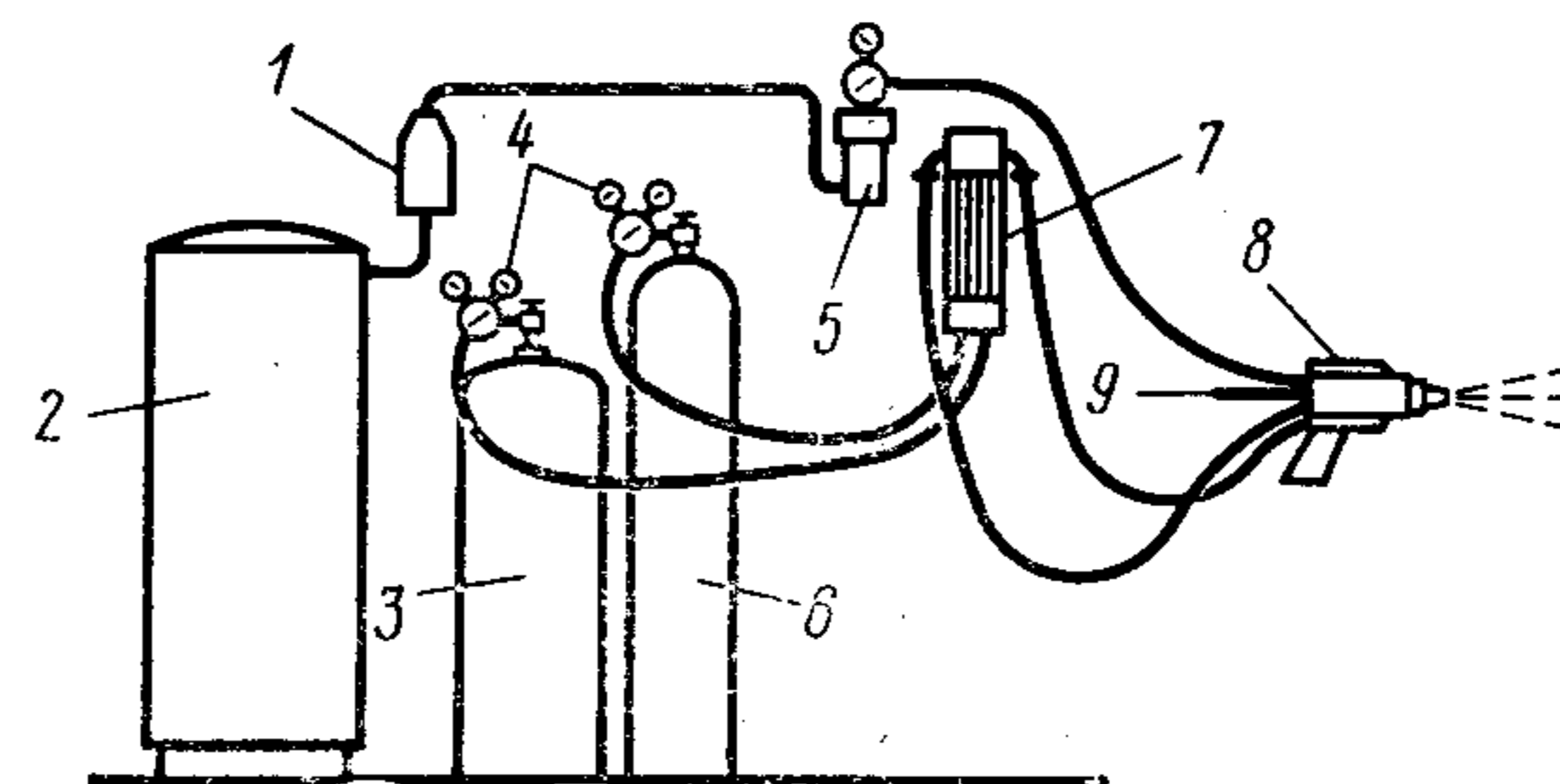


Рис. 108. Схема оборудования для напыления проволокой (прутком):

1 — осушитель воздуха; 2 — ресивер со сжатым воздухом; 3 — баллон с горючим газом; 4 — редукторы; 5 — фильтр; 6 — баллон с кислородом; 7 — ротаметры; 8 — напылительная горелка; 9 — канал для подачи проволоки (прутка)

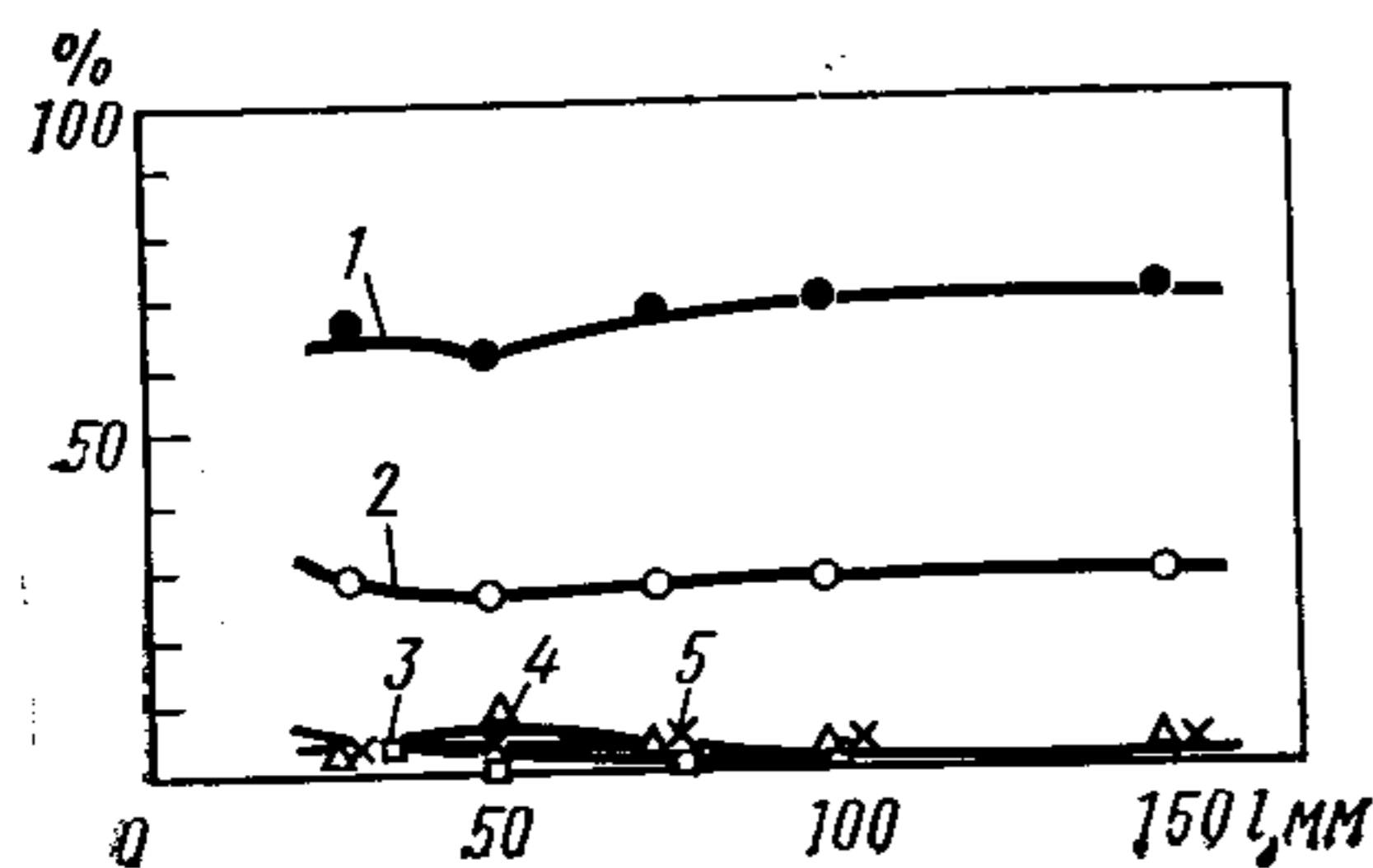


Рис. 109. Содержание газообразных компонентов (%) в пламени горючей смеси при газопламенном напылении проволокой в зависимости от расстояния l от среза сопла горелки; расход газов: кислорода 25 л/мин, ацетилена 12 л/мин; давление сжатого воздуха 0,34 МПа:

1 — азот; 2 — кислород; 3 — оксид углерода; 4 — диоксид углерода; 5 — водяной пар

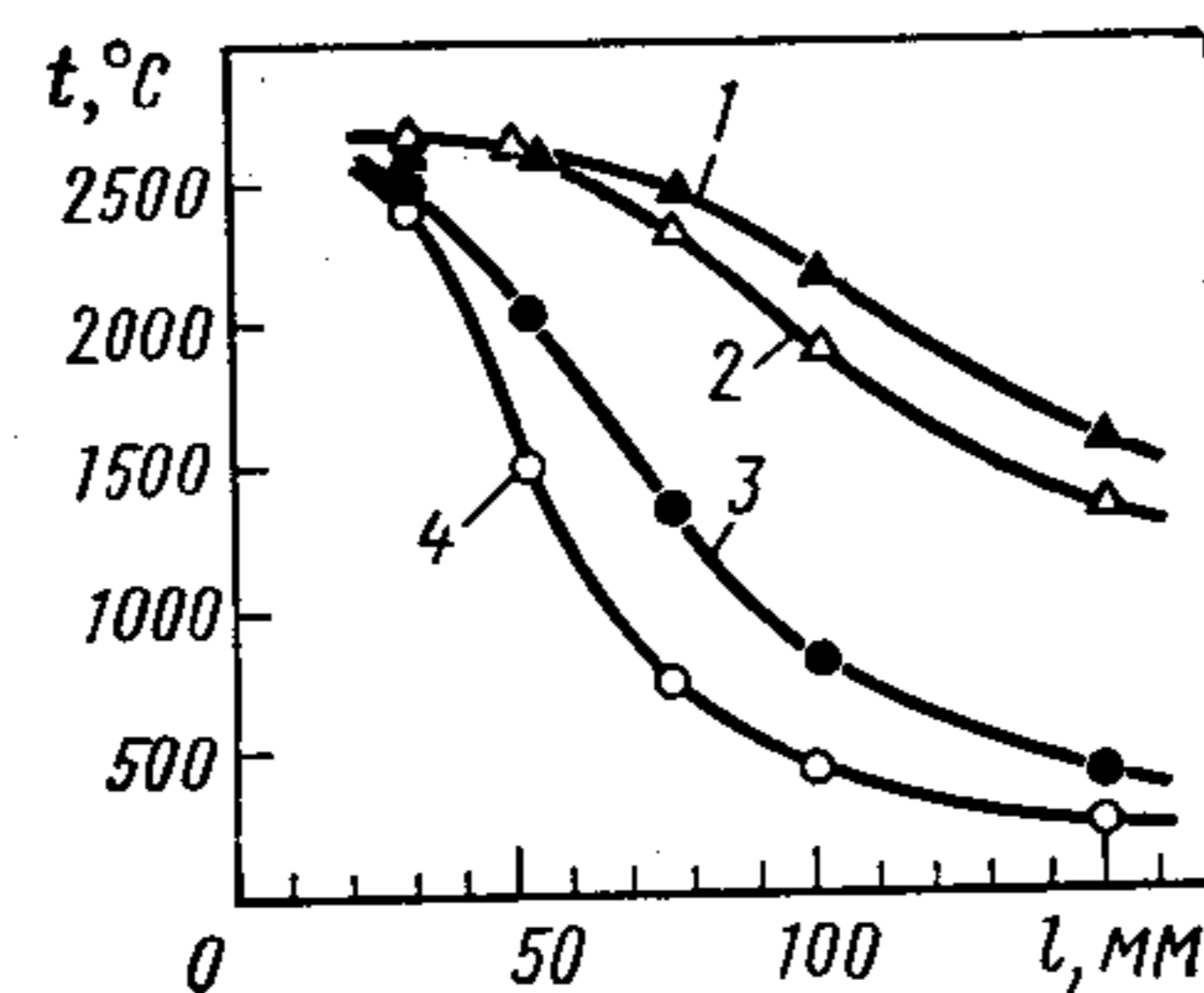


Рис. 110. Изменение температуры факела пламени в зависимости от расстояния l от среза сопла газопламенной горелки и режима ее работы (давление сжатого воздуха 34 МПа):

1 — напыление порошком при расходе кислорода 12,5 и ацетилена 12,5 л/мин; 2 — то же, при расходе кислорода 16,5 и ацетилена 10 л/мин; 3 — напыление проволокой при расходе кислорода 18,5 и ацетилена 18,5 л/мин; 4 — то же, при расходе кислорода 25 и ацетилена 12 л/мин

становительный характер, а в середине пламени в связи с прониканием туда кислорода окружающего воздуха происходит полное сгорание ацетилена. При движении напыляемых частиц в факеле они непрерывно нагреваются. Вместе с тем при напылении проволокой с использованием струи сжатого воздуха из-за поступления большого его количества в пламя последнее в большей своей части имеет окислительные свойства.

На рис. 109 показано содержание газообразных компонентов в факеле в зависимости от расстояния от среза сопла горелки по оси пламени при газопламенном напылении проволокой [1]. На практике частицы напыляемого вещества двигаются не только вдоль осевой линии, но и существенно отклоняются от нее. В периферийных зонах струи, отдаленных от осевой линии, газ имеет иной состав, однако общие тенденции изменения состава газа при удалении от оси сопла остаются такими же, как и вдоль осевой линии.

При газопламенном способе напыление осуществляется в основном теми материалами, температура плавления которых ниже температуры пламени.

В табл. 11.1 приведена температура пламени для горючих смесей разного состава [2], а на рис. 110 показаны кривые распределения температуры пламени в направлении удаления от среза сопла горелки по осевой линии при напылении порошком и проволокой [1].

При газопламенном напылении порошком на расстоянии 60—70 мм от сопла температура пламени превышает 2500°C; по мере дальнейшего увеличения расстояния она постепенно снижается: на расстоянии 100 мм температура составляет 1900°C, на расстоянии

150 мм — 1400°C. При напылении проволокой быстрое снижение температуры пламени начинается от самого среза сопла горелки и нарастает по мере увеличения расстояния: на расстоянии 50 мм температура пламени составляет 1500°C, на расстоянии 100 и 150 мм — 500 и 200°C соответственно. Это связано с охлаждающим действием на пламя струи сжатого воздуха.

После напыления иногда проводят оплавление покрытия, которому, в частности, подвергают покрытия, напыленные самофлюсующимися сплавами на никелевой и кобальтовой основе с добавлением в них бора и кремния. Оплавление обеспечивает получение плотного покрытия, практически без пористости.

Технология газопламенного напыления довольно проста, а стоимость оборудования и затраты на эксплуатацию низкие. В связи с этим данный способ нашел наиболее широкое применение в практике.

11.1. Температура пламени для горючих смесей разного состава

Состав смеси	Температура, °C
Кислород — ацетилен	3100
Кислород — бутан	3100
Кислород — пропан	2760
Кислород — водород	2700
Кислород — светильный газ	2000
Воздух — ацетилен	2325
Воздух — водород	2055
Воздух — светильный газ	1530

11.2. ДЕТОНАЦИОННОЕ НАПЫЛЕНИЕ

4

Схема детонационного напыления показана на рис. 111 [3]. В камеру водоохлаждаемого ствола установки диаметром 25,4 мм подается кислород и ацетилен в строго определенных количествах; ствол направляется на обрабатываемую деталь (а). Затем через специальное отверстие в камере азотом подается порошок напыляемого материала, например карбид вольфрама с добавлением небольшого количества металла, оксид алюминия и т. п. (б). Газовую смесь, в которой во взвешенном состоянии находится напыляемый порошок, поджигают электрической искрой (в). В результате взрыва смеси происходит выделение теплоты и образуется ударная волна, которая разогревает и разгоняет частицы порошка в направлении к поверхности изделия (г).

Азот и горючий газ выходят из ствола установки сразу же после взрыва, затем ствол продувается азотом для удаления продук-

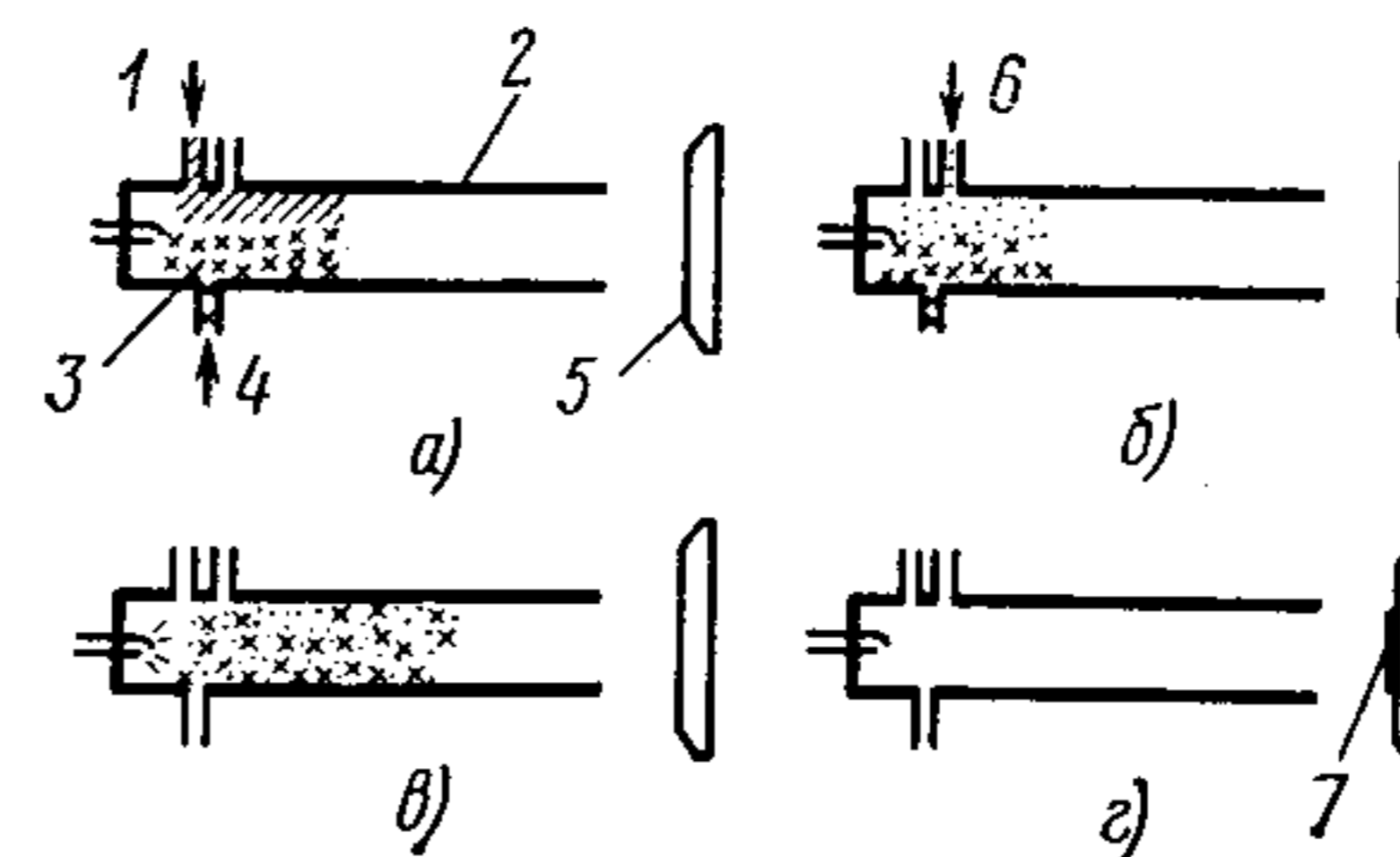


Рис. 111. Схема детонационного напыления:

1 — сопло для подачи кислорода; 2 — водоохлаждаемый ствол; 3 — камера сгорания; 4 — сопло для подачи ацетилена; 5 — основной материал (подложка); 6 — сопло для подачи в камеру сгорания карбида вольфрама с азотом; 7 — покрытие

тов горения. Процесс отрегулирован таким образом, что точно повторяется с частотой 3—4 цикла в секунду. За один цикл напыления получают покрытие толщиной ~ 6 мкм. Напыление осуществляют до получения покрытия заданной толщины (0,25—0,3 мм).

Во время взрыва порошковый материал приобретает большую кинетическую энергию, так что скорость частиц на расстоянии 75 мм от среза ствола установки составляет ~ 820 м/с. При размещении поверхности основного материала на указанном расстоянии порошок в момент столкновения с поверхностью разогревается до температуры 4000°C . Высокая скорость движения частиц и их разогрев при детонационном напылении обеспечивают получение покрытия высокой плотности и прочности сцепления с основой. При этом температура основного материала остается низкой, исключая его деформацию или иное физическое изменение, что позволяет использовать этот способ напыления для прецизионных деталей.

Вместе с тем детонационному напылению свойственны недостатки, связанные, в частности, с возможностью нанесения покрытия только на те материалы, в которых не возникает остаточная деформация при действии взрывной волны. Из-за большого шума (до 140 дБ) оборудование для детонационного напыления устанавливают в камере с двойными стенами, а наблюдение за процессом осуществляют через смотровое окно. К недостаткам этого способа относится также относительно высокая стоимость оборудования.

11.3. ДУГОВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

Принципиальная схема дуговой металлизации показана на рис. 112 [4]. Через два канала в горелке непрерывно подают две проволоки (диаметром 1,5—3,2 мм), между концами которых возбуждается дуга и происходит расплавление проволоки. Расплавленный металл подхватывается струей сжатого воздуха, истекающего из центрального сопла электрометаллизатора, и в мелкозрасплавленном виде переносится на поверхность основного материала. Распыление и транспортирование расплавленного металла осуществляются обычно сжатым воздухом, хотя при напылении коррозионно-стойкую сталью 308 и алюминиевыми сплавами используют азот. При дуговом напылении на постоянном токе процесс протекает стабильно, обеспечивая получение слоя покрытия с мелкозернистой структурой при высокой производительности процесса. Поэтому в настоящее время для дугового напыления применяют источники постоянного электрического тока со стабилизатором напряжения или источники со слегка возрастающей характеристикой.

На рис. 113 приведена схема расплавления электродной проволоки при напылении и переноса частиц расплавленного металла воздушной струей [5]. Температура дуги зависит от вида транспортирующего газа, состава электродной проволоки, режимов напыления и других параметров. При использовании металлических

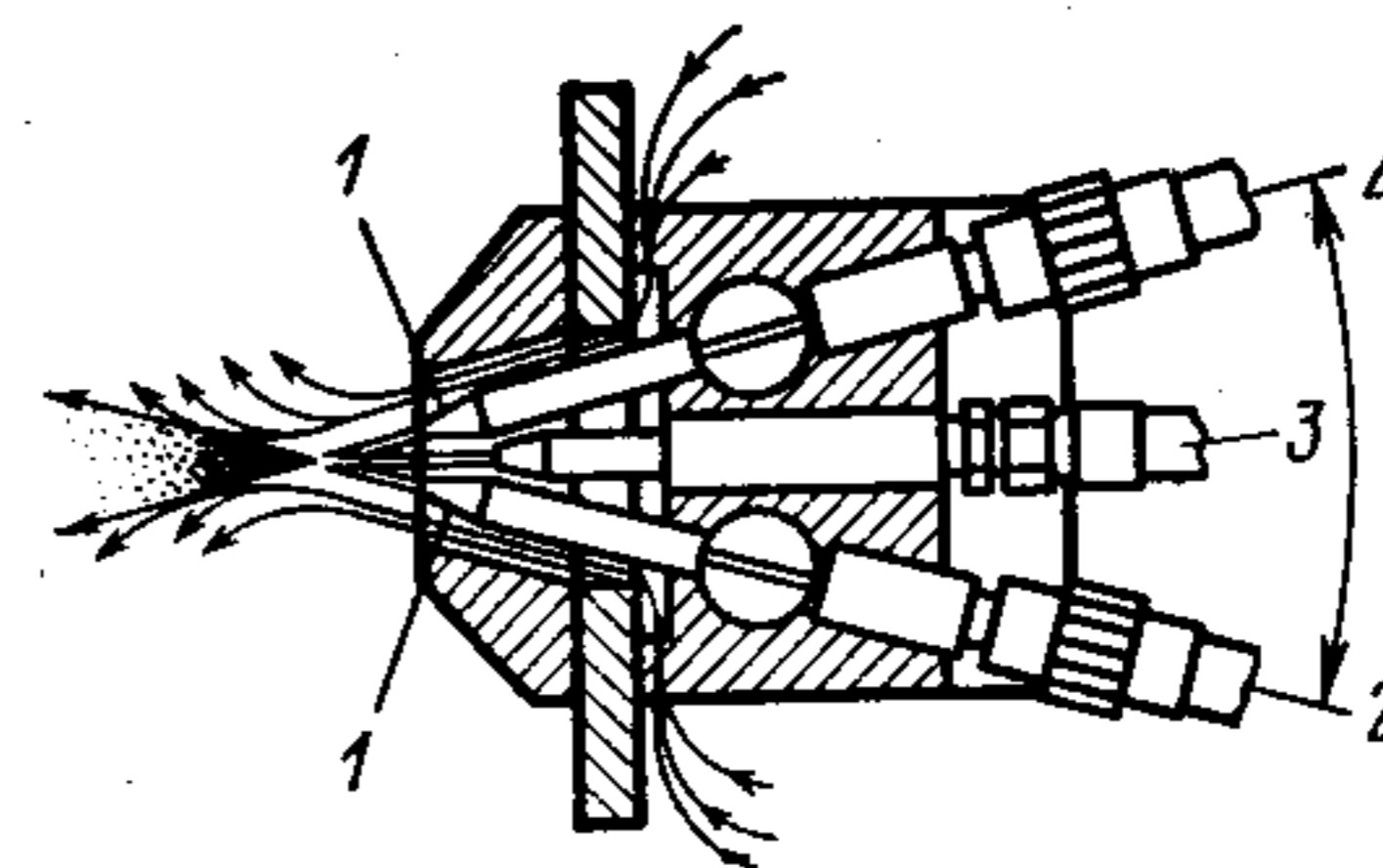


Рис. 112. Схема дугового напыления:
1 — насадок; 2 — место ввода напыляемого материала (проволоки); 3 — место подачи сжатого воздуха

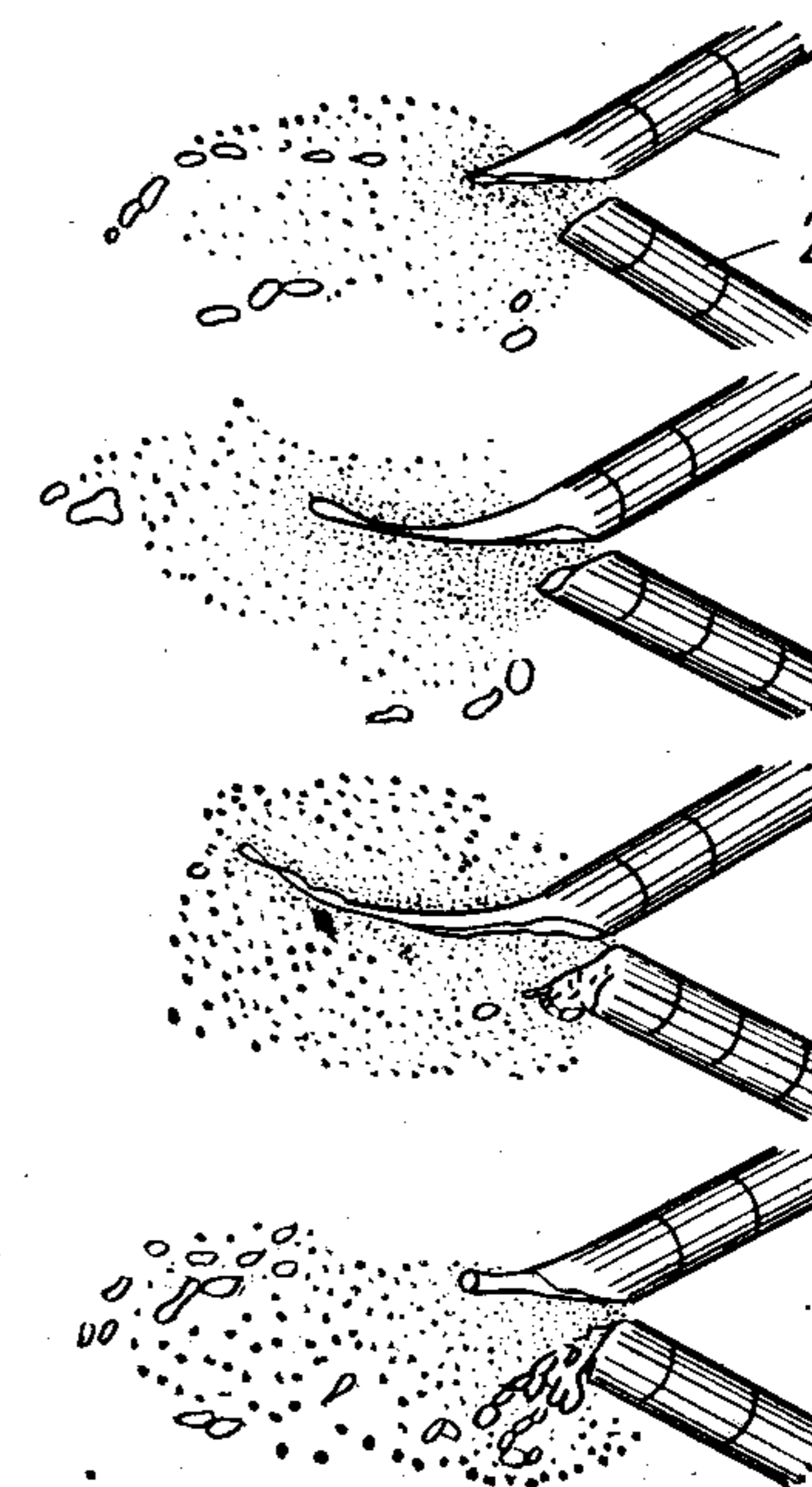


Рис. 113. Процесс расплавления напыляемого материала в электрометаллизаторе:
1 — анод; 2 — катод

электродов и силе тока дуги 280 А достигается температура примерно 6100 ± 200 К [6]. Во время дуговой металлизации, протекающей при такой температуре, легче образуются капли напыляемого материала.

Дуговая металлизация обладает следующими преимуществами. Применение мощных электрометаллизационных установок позволяет значительно повысить производительность процесса и сократить затраты времени. Например, при силе тока 750 А можно напылять стальное покрытие с производительностью 36 кг/ч, а при силе тока 500 А — цинковое покрытие с производительностью 1,2 кг/мин, что в несколько раз превышает производительность газопламенного напыления. По сравнению с газопламенным напылением электрометаллизация позволяет получать более прочные покрытия, которые лучше соединяются с основой. При использовании в качестве электродов проволок из двух различных металлов можно получить покрытие из их сплава. Такого рода сплавы называют псевдосплавами. Эксплуатационные расходы при электрометаллизации небольшие. При напылении покрытия распылением двух электродов из разнородных материалов желательно применять такие электрометаллизаторы, которые позволяют отдельно регулировать скорости подачи каждого электрода.

К числу недостатков дугового напыления относится опасность перегрева и окисления напыляемого материала при малых скоростях подачи распыляемой проволоки. Кроме того, большое количество теплоты, выделяющейся при горении дуги, приводит к значитель-

ному выгоранию легирующих элементов, входящих в напыляемый сплав (например, содержание углерода в материале покрытия снижается на 40—60%, а кремния и марганца — на 10—15%).

11.4. ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ

На рис. 114 схематически показан механизм образования плазмы. При температуре около абсолютного нуля состоящие из двух атомов молекулы газа (водорода, азота и т. п.), имеющие вид гантели (а), совершают только параллельное перемещение по осям x , y и z , при температуре 10 К возникают также вращательные движения. При дальнейшем повышении температуры, например до 1000 К, возникают колебания атомов (б). Интенсивные столкновения молекул вызывают их диссоциацию (распад на атомы) (в). Температура перехода в атомарное состояние зависит в основном от рода газа и его парциального давления. Для кислорода она составляет 3000 К, для азота ~ 4500 К.

Необходимую для распада молекул энергию диссоциации выражают обычно в электрон-вольтах (эВ) в расчете на одну молекулу. В табл. 11.2 [7] приведены данные по энергии диссоциации молекул для различных газов.

При повышении температуры развивается процесс ионизации газов, выражающейся в потере атомами электронов, как показано на рис. 114 (г). Достаточно полная ионизация кислорода при атмосферном давлении наступает при 10 000 К.

Энергию ионизации выражают в электрон-вольтах в расчете на один атом. В табл. 11.3 [8] приведены данные по энергии ионизации для различных элементов.

Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизирована, а концентрация электронов и отрицательных ионов равна

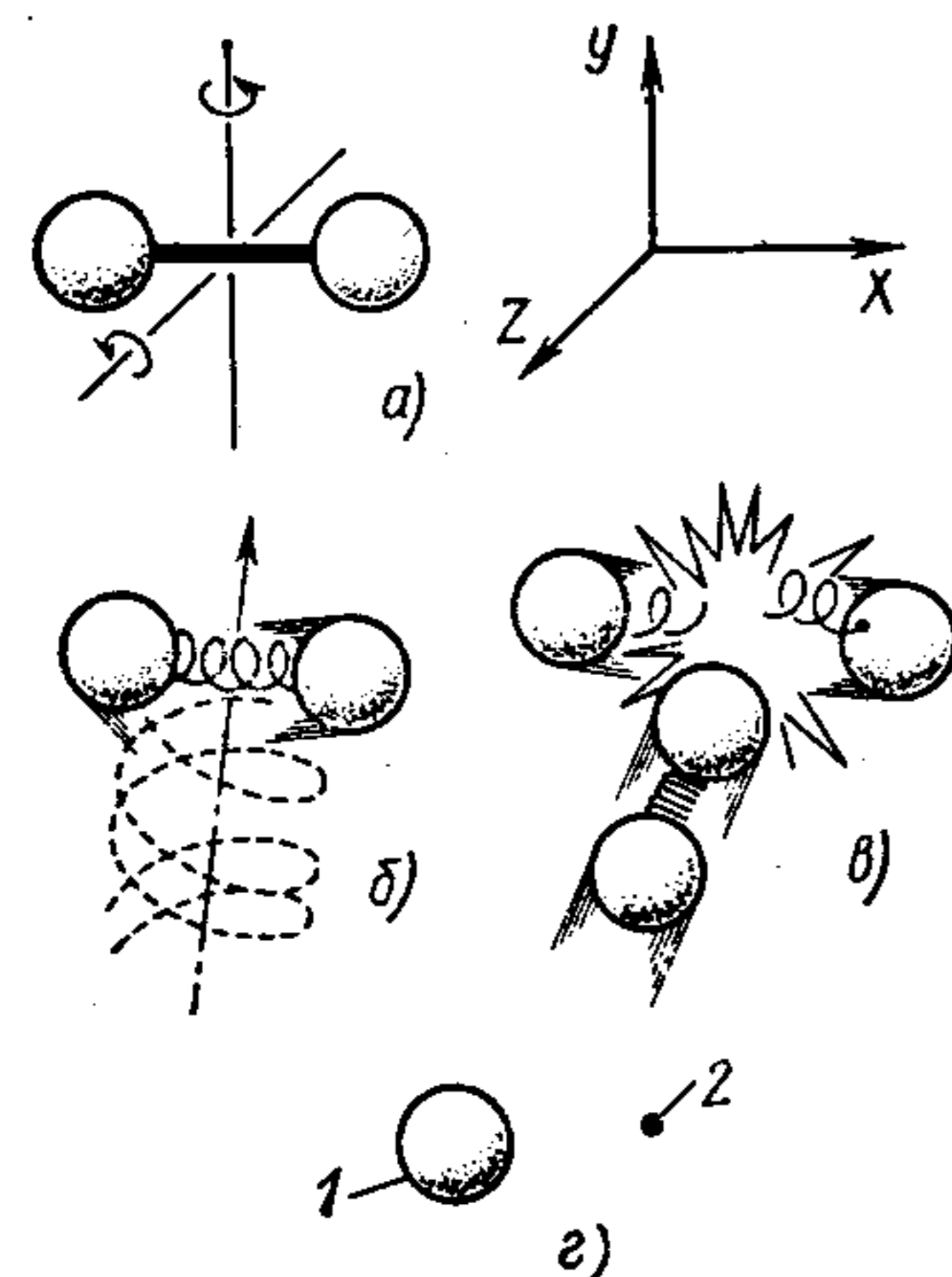


Рис. 114. Схема механизма образования плазмы:

1 — положительный ион; 2 — электрон

11.2. Энергия диссоциации молекул различных газов, эВ *

Молекулы	Энергия распада
Водород (H ₂)	4,477
Азот (N ₂)	9,76
Кислород (O ₂)	5,08
Оксид углерода (CO)	11,11
Оксид азота (NO)	6,48
Гидроксил (OH)	4,37
Диоксид углерода (CO ₂)	16,56

* 1 эВ = 1,602 · 10⁻¹⁹ Дж.

11.3. Энергия ионизации для различных элементов, эВ

Элементы	Энергия ионизации ¹		Элементы	Энергия ионизации ¹	
	I	II		I	II
Алюминий	5,984	18,823	Азот	14,54	29,605
Аргон	15,755	27,62	Кислород	13,614	35,146
Кальций	6,111	11,87	Платина	(8,9)	18,5
Углерод	11,264	24,376	Калий	4,339	31,81
Церий	3,893	25,1	Кремний	8,149	16,34
Гелий	24,580	54,400	Серебро	7,574	21,48
Водород	13,595	—	Натрий	5,138	47,29
Железо	7,90	16,18	Стронций	5,692	11,027
Криптон	13,99	24,56	Титан	6,83	13,63
Магний	7,644	15,03	Вольфрам	7,94	—
Ртуть	10,44	18,8	Ксенон	12,13	21,2
Ниобий	6,77	14			

¹ В графе I приведены значения энергии, необходимой для отрыва одного электрона, а в графе II — то же, для отрыва двух электронов.

концентрации положительных ионов, называется плазмой. Плазма, которая в целом является квазинейтральной, не имеет электрического заряда. Отличительная черта плазмы — высокая электропроводимость. Обычная электрическая дуга также находится в плазменном состоянии.

На рис. 115 показана зависимость энтальпии от температуры для аргона, водорода и азота. При ионизации и диссоциации азота и водорода, а также при ионизации аргона происходит поглощение энергии. При охлаждении диссоциированного и ионизированного высокотемпературного газа происходит обратный процесс: соединение электронов с ионами и атомов в молекулы. При этом происходит выделение энергии рекомбинации, равной энергии диссоциации молекул и энергии ионизации атомов. При одной и той же температуре двухатомные газы обладают более высокой энтальпией, чем одноатомные.

Принцип напыления показан на рис. 116 [5]. Между катодом (из чистого вольфрама или с добавлением 2% тория) и медным водоохлаждаемым соплом, служащим анодом, возникает дуга, нагревающая поступающий в сопло горелки рабочий газ, который истекает из сопла в виде плазменной струи. В качестве рабочего газа используют аргон или азот, к которым иногда добавляют водород. Порошковый наплавочный материал подается в сопло струей транспортирующего

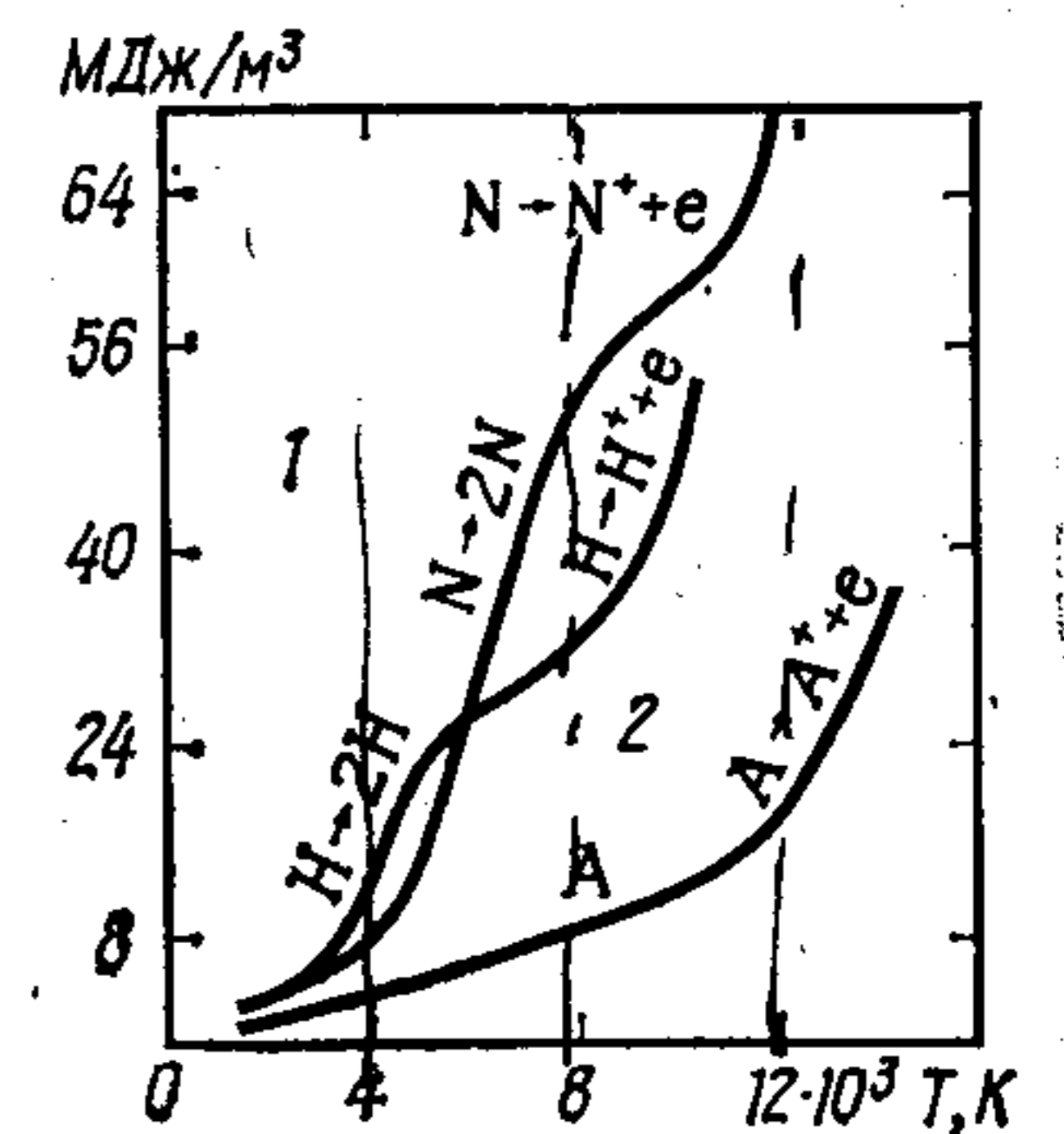


Рис. 115. Зависимость энтальпии (МДж/м³) от температуры для аргона, водорода и азота:

1 — область диссоциации; 2 — область ионизации

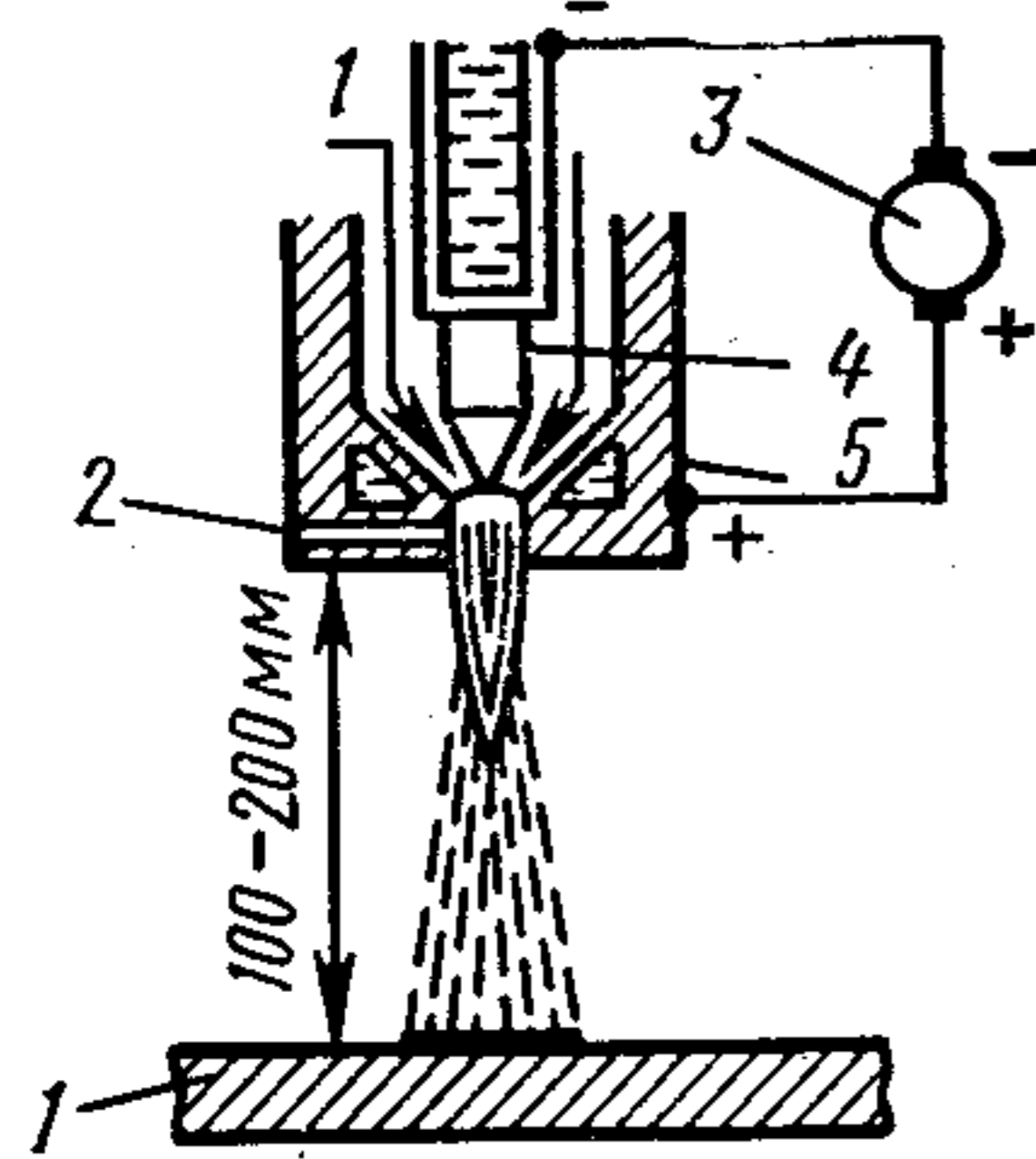


Рис. 116. Схема плазменного напыления:

1 — плазмообразующий газ; 2 — место ввода напыляемого материала; 3 — источник питания; 4 — катод; 5 — анод

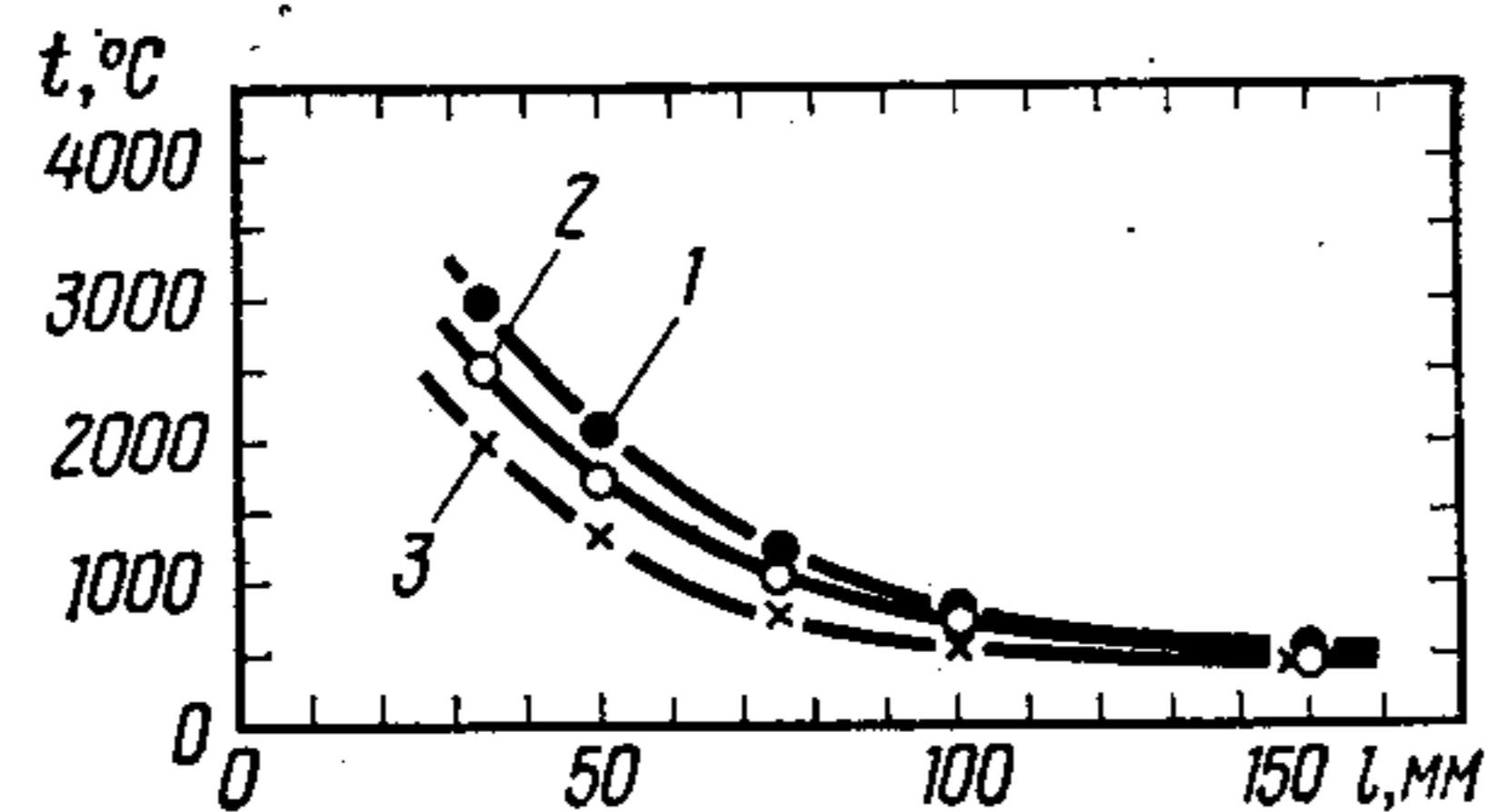


Рис. 117. Кривые распределения температуры в направлении удаления от среза сопла плазменного распылителя по оси плазменной струи (расход аргона в качестве рабочего газа — 30 л/мин) при силе тока дуги, А:

1 — 500; 2 — 455; 3 — 300

газа, нагревается плазмой и с ускорением переносится на поверхность основного материала для образования покрытия.

На рис. 117 показаны кривые распределения температуры в направлении удаления от выходного среза сопла плазматрона по оси плазменной струи в процессе плазменного напыления [9]. Если показанные на рисунке кривые довести до пересечения с осью ординат, то точка пересечения будет соответствовать средней температуре плазмы на выходе из сопла плазматрона. Эта температура находится в пределах от нескольких тысяч градусов до десяти тысяч и более градусов Кельвина.

КПД плазменной горелки составляет 50—70%, в среднем 60%. Это значит, что 50—70% общего потребления электрической энергии затрачивается на нагрев рабочего газа до средней температуры на выходе из сопла. Для рабочего газа данного вида при заданном его расходе среднюю температуру можно рассчитать по кривым изменения температуры факела в зависимости от расстояния от среза сопла плазматрона (рис. 117). При данной потребляемой мощности аргон имеет гораздо более высокую температуру, чем азот и водород. Высокая скорость истечения плазменной струи связана с резким расширением газа при повышении температуры, а следовательно, для газа, энергетическая кривая которого расположена на рис. 115 правее, характерна более высокая скорость плазменной струи. Это значит, что при данном уровне потребляемой мощности и данном расходе рабочего газа аргон обеспечивает более высокую скорость плазменной струи, чем азот и водород [10].

На рис. 118 представлены кривые распределения содержания воздуха в плазменной струе в зависимости от расстояния от среза сопла плазматрона по оси струи [9]. Интенсивная инжекция воздуха в струю плазменной горелки происходит при любой силе тока.

На расстоянии 50 мм от среза сопла количество воздуха в струе достигает 55—60%, а на расстоянии 100 мм — 90%.

Плазменное напыление обладает рядом важных преимуществ: высокая температура плазмы позволяет проводить напыление тугоплавких материалов; возможность регулирования температуры и скорости плазменной струи путем выбора формы и диаметра сопла и режима напыления расширяет диапазон напыляемых материалов (металлы, керамика и органические материалы); использование инертного газа в качестве рабочего газа открывает возможность напыления в камерах с атмосферой инертного газа. Покрытия, полученные методом плазменного напыления, обладают высокой плотностью и хорошим сцеплением с основой. Сравнительно низкая производительность процесса напыления, шум при работе и интенсивное ультрафиолетовое излучение — недостатки плазменного напыления. Кроме того, плазменный способ отличается высокой стоимостью оборудования и большими эксплуатационными затратами.

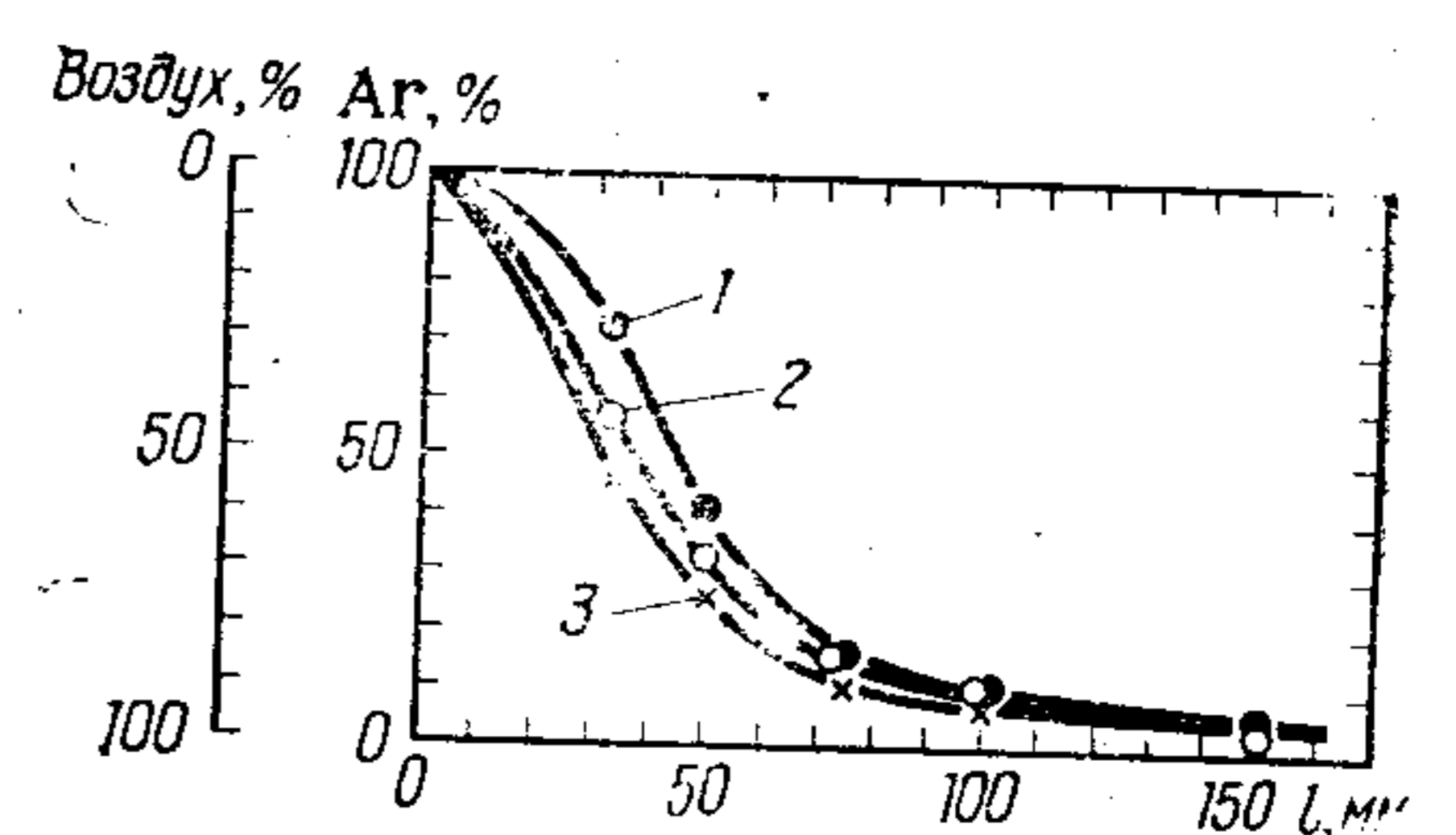


Рис. 118. Содержание воздуха (%) и аргона (%) в плазменной струе в зависимости от расстояния l от среза сопла плазменного распылителя по оси плазменной струи (расход рабочего газа 30 л/мин) при силе тока дуги, А:

1 — 500; 2 — 455; 3 — 300

11.5. ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИИ

Электроимпульсное нанесение покрытий основано на импульсном разряде конденсатора через проволоку напыляемого металла. При этом происходит взрывное плавление проволоки и осаждение расплавленных мелких частиц металла на поверхности изделия (рис. 119) [11].

Используемая для нанесения покрытий электроразрядная цепь представляет собой колебательный контур и характеризуется следующими данными: емкость конденсатора 100 мкФ, максимальное напряжение зарядного тока 30 кВ, собственная частота колебаний электроразрядной цепи 25 кГц. Для напыления используют металлическую, например вольфрамовую, проволоку диаметром 0,5—1 мм и длиной 20—150 мм. Режим напыления, выбираемый в зависимости от размера и формы изделия, согласно многочисленным

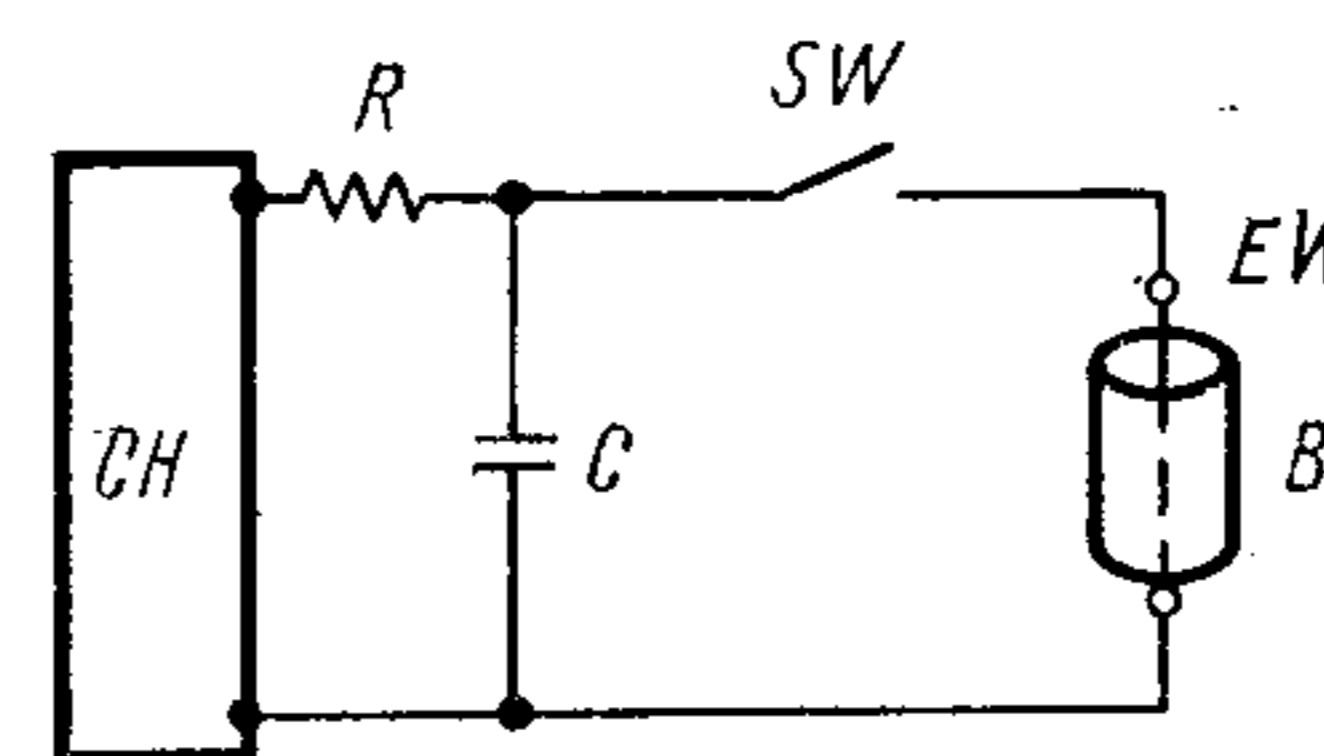


Рис. 119. Схема электроимпульсного напыления:

CH — источник питания для зарядки конденсатора; R — резистор; C — конденсатор; SW — выключатель; EW — металлическая проволока; B — основное изделие (цилиндрическое изделие)

экспериментальным данным рассчитывают по следующим уравнениям:

$$S = K_1 C U f^{2/3}; l = K_2 U f^{-2/3},$$

где S — площадь сечения металлической проволоки, мм²; l — длина металлической проволоки, мм; C — емкость конденсатора, Ф; U — напряжение зарядного тока, В; f — собственная частота колебаний электроразрядной цепи, Гц; K_1, K_2 — постоянные, определяемые материалом проволоки; $K_1 = (1 \div 3) 10^{-3}$; $K_2 = 4$.

Расстояние l от поверхности изделия до расплавляемого конца металлической проволоки определяется через ее диаметр d и выражается в следующем виде: $l = 30d$.

При разряде в оптимальном режиме около 40% массы проволоки превращается в газ, а остальные 60% — в капли расплавленного металла, сталкивающиеся с поверхностью основного материала. Образующиеся при взрывном разряде капли напыляемого металла можно разделить на две группы, к одной из которых относятся частицы размером несколько микрометров, а к другой — размером несколько сотых долей микрометра. Покрытие образуется за счет осаждения на поверхности частиц первой группы, тогда как частицы второй группы улетучиваются, превращаясь в аэрозоли. При недостаточном уровне энергии разряда металлическая проволока расплавляется без взрыва, а при чрезмерном уровне энергии — полностью переходит в газообразное состояние. И в том и в другом случае напыление невозможно.

Своеобразие электроимпульсного нанесения покрытий связано с особо малым размером частиц в мелкораспыленном состоянии напыляемого материала. При температуре распыления, которая, как считают, близка к точке кипения металла проволоки, все частицы в мелкораспыленном состоянии нагреваются равномерно. При столкновении с поверхностью основного материала скорость движения частиц достигает нескольких сотен метров в секунду. Движение частиц к основному материалу происходит за счет резкого расширения газа при взрыве и вытеснения воздуха из зоны взрыва, что почти полностью исключает окисление частиц, а следовательно, обеспечивает получение плотного покрытия с высокой прочностью сцепления с основным материалом. Недостаток электроимпульсного напыления состоит в том, что его применение ограничено электропроводными материалами. Кроме того, этот способ непригоден для получения покрытий большой толщины.

ГЛАВА 12 ТЕОРИЯ НАПЫЛЕНИЯ

Напыление состоит в образовании покрытия путем динамического осаждения на основном материале расплавленных или оплавленных капель или частиц напыляемого материала, образующихся при нагреве порошка, расплавлении проволоки или прутка различными источниками нагрева. Разнообразие способов напыления обеспечивает получение покрытий, значительно отличающихся по своим свойствам.

Для понимания процессов, происходящих при напылении, необходимо изучить особенности нагрева частиц напыляемого материала, их движение от сопла горелки до основы, условия соударения с ней, структуру переходной зоны между покрытием и основным материалом и связи между напыленными частицами. На эти процессы оказывают влияние следующие факторы: метод и технология напыления; размеры и форма частиц напыляемого порошка, диаметр проволоки или прутка; плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность напыляемых материалов, степень их расплавления (оплавления); химические реакции при высоких температурах между частицами напыляемых материалов и между частицами и окружающей средой, их химическая активность по отношению к материалу основы и др.

Определенное влияние на формирование покрытия оказывает также угол напыления, т. е. угол между направлением напыления

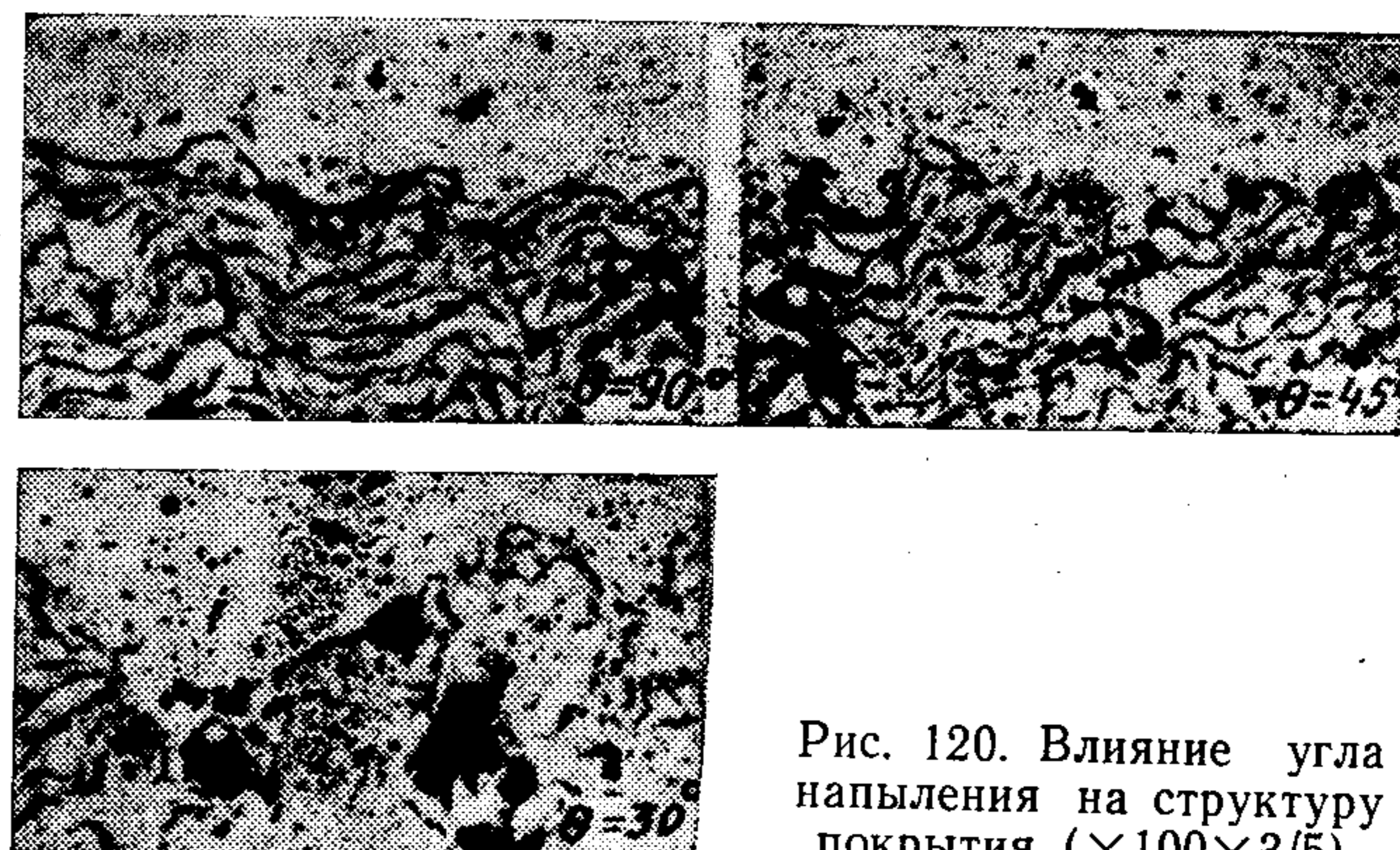


Рис. 120. Влияние угла напыления на структуру покрытия ($\times 100 \times 3/5$)

12.1. Влияние угла напыления на пористость покрытия, прочность сцепления и коэффициент использования напыляемого материала

Показатели	Угол напыления		
	90°	45°	30°
Пористость покрытия, %	12	14	17
Коэффициент использования напыляемого материала, %	80	74	69
Шероховатость поверхности	Мелкая	Средняя	Крупная
Прочность сцепления покрытия с основным материалом, МПа	16,67	13,729	12,748

и поверхностью основного материала [1]. На рис. 120 показана микроструктура покрытий из углеродистой стали, полученных газопламенным напылением проволокой при разных углах напыления: 90, 45 и 30°. В табл. 12.1 приведены данные, которые показывают, что по мере уменьшения угла напыления возрастает пористость покрытий, уменьшается коэффициент использования напыляемого материала, снижается уровень плотности покрытия и прочности сцепления покрытия с основным материалом.

Все рассматриваемые ниже результаты экспериментов относятся к напылению, осуществленному при вертикальном положении оси сопла горелки (при угле напыления 90°).

12.1. СКОРОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРА ЧАСТИЦ НАПЫЛЯЕМОГО МАТЕРИАЛА

При газопламенном напылении порошком, детонационном и плазменном напылении используют порошковые напыляемые материалы, а при газопламенном напылении проволокой или прутком, дуговом и электроимпульсном напылении напыляемые материалы имеют форму проволоки или прутка. Порошковые материалы при движении в высокотемпературном потоке газа, истекающего с большой скоростью из горелок, напыляются на поверхность основного материала без изменения формы, тогда как проволока или прутки сначала нагреваются и расплавляются, а затем в виде мелко-распыленных частиц напыляются высокоскоростным потоком газа на основной металл. При соударении напыляемых частиц с поверхностью основы частицы сцепляются с неровностями поверхности. Это возможно только при определенных скоростях и температуре капель и частиц.

Скорость частиц. При газопламенном напылении латуни, цинка и молибдена скорость частиц на расстоянии 100 мм от среза сопла горелки составляет 120, 140 и 65 м/с соответственно [2, 3].

На рис. 121 показаны кривые распределения скорости полета частиц в направлении от среза сопла горелки при газопламенном напылении порошком и прутком из алюминия [4]. При газопламенном напылении проволокой или прутком, когда перенос

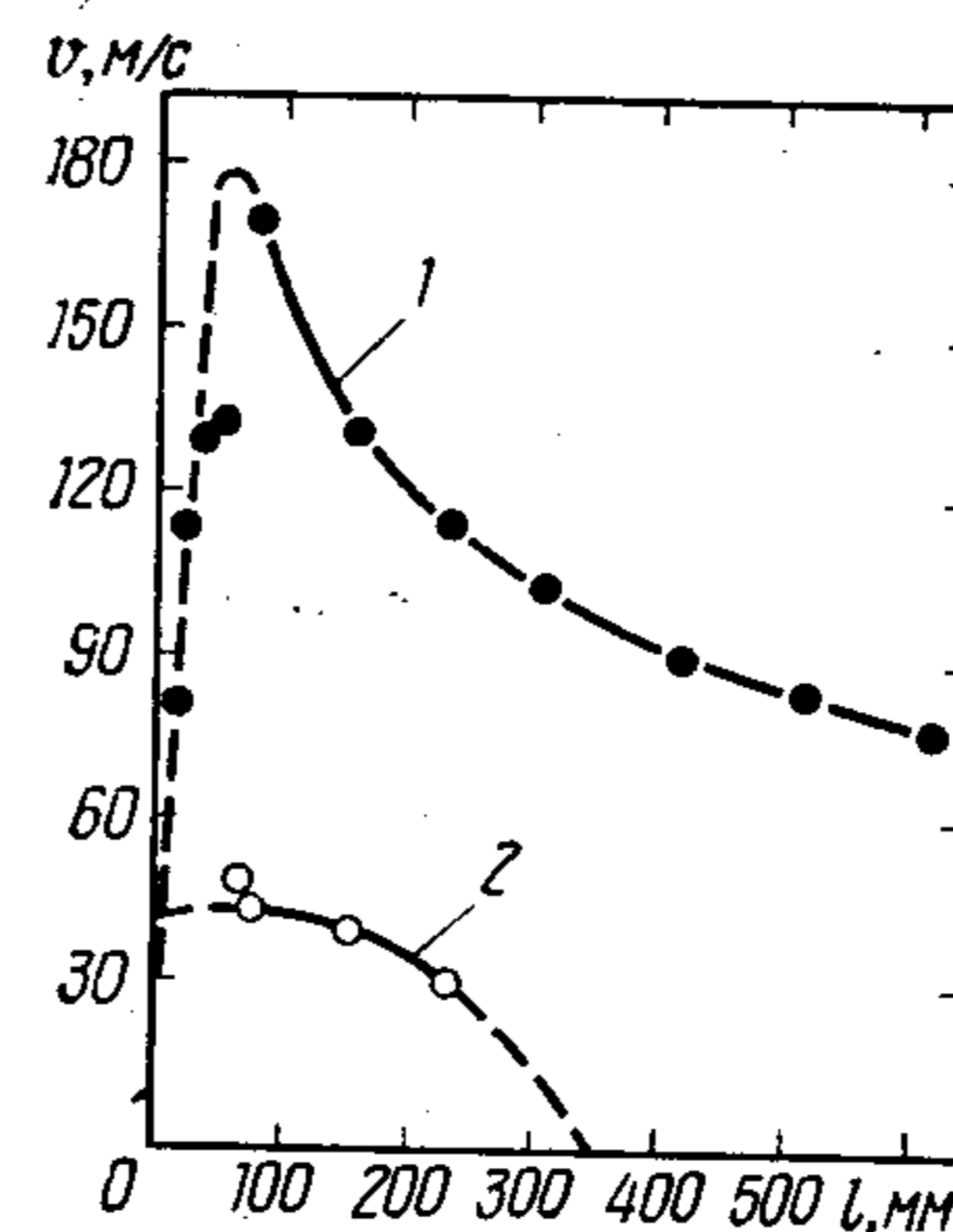


Рис. 121. Изменение скорости v полета частиц в зависимости от расстояния l от среза сопла:

1 — напыление прутком из алюминия; 2 — напыление порошком из оксида алюминия

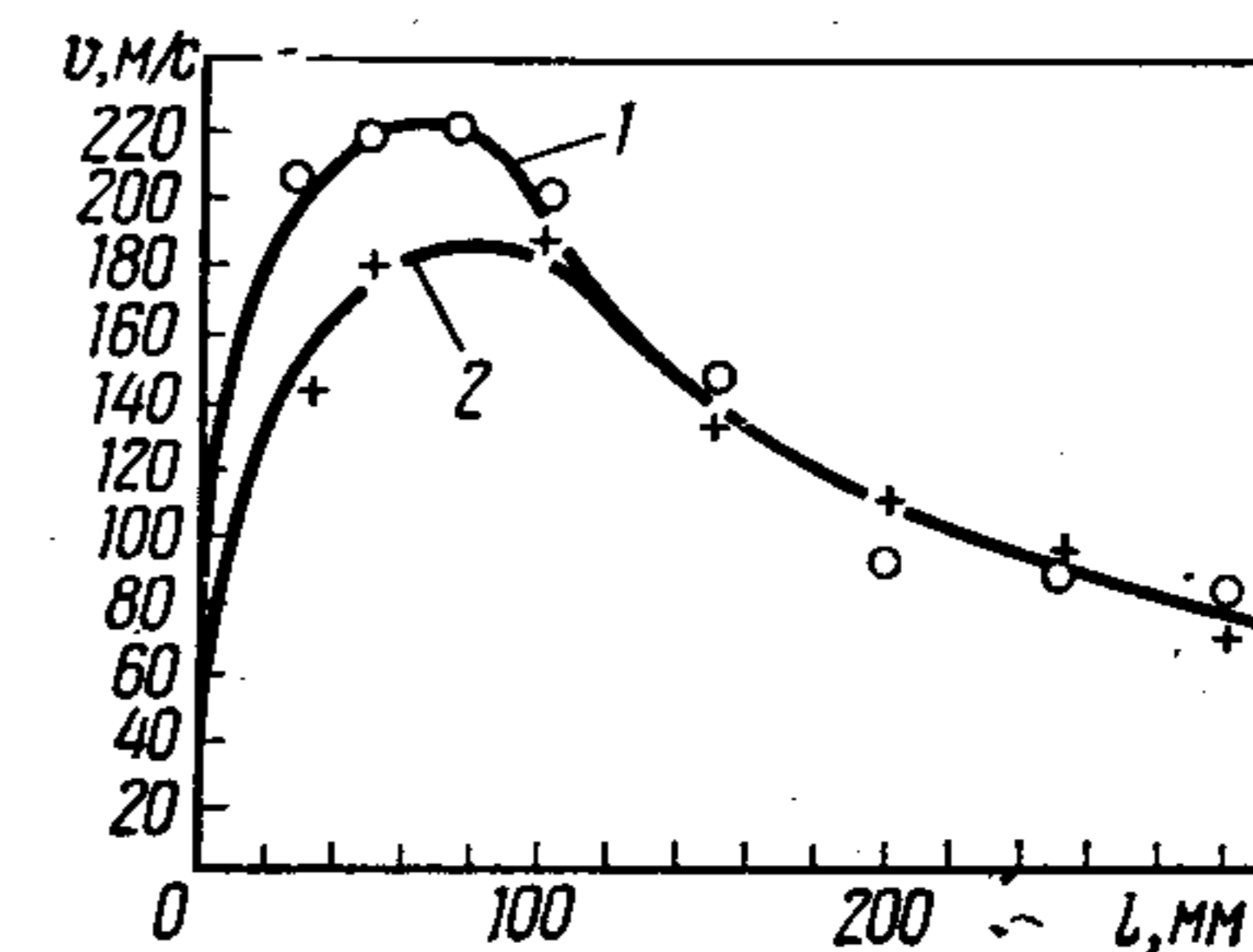


Рис. 122. Распределение скорости v полета частиц алюминия и стали при дуговом напылении:

1 — алюминий; 2 — сталь

частиц с оплаваемого конца проволоки на поверхность изделия производится струей сжатого воздуха, скорость их соударения с поверхностью имеет большее значение, чем при порошковом газопламенном напылении.

При газопламенном напылении частицы материала имеют разные размеры. Чем частицы мельче, тем они легче разгоняются газовой струей, а при снижении скорости струи частицы резко снижают свою скорость [5].

При детонационном напылении скорость газового потока на выходе из ствола установки достигает 4000 м/с, а скорость частиц напыляемого материала — 820 м/с [6].

На рис. 122 показаны кривые распределения скорости частиц в направлении удаления от среза сопла при дуговом напылении алюминием и сталью [7].

При плазменном напылении (мощность 15—20 кВт) порошком из оксида алюминия, молибдена и самофлюсующегося сплава на основе никеля скорость частиц на расстоянии 100 мм от сопла составляет 155, 100 и 70 м/с соответственно. В последнее время в связи с применением более мощного оборудования для плазменного напыления значительно возросла скорость плазменной струи и соответственно достигнуто радикальное повышение скорости частиц при напылении. В табл. 12.2 [8] показано, что при напылении в аргоне частицы напыляемого материала развивают гораздо более высокую скорость, чем при напылении в среде азота.

На рис. 123 приведены данные по скоростям частиц напыляемого материала и газов при взрыве, а также скорости распространения взрывной волны в воздухе при электроимпульсном напылении на оптимальном режиме с использованием вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм и длиной 50 мм [9]. Как видно из рисунка, частицы напыляемого материала сталкиваются с поверхностью

12.2. Скорость частиц напыляемых материалов при плазменном напылении

Напыляемые материалы	Рабочий газ	Расход рабочего газа, л/мин	Удельное количество теплоты рабочего газа, кДж/кг	Скорость частиц напыляемого материала, м/с
Сплав кобальта	Аргон	106	7700	400—500
Сплав карбида вольфрама с кобальтом (12%)	»	106	7700	400—500
Сплав карбида вольфрама с кобальтом (17%)	»	106	7700	330—400
Особо тонкий порошок сплава карбида вольфрама с кобальтом (17%)	»	137	5000	550—650
Сплав карбида вольфрама с никелем	Аргон и гелий	106	11 000	400—500
Оксид алюминия	Азот	47	35 000	150—200
Смесь оксида алюминия с диоксидом титана (2,5%)	»	47	35 000	150—200
Смесь оксида алюминия с диоксидом титана (10%)	»	71	24 500	150—200

основного материала со скоростью несколько сотен метров в секунду.

Температура напыляемых частиц. При напылении прутком или проволокой частицы неизбежно нагреваются до плавления. Для газоплазменного напыления цинком, алюминием, медью, никелем, железом и молибденом с использованием наплавочных материалов в виде проволоки рассчитана средняя температура частиц при их столкновении с поверхностью основного материала без учета влияния кинетической энергии частиц на их температуру при столкновении. Расчеты показали, что к моменту столкновения температура частиц достигает температуры кристаллизации [10].

При дуговой металлизации проволоки частицы напыляемого материала имеют более высокую температуру, чем при порошковым напылением, и сталкиваясь с основным материалом, они находятся в жидком состоянии. При напылении порошком за счет теп-

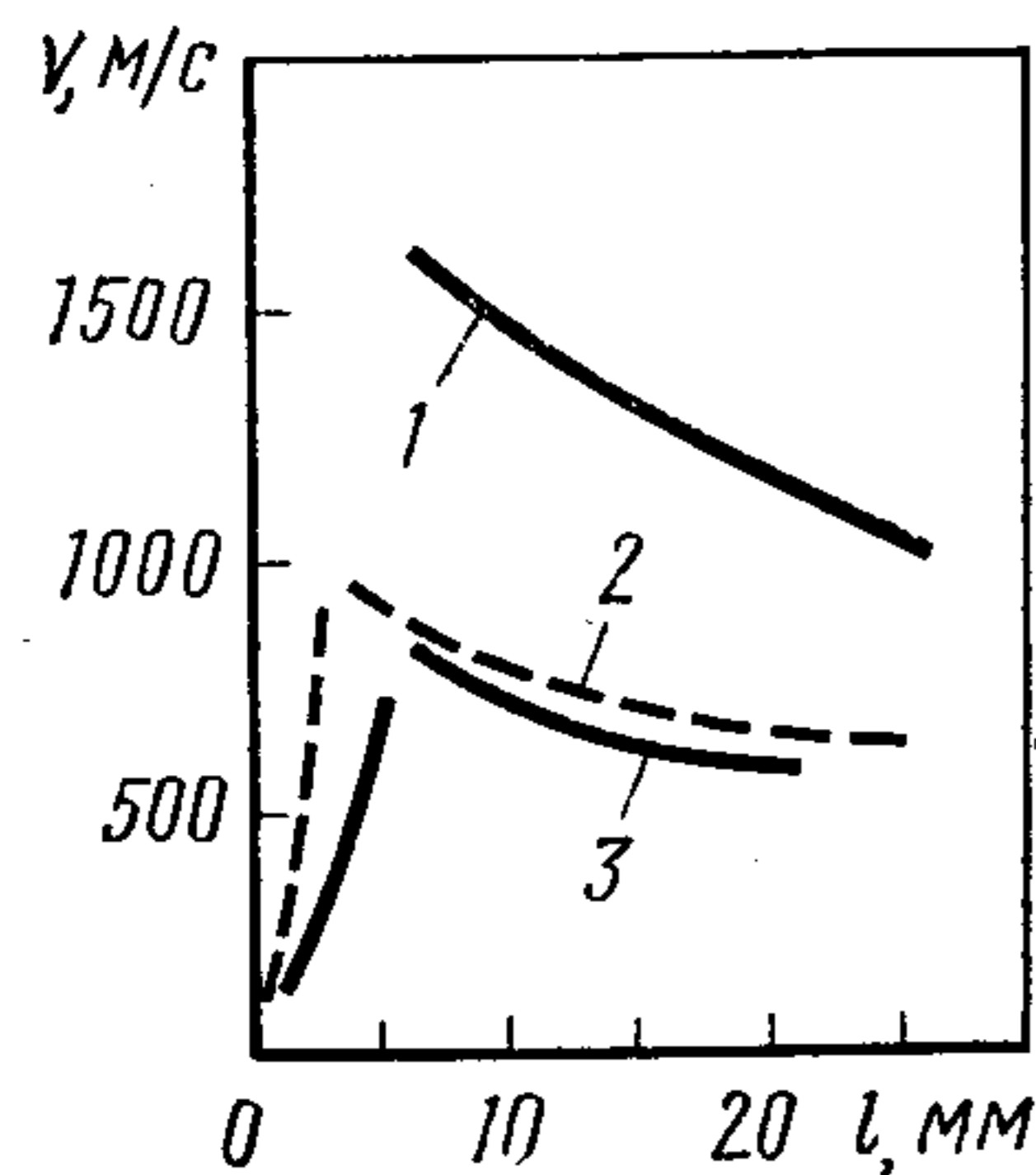


Рис. 123. Скорость v частиц напыляемого материала и газов при взрыве, а также скорость распространения взрывной волны в воздухе на разных расстояниях l от вольфрамовой проволоки при электроимпульсном напылении вольфрамом (мощность разряда 5 кВт):

1 — взрывная волна; 2 — газы; 3 — частицы

лопередачи от поверхности частиц к их середине происходит плавление порошка.

Предполагая, что частица порошка сферическая и температура ее поверхности мгновенно достигает температуры плавления, можно определить наибольший размер частиц, при котором происходит полное ее расплавление. Если допустить, что в плазменной струе, температура которой значительно превышает температуру плавления порошка, частицы порошка находятся в течение 0,1 мс, то каждая частица оплавляется на глубину 90% ее радиуса, т. е. почти до ее середины. Это означает, что порошок расплавляется почти полностью. В связи с этим возникает вопрос о размере частиц d_{\max}^* порошка, при котором он почти полностью расплавляется. Этот размер частиц зависит от теплофизических характеристик порошка,

12.3. Сравнительная характеристика нагрева частиц порошка в зависимости от степени нагрева

Напыляемые материалы	Коэффициент температурного рассеяния α , см ² /с	d_{\max}^* мкм	Оценка процесса напыления **
ZrO ₂	0,005	26	5
WO ₂	0,025	58	4
TiC	0,04	72	3
TaC	0,09	110	1
ZrC	0,05	82	3
TiN	0,07	96	2
B ₄ C	0,06	90	2
Сталь 4340***	0,08	104	1
Сталь 304****	0,05	82	3
W	0,63	280	1

* Максимальный размер частиц, при котором за 0,1 мс пребывания в плазме частица прогревается до сердцевины, где температура достигает 0,9 температуры плавления (в таблице приведены расчетные значения).

** Оценка по пятибалльной системе на основе значений d_{\max}^* : оценка 1 означает напыление в условиях слабого нагрева и неполного плавления частиц, а оценка 5 — напыление в условиях интенсивного нагрева и полного расплавления частиц.

*** Низколегированная сталь по стандарту американского общества инженеров транспорта (Прим. пер.).

**** Коррозионно-стойкая сталь SUS304 по японскому промышленному стандарту (Прим. пер.).

включая теплопроводность, теплоемкость и плотность напыляемого материала. Чем больше значение d_{\max}^* , тем лучше протекает процесс напыления порошком [11].

Для плазменного напыления обычно применяют порошок с

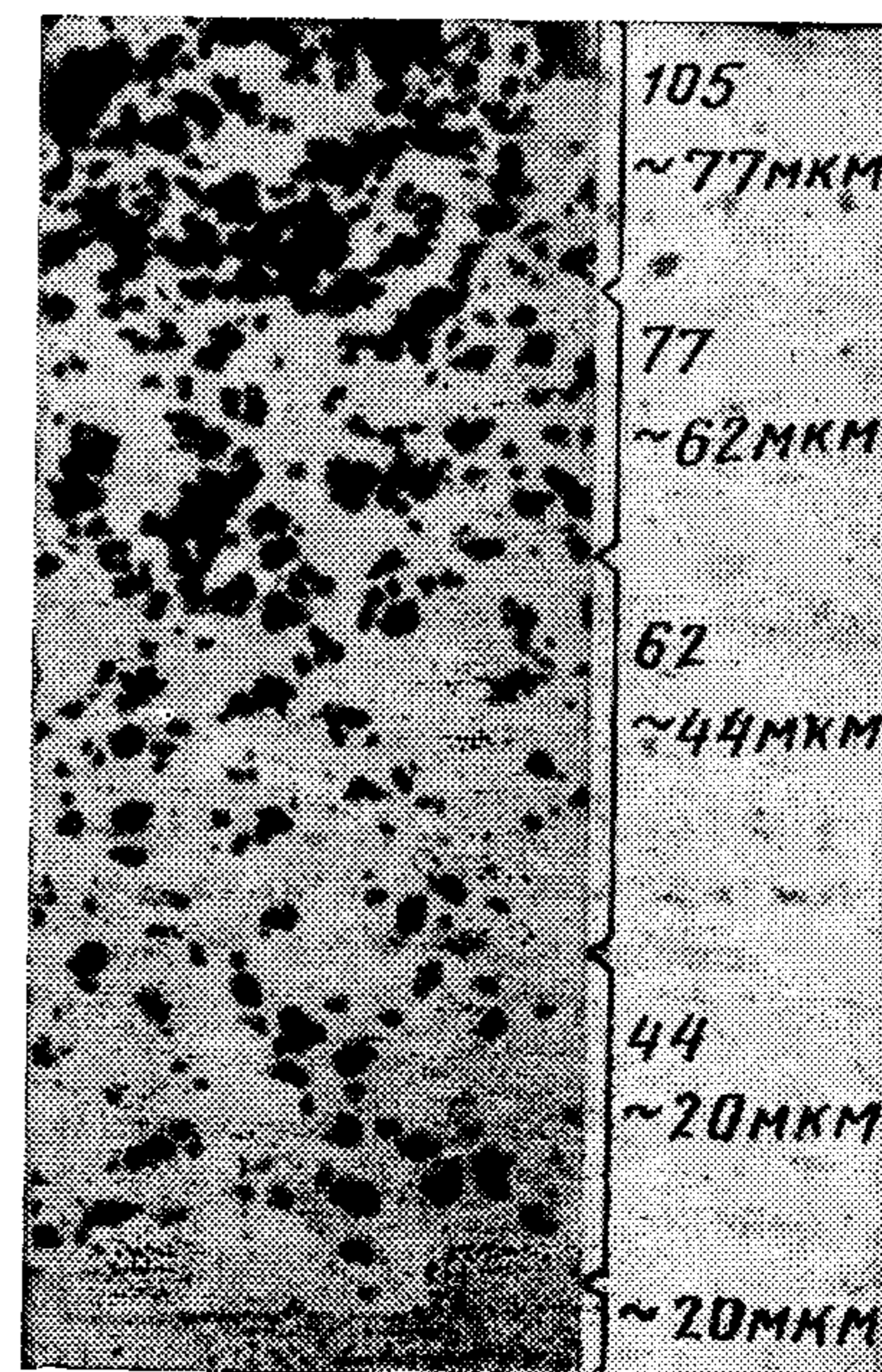


Рис. 124. Многослойное покрытие, полученное плазменным напылением порошком из оксида алюминия разной фракции (мкм) ($\times 60 \times 3/5$)

* Приблизительно $d_{\max}^* = 2[\alpha\theta/0,3]^{1/2}$, где α — коэффициент температурного рассеяния, см²/с; θ — продолжительность нагрева, с.

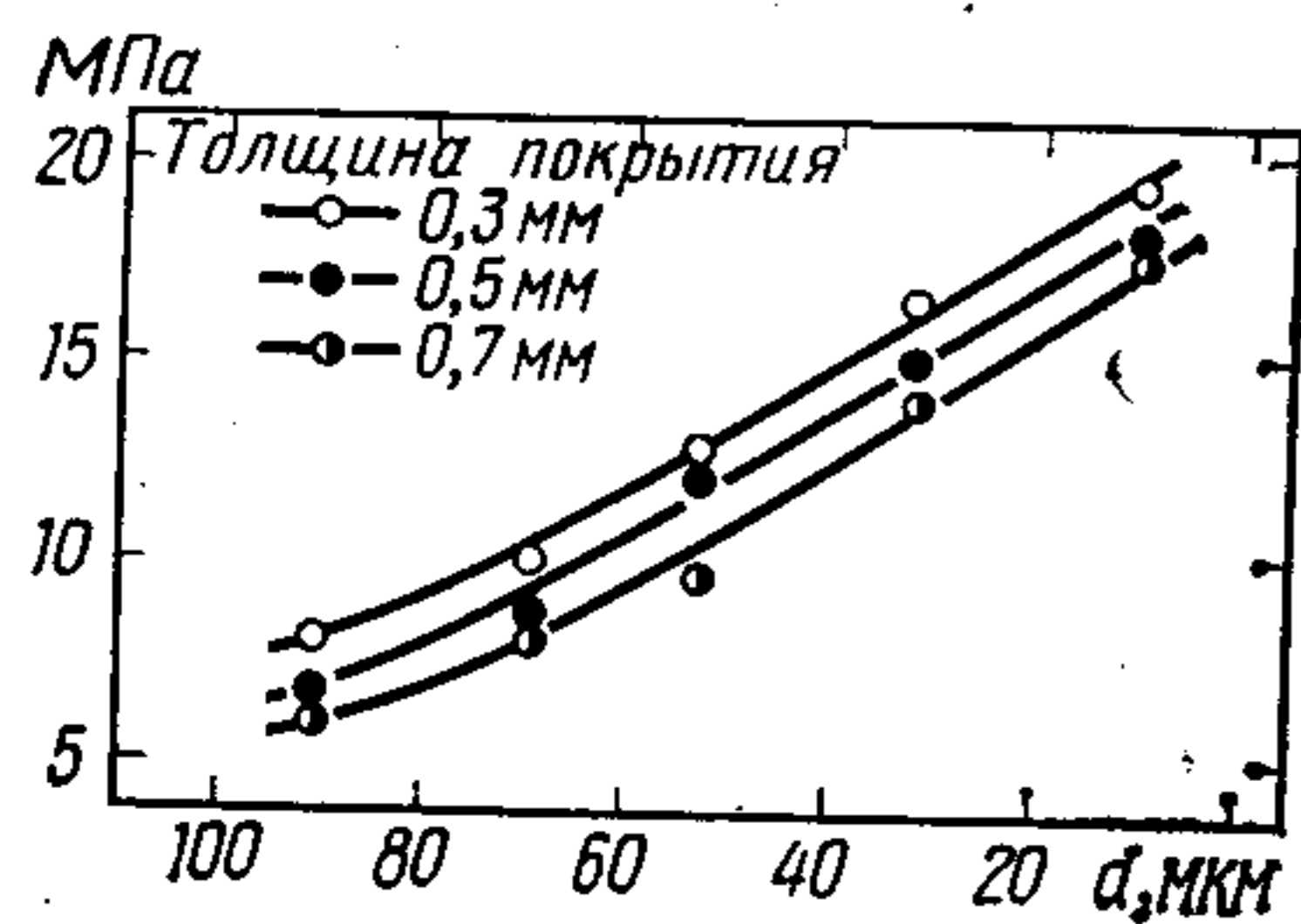


Рис. 125. Влияние размера частиц d порошка напыляемого материала на прочность сцепления покрытия с подложкой

12.4. Влияние размера частиц порошка на газопроницаемость покрытия

Размер частиц, мкм	Коэффициент газопроницаемости, $\text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{Па}) \cdot 10^{-10}$
Более 63	0,109
45—63	0,066
20—45	0,0375
10—20	0,0325

размером частиц 74—44 мкм. При использовании порошка с меньшим размером частиц практически все частицы в процессе напыления полностью расплавляются (табл. 12.3).

Напыление материала с использованием более мелкой фракции порошка обеспечивает получение плотного, более качественного покрытия. На рис. 124 показана структура покрытия на низкоуглеродистой стали, состоящего из ряда слоев, напыленных плазменным способом оксидом алюминия разной фракции. По мере уменьшения фракции порошка структура покрытия становится более плотной с меньшей пористостью. Уменьшение фракции порошкового напыляемого материала сопровождается повышением прочности сцепления покрытия с подложкой (рис. 125) [12].

В табл. 12.4 приведены данные по влиянию размера частиц порошка на коэффициент газопроницаемости (плотность) покрытия, полученного плазменным напылением (рабочий газ аргон + водород) диоксида циркония с 5% оксида кальция [13].

Плакированный порошок состоит из металлического или неметаллического ядра частицы с оболочкой вокруг этого ядра толщи-

12.5. Теплота, выделяемая при реакциях окисления алюминидов и алюминия

Реакции окисления	Теплота, выделяемая в процессе реакции, кДж/моль
$3\text{Ni} + \text{Al} = \text{Ni}_3\text{Al}$	153 ± 8
$\text{Ni} + \text{Al} = \text{NiAl}$	134
$2\text{Al} + \frac{3}{2}\text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3$	1670 ± 6
$2\text{NiAl} + \frac{5}{2}\text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{NiO}$	1890 ± 10
$2\text{Ni}_3\text{Al} + \frac{9}{2}\text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{NiO}$	2850 ± 35

ной 2—3 мкм из металла или сплава другого материала. Во время напыления плакированным порошком происходит следующее. При напылении порошком алюминия с никелевой плакировкой происходят реакции окисления алюминия с образованием интерметаллических соединений между алюминием и никелем (табл. 12.5). Экзотермический характер этих реакций способствует повышению температуры частиц [14].

При нагреве плакированных порошков плазмой или ацетилено-кислородным пламенем тепло-

та экзотермических реакций способствует повышению температуры частиц и прочности сцепления покрытия с основным материалом. В связи с этим плакированные порошки используют для нанесения подслоя на подложку с целью повышения сцепления покрытия с поверхностью детали.

12.2. СТОЛКНОВЕНИЕ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЕТАЛИ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ

При любом способе напыления поверхность основного материала располагают обычно на расстоянии не менее 100 мм от среза сопла горелки. Покрытие образуется из отдельных расплавленных или близких к этому состоянию частиц, которые с высокой скоростью соударяются и наслаиваются на поверхность основы.

На рис. 126 показана схема образования покрытия при напылении [5]. При движении к основному металлу в высокотемпературной газовой среде частицы находятся в расплавленном состоянии и их поверхность покрывается оксидной пленкой. При столкновении с поверхностью основного материала или поверхностью ранее образовавшегося покрытия частицы расплющиваются, образуя тонкий слой, механически сцепленный с поверхностью основного материала или покрытия. При напылении металла скорость охлаждения частиц составляет $10^6—10^8$ °C/с, а при напылении керамики — $10^4—10^6$ °C/с, поэтому кристаллизация жидких частиц завершается в течение ничтожно малого промежутка времени [15]. Прилипание частиц осуществляется посредством их механического сцепления с макровыступами подложки и через места разрушения оксида подложки. В местах разрушения оксидных пленок происходит сплавление металлических частиц с подложкой при высокой прочности сцепления покрытия с подложкой. В процессе налипания частиц друг на друга среди расплавленных попадаются и не полностью расплавленные частицы. Кроме того, внутри покрытия возникают заполненные газом зазоры и пустоты, количество которых определяет пористость покрытия.

Любой способ напыления предполагает движение нагретых до жидкого состояния частиц в газовой струе от среза сопла горелки до по-

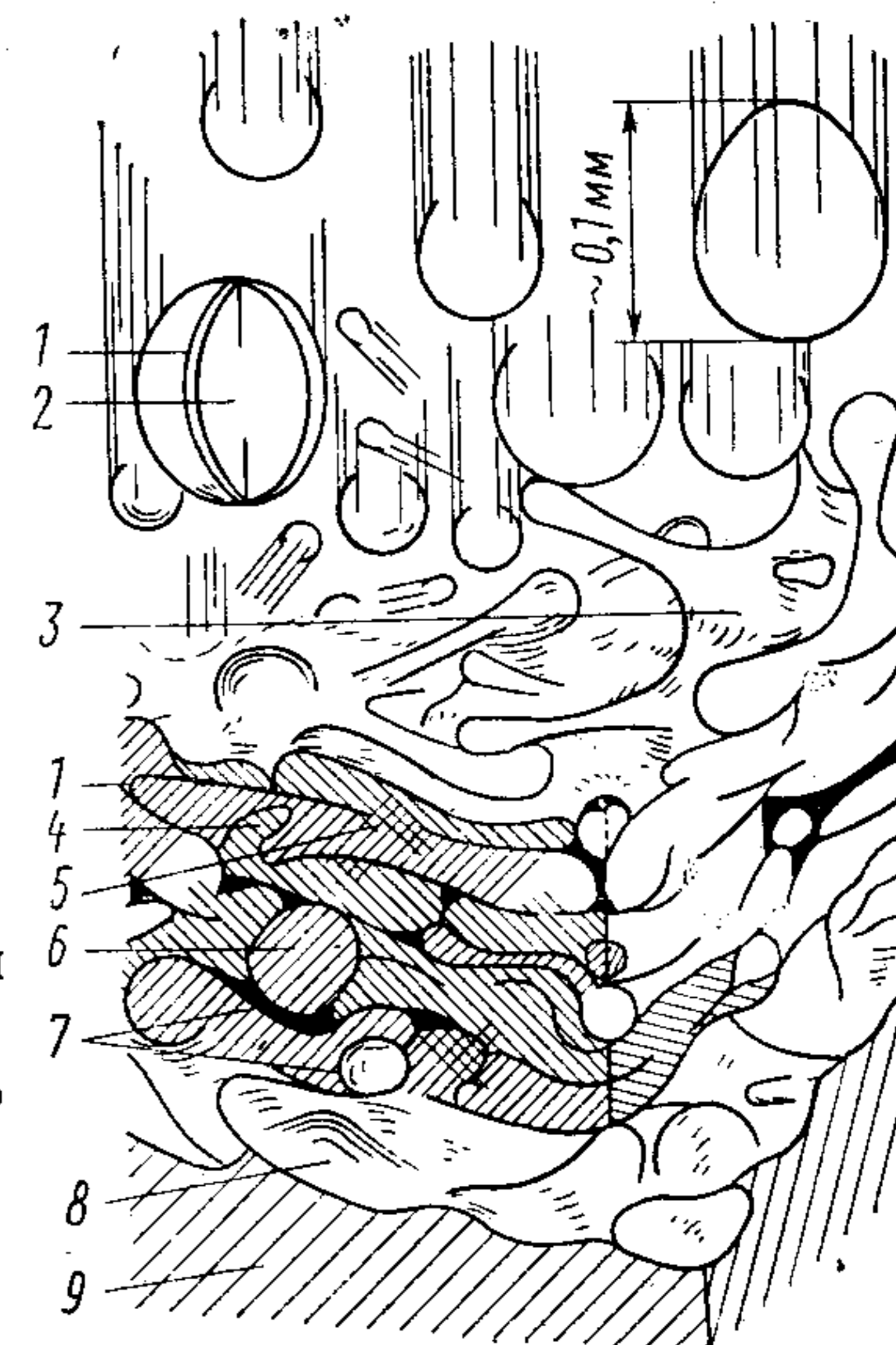


Рис. 126. Схема образования покрытия при напылении:

1 — оксидная пленка; 2 — частица расплавленного напыляемого материала; 3 — частица при столкновении с поверхностью; 4 — участок механического сцепления; 5 — участок локального сплавления; 6 — не полностью расплавленная частица; 7 — пора; 8 — поверхность основного материала; 9 — основной материал

верхности основного материала. При газопламенном и плазменном напылении на воздухе происходит инжекция окружающего воздуха в струю, транспортирующую материал к изделию.

При дуговой металлизации для распыления материала и его транспортирования к изделию используют струю сжатого воздуха. Таким образом, движение расплавленных частиц в воздушной струе сопровождается взаимодействием их поверхности с кислородом и азотом окружающего воздуха. При плазменном напылении, когда в качестве рабочего газа используют азот, нагрев частиц напыляемого материала происходит в плазменной струе этого газа. В результате этого напыляемые частицы могут взаимодействовать с азотом, и продукты их взаимодействия будут входить в состав покрытий.

Частицы напыляемого металла или сплава (в зависимости от стойкости к окислению) в той или иной мере могут быть подвержены окислению и в процессе нанесения покрытия вступают во взаимодействие с кислородом, в результате чего к моменту столкновения с поверхностью основного материала на частицах образуется тонкая оксидная пленка.

Выявление оксидов в покрытиях, напыленных металлом или сплавом, представляет большие трудности. При микроструктурных исследованиях с целью выявления оксидов покрытие рекомендуется подвергать шлифованию без травления. Однако в состоянии после шлифования мелкие оксидные частицы могут быть трудно различимы среди следов пластического течения металла, тогда для их выявления проводят легкое травление. В напыленных медью покрытиях содержание кислорода можно количественно определить с высокой точностью, а оксиды в таких покрытиях легко выявляются при микроструктурных исследованиях, особенно после травления шлифа аммиаком. На рис. 127 частицы оксида меди (Cu_2O) видны как темные прослойки между светлыми металлическими слоями в сечении покрытия, напыленного медью. После отжига в высоком вакууме при температуре $800^\circ C$ распределение подвергшихся сфероидизации оксидов просматривается с еще большей отчетливостью (рис. 128) [2].

При напылении цинком оксиды не оказывают заметного отри-

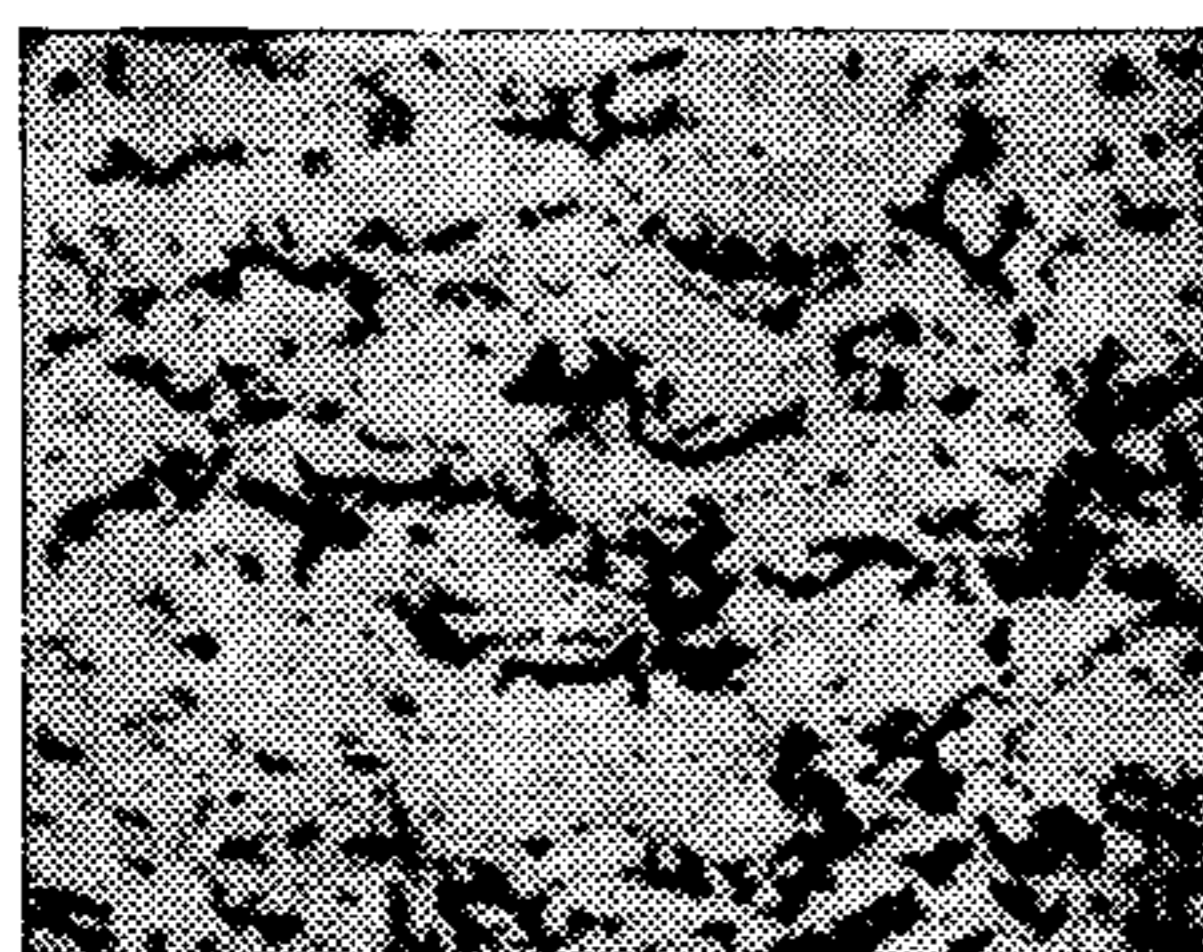


Рис. 127. Микроструктура медного покрытия (темные участки — оксиды меди) после напыления

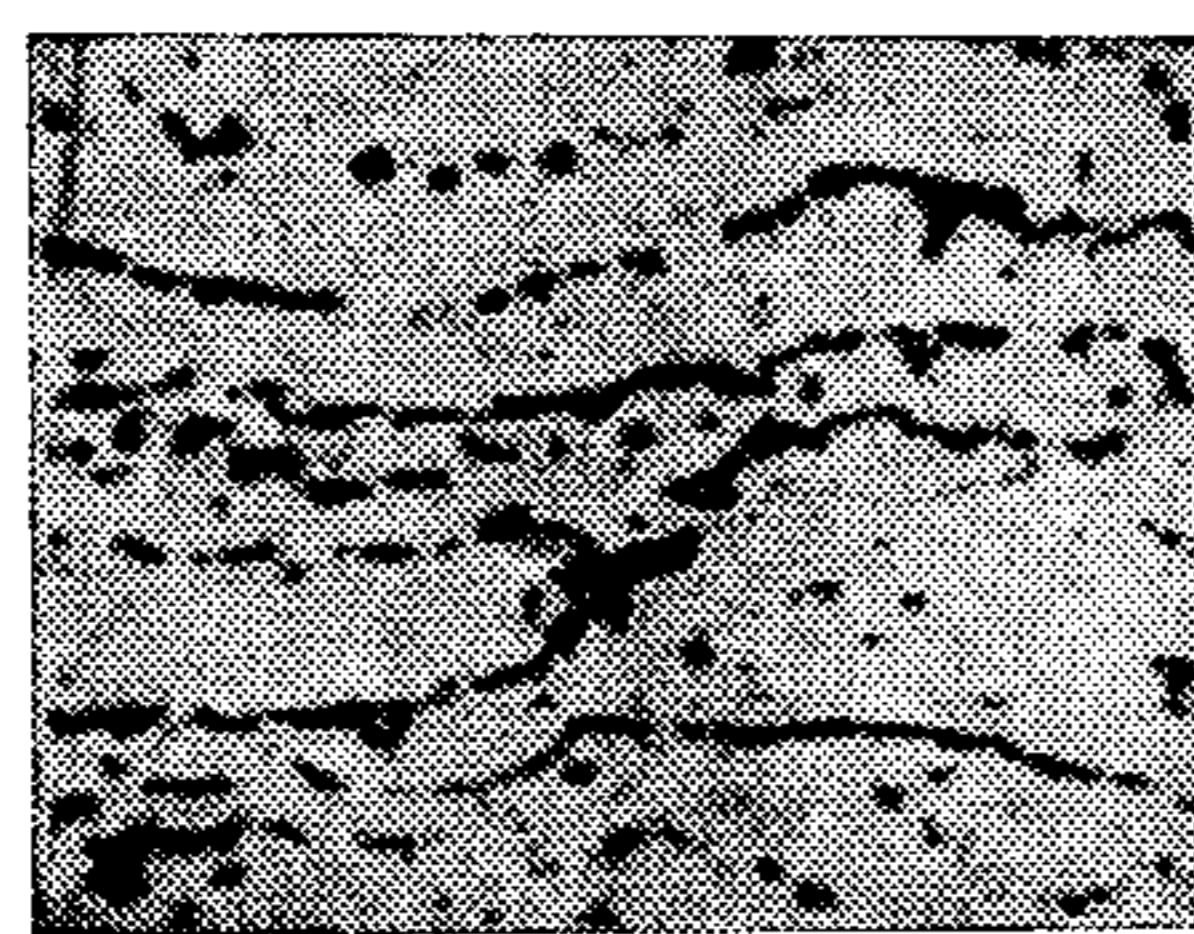


Рис. 128. Микроструктура медного покрытия после отжига

12.6. Изменение содержания углерода при газопламенном напылении проволокой из углеродистых сталей

Содержание углерода в напыляемом материале (проволоке), %	Содержание углерода в напыленном покрытии, %
0,91	0,88
0,69	0,65
0,30	0,30
0,07	0,05

12.7. Изменение содержания углерода при дуговой металлизации проволокой из углеродистых сталей

Содержание углерода в напыляемом материале (проволоке), %	Содержание углерода в напыленном покрытии, %
0,91	0,39
0,69	0,16
0,30	0,13
0,07	0,04

цательного влияния на качество покрытия, но при напылении алюминием интенсивное образование оксидов при последующей термообработке может препятствовать диффузии алюминия в основу изделия, и алитирование произойдет на недостаточную глубину. При нанесении алюминиевых покрытий увеличение расстояния между горелкой и основным материалом приводит к значительному повышению содержания оксидов в покрытии.

Большое содержание оксидов в покрытии характерно также для дуговой металлизации. При напылении углеродистой стали, содержащей 0,4% С, в напыленном покрытии содержится 10,5% оксидов и 1,5% нитридов [16].

Большое содержание оксидов обнаруживают в медных покрытиях, напыленных плазменным способом. При плазменном напылении вольфрама на основу из графита могут образоваться как оксиды (WO_3 , W_4O , WO_2), так и его нитриды (W_2N , W_3N_2 , WN , W_2N_2 и WN_2) [17].

При напылении состав напыляемого материала может изменяться. В табл. 12.6 приведены данные по снижению содержания углерода в покрытии при газопламенном напылении проволокой из различных углеродистых сталей [16].

Интенсивный нагрев частиц напыляемого материала при дуговой металлизации также становится причиной снижения содержания некоторых компонентов состава. В табл. 12.7 приведены данные по снижению содержания углерода в покрытии при дуговой металлизации углеродистых сталей разного состава. Во всех случаях наблюдается значительное снижение содержания углерода в материале покрытия [18].

В табл. 12.8 для сравнения приведено содержание марганца, кремния и хрома при дуговой металлизации и газопламенном напылении проволокой. Эти данные убедительно показывают, что при дуговой металлизации происходит значительное уменьшение содержания этих элементов в покрытии [18].

При плазменном напылении сплавами на основе никеля с использованием в качестве рабочего газа аргона состав напыляемого материала практически не изменяется [19].

Некоторые материалы после напыления могут изменять свою

12.8. Изменение содержания кремния, марганца и хрома в сталях при газопламенном и дуговом напылении

Содержание легирующих элементов в напыляемом материале, %	Содержание легирующих элементов в покрытии, %	
	Газопламенное напыление	Дуговая металлизация
Марганец	0,41 0,50 0,52 0,60	0,35 0,48 0,46 0,55
Кремний	0,23 0,23 0,27*	0,20 0,21 0,27
Хром	1,18	1,12

* Сталь, содержащая 1,18% Cr.

кристаллическую структуру в результате фазовых превращений, происходящих при нагреве до высокой температуры и быстром охлаждении напыляемых частиц. При газопламенном напылении алюминия получают покрытие, состоящее из γ -фазы (кубическая кристаллическая решетка, решетка шпинели) с небольшим содержанием θ - и α -фаз (гексагональная решетка). При плазменном напылении алюминия покрытия малой толщины состоят из θ -фазы (гранцентрированная кубическая решетка) и δ -фазы (гексагональная решетка) с примесью γ - и α -фазы; покрытия большой толщины (например 0,25 мм) состоят из α - и γ -фаз с крайне малой примесью δ - и θ -фаз [16].

При газопламенном напылении порошком или прутком из глинозема, как и при плазменном напылении этим материалом, получают покрытия, состоящие из γ - и α -фаз (табл. 12.9). После нагрева до 1250°C и выдержки при этой температуре в течение 2 ч с последующим медленным охлаждением большая часть покрытия превращается в устойчивую α -фазу [20]. Структура такого покрытия в значительной степени зависит от режима напыления.

Приведенные выше примеры демонстрируют, что напыление керамическими материалами сопровождается многообразными структурными превращениями. Получаемые покрытия имеют сложную структуру, существо которой нередко остается непонятным. Знание истинной температуры поверхности основного материала имеет большое значение для изучения процесса напыления, однако измерение этой температуры связано с большими трудностями. Условия нагрева основного материала при напылении зависят от используемого источника тепловой энергии, условий напыления и вида напыляемого материала.

12.9. Результаты рентгеноструктурного анализа напыленных оксидом алюминия покрытий

Напыляемые материалы с кристаллическим строением до напыления $\alpha = \text{Al}_2\text{O}_3$	Источник нагрева	Объемная доля структурных фаз в покрытии, %	
		$\gamma = \text{Al}_2\text{O}_3$	$\alpha = \text{Al}_2\text{O}_3$
Оксид алюминия японского производства: порошковый	Ацетилено-кислородное пламя	50	50
прутковый	То же	85	15
Прутковый оксид алюминия «Rokide A»	»	98	2
Порошковый оксид алюминия «Metco» № 101	Плазма (аргон + 15% водорода)	95	5

С целью изучения температуры основного материала проведен эксперимент, во время которого тонкие нихромовые нити термопары зачеканивали в подложке и в зависимости от расстояния среза сопла горелки до изделия проводили газопламенное напыление проволокой [21]. Эксперимент показал, что при расстоянии 100 мм средняя температура небольшого участка основного металла (где была зачеканена термопара) при напылении углеродистой сталью, медью, алюминием и оловом составила 250, 230, 140 и 120°C соответственно.

Во время одного из экспериментов измеряли температуру с обратной стороны образца основного металла (низкоуглеродистой стали) размером 4,5×100×100 мм при плазменном напылении оксидом алюминия с лицевой стороны этого образца [22]. Результаты эксперимента показали, что при обычном расстоянии напыления, равном 110 мм, температура основного металла достигала 300°C уже через 2 мин после начала напыления и оставалась на этом уровне до окончания процесса.

Обобщая, можно констатировать, что при нанесении нагретых до плавления частиц напыляемого материала образование покрытия в процессе их столкновения с основным материалом происходит при температуре поверхности основного материала до 200°C (при напылении некоторыми материалами — до 350°C). Во избежание перегрева основного материала рекомендуется его охлаждать с обратной стороны струей воздуха.

12.3. ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ С ОСНОВНЫМ МАТЕРИАЛОМ И СЦЕПЛЕНИЕ МЕЖДУ ЧАСТИЦАМИ В ПОКРЫТИИ

В области изучения строения переходной зоны между основным материалом и покрытием остается много неясного. Покрытие и основной материал практически всегда являются разнородными

по составу и свойствам. Шлифование при подготовке микрошлифов для металлографических исследований вызывает обычно образование выступа на границе раздела, связанного с разными твердостями основного материала и покрытия. Поэтому при травлении исключено одновременное протравливание участков по обе стороны от названного выступа, а при отдельном их травлении на границе раздела возникает углубление, обусловленное высокой скоростью травления граничного слоя. Все это создает трудности, исключающие получение достоверных данных по структуре границы раздела. Кроме того, при столкновении частиц с поверхностью основного материала между ними в зоне контакта возникают мгновенные взаимодействия, продукты которых, образующие крайне тонкие и плохо различимые прослойки, создают дополнительные трудности при изучении структуры контактной зоны.

Соединение напыленного покрытия с основой осуществляется преимущественно за счет механического сцепления напыляемых частиц с выступами и впадинами на поверхности основы, образованными предварительной обработкой. Этот механизм адгезии покрытия называют анкерным эффектом.

Кроме механического сцепления, прочность сцепления покрытия с основным материалом обеспечивается за счет ряда других механизмов, включая диффузию компонентов покрытия в основной материал, сплавление и химическое взаимодействие. Поскольку частицы напыляемого материала имеют обычно оксидную пленку, их сцепление с поверхностью основного материала на некоторых микроучастках происходит через оксидные пленки.

Повышение прочности сцепления покрытия достигается также за счет физических связей под действием вандерваальсовых сил. Эти силы как силы межатомного притяжения могут возникать только при сближении частиц покрытия с поверхностью металла на расстояние, близкое к параметру кристаллической решетки. Согласно сообщениям в печати, адгезия покрытия за счет вандерваальсовых сил возникает на активированных участках поверхности основного материала [23]. Однако к настоящему времени не разработаны какие-либо методы достоверной оценки прочности сцепления покрытия за счет вандерваальсовых сил.

Молибденовое покрытие отличается особенно хорошей адгезией к черным металлам. При движении частиц молибдена от сопла горелки до поверхности основы происходит их окисление, которое сопровождается интенсивным испарением оксидов. В результате расплавленные частицы молибдена в момент соударения с поверхностью основы имеют очень тонкую пленку оксидов, которая при соударении легко разрывается, и чистый молибден, имеющий высокую температуру, вступает в контакт с поверхностью основы. Происходит сплавление частиц молибдена с металлом основы на некоторых участках и образование металлических связей.

На рис. 129 показана микроструктура переходной зоны между низкоуглеродистой сталью (основным металлом) и молибденовым покрытием, полученным газопламенным напылением проволокой. На участке вблизи



Рис. 129. Граница между низкоуглеродистой сталью (основным металлом) и молибденовым покрытием, нанесенным газопламенным напылением проволокой ($\times 920 \times 3/5$):

1 — покрытие; 2 — основной металл

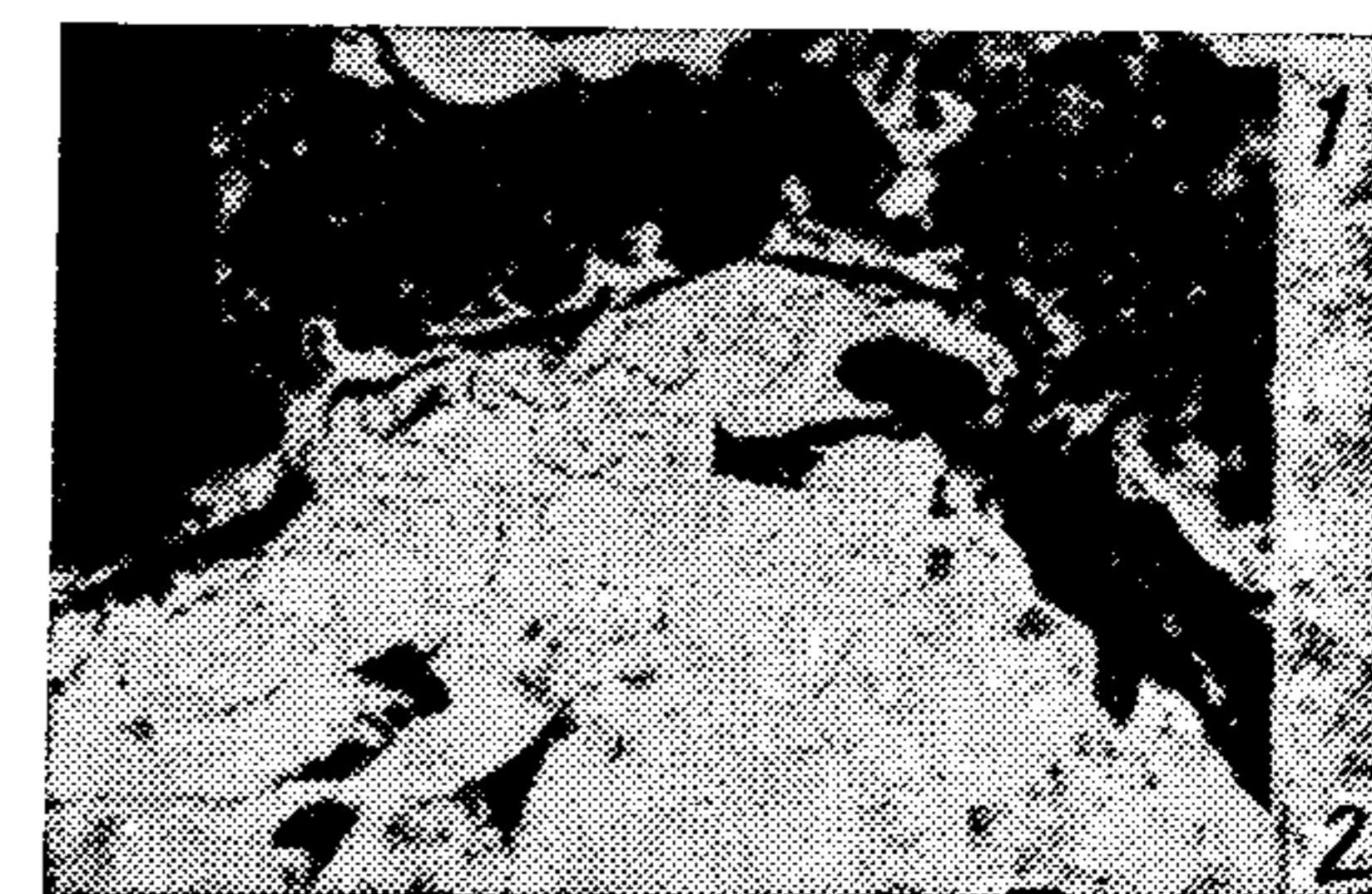


Рис. 130. Граница между низкоуглеродистой сталью (основным металлом) и молибденовым покрытием, нанесенным электрометаллизацией ($\times 500 \times 3/5$):

1 — покрытие; 2 — основной металл

границы раздела четко виден промежуточный слой между покрытием и основным металлом.

Толщина промежуточного слоя порядка 1 мкм и состоит из интерметаллических соединений Fe_3Mo_2 и Fe_7Mo_6 . На рис. 130 показана структура переходной зоны между сталью и молибденовым покрытием, нанесенным электрометаллизацией. В этом случае имеет место аналогичное взаимодействие между напыленным молибденом и сталью [24]. На границе между низкоуглеродистой сталью и молибденовым покрытием, напыленным плазменным способом, видны участки локального сплавления (рис. 131).

На рис. 132 показана микроструктура переходной зоны между стальной поверхностью и молибденовым покрытием. На микроструктуре видны участки локальной закалки в крайне тонком поверхностном слое основного металла [25]. В частности, тонкий

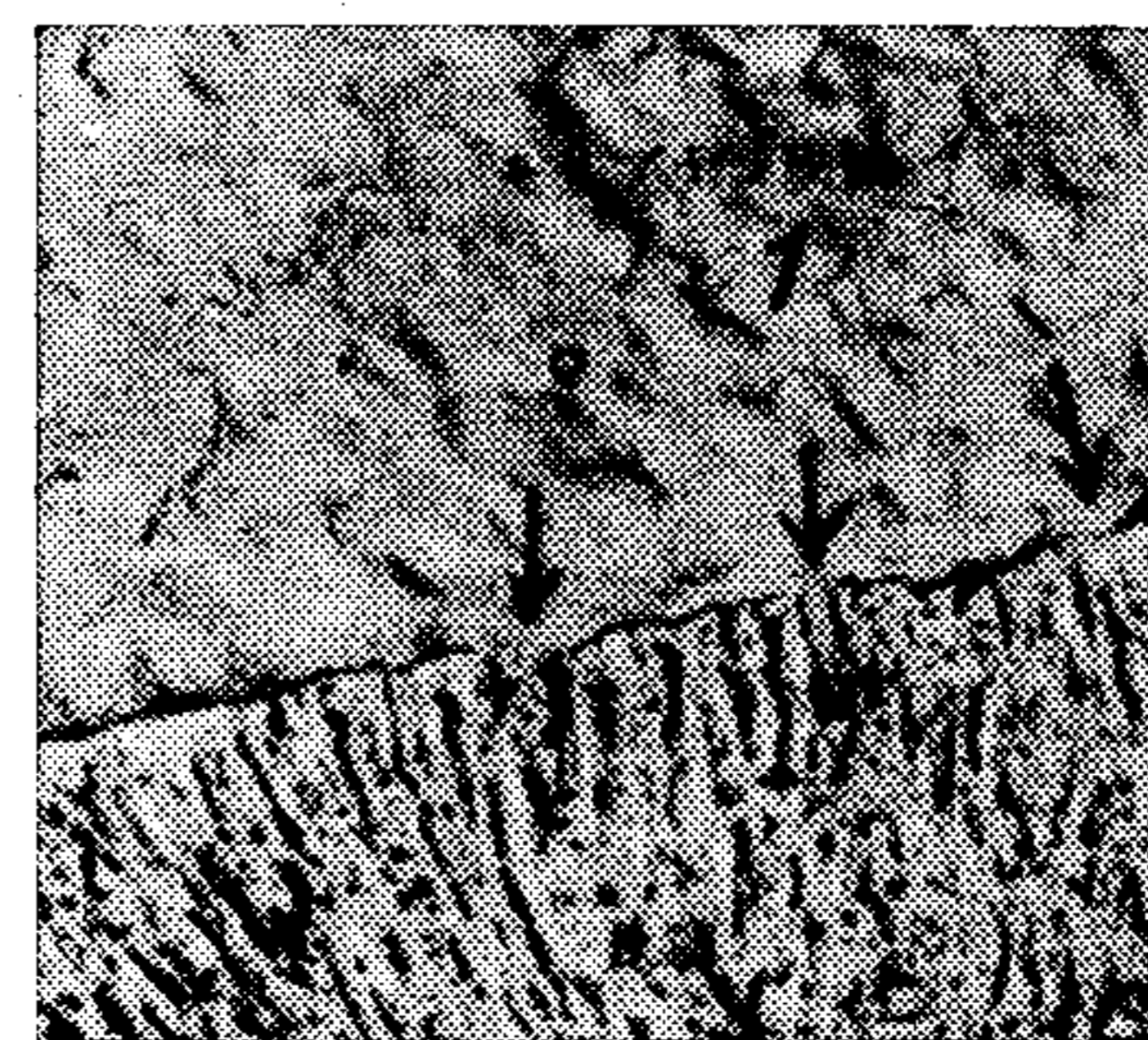


Рис. 131. Граница между низкоуглеродистой сталью (основным металлом) и молибденовым покрытием, напыленным плазменным способом ($\times 3000 \times 4/5$):

1 — молибденовое покрытие

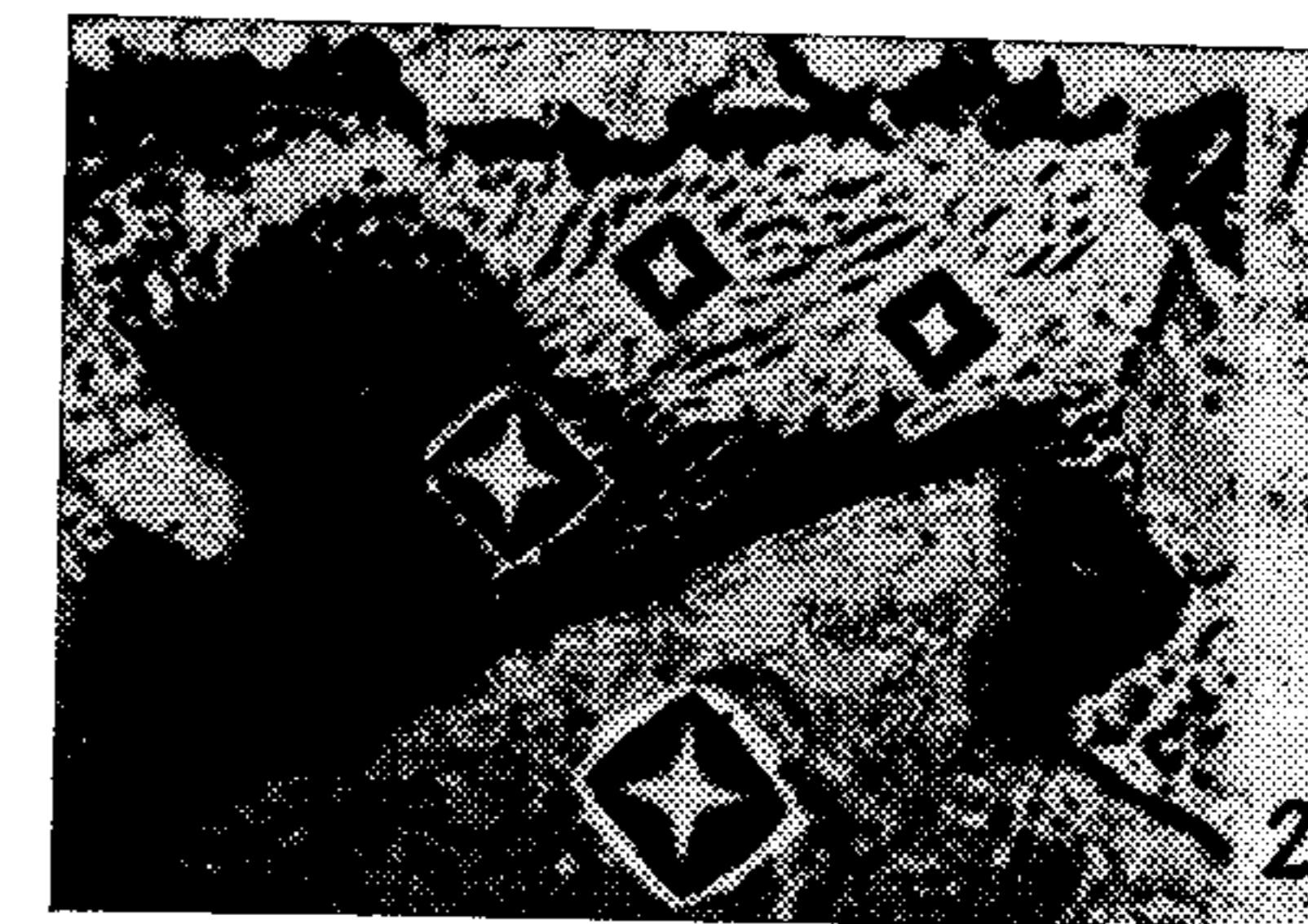


Рис. 132. Структурные превращения в поверхностном слое стали под влиянием напыления молибденом (видны следы измерения твердости):

1 — молибденовое покрытие; 2 — основной материал



Рис. 133. Граница между металлической подложкой и напыленным покрытием ($\times 500 \times 3/5$):

1 — покрытие; 2 — основной металл

поверхностный слой перлитной структуры на участках плотного сцепления с частицами напыленного слоя нагревался при напылении до температуры выше точки начала структурных превращений, а при последующем быстром охлаждении на этих участках возникла структура квазимартенсита. Микротвердость на участках феррита, перлита и квазимартенсита соответственно составляла $HV\ 95, 230$ и 550 .

На рис. 133 показана микроструктура на границе между сталью и стальным покрытием, нанесенным дуговым способом [24]. Приведен пример сцепления покрытия с основным металлом

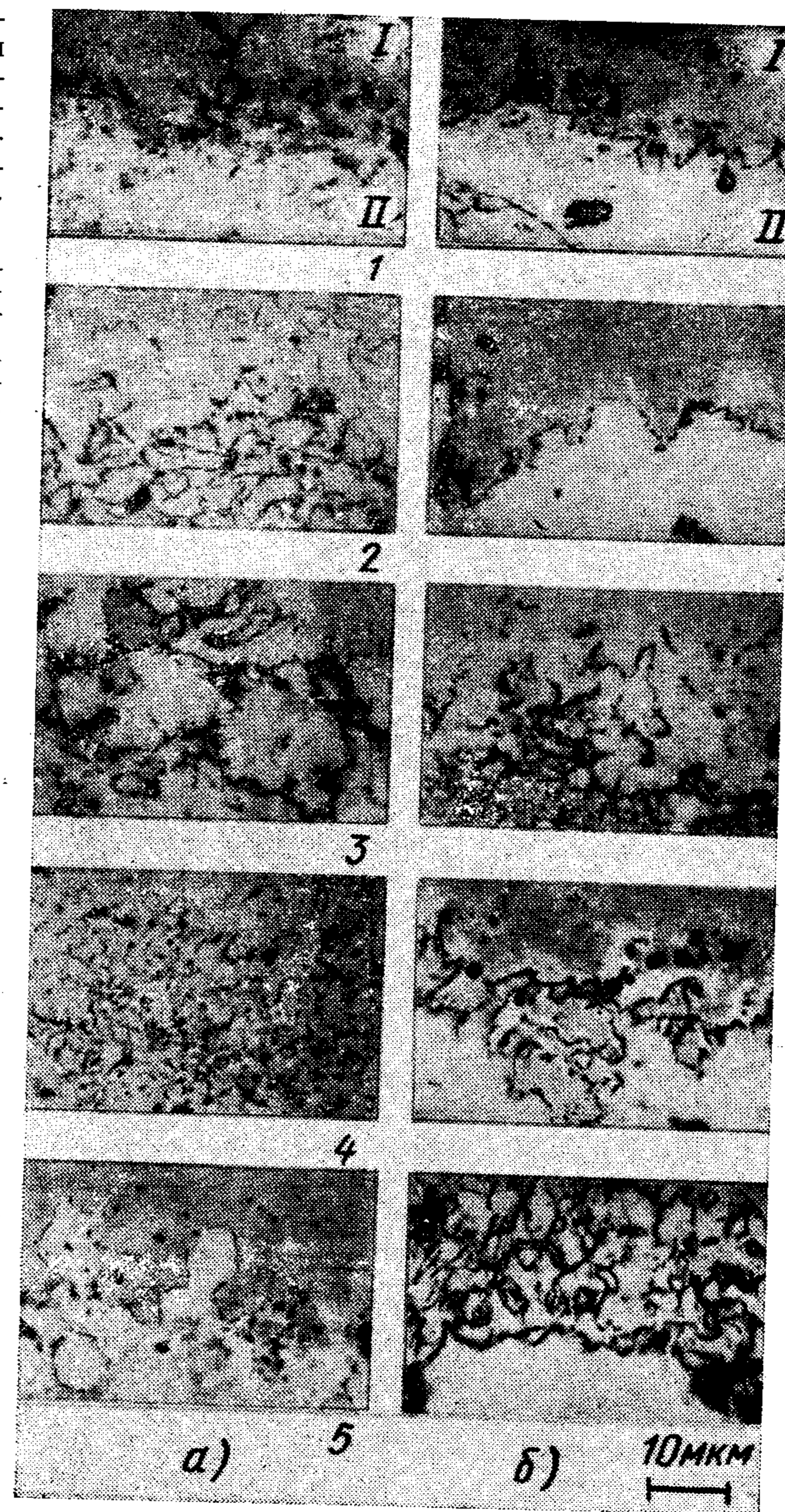
при сочетании механического сцепления и физической связи под действием вандерваальсовых сил.

На рис. 134, 1—5 показана микроструктура границы между основным металлом (чистый алюминий и низкоуглеродистая сталь) и покрытиями, напыленными плазменным способом с использованием порошков никеля, хрома, молибдена, тантала и вольфрама [26]. В левом ряду, где показаны покрытия на чистом алюминии, четко виден промежуточный слой при любом покрытии. В этом случае частицы при столкновении с поверхностью, вызывая плавление основного металла, глубоко внедрялись в него. В правом ряду, где представлены покрытия на низкоуглеродистой стали, на границе между никелевым и хромовым покрытиями и основным металлом промежуточные слои обнаруживаются лишь локально, на изолированных участках, тогда как на большей части граничного слоя адгезия этих покрытий к основному металлу носит характер механического сцепления. В переходной зоне между основным металлом и молибденовым, танталовым и вольфрамовым покрытиями вдоль поверхности основного металла видна полоса, похожая на промежуточный слой, где частицы напыляемого материала вызывали, видимо, плавление поверхности основного металла. Выявляемый на границе покрытия с основным металлом промежуточный слой состоит из интерметаллических соединений компонентов состава покрытия и основного металла [27]. Результаты рентгеноструктурного анализа этих интерметаллических соединений приведены в табл. 12.10.

В табл. 12.11 приведены данные по временному сопротивлению для никелевого, хромового, молибденового, танталового и вольфрамового покрытий на алюминии и углеродистой стали [26]. Алюминиевые образцы с никелевым покрытием разрушились как по самому покрытию, так и по границе между ним и основным металлом, тогда как все остальные покрытия на алюминии разрушались по покрытию или по границе с клеем. Временное сопротивление разрыву покрытий на алюминии составляло $12,7—28,44$ МПа, а

Рис. 134. Граница между основным металлом (алюминий, низкоуглеродистая сталь) и покрытием, напыленным порошком никеля, хрома, молибдена, тантала и вольфрама:

а — алюминий; б — низкоуглеродистая сталь; 1 — никелевое покрытие; 2 — хромовое покрытие; 3 — молибденовое покрытие; 4 — танталовое покрытие; 5 — вольфрамовое покрытие; I — покрытие; II — подложка



для молибденового, танталового и вольфрамового покрытий на низкоуглеродистой стали — $14,7—24,5$ МПа; разрушение происходило в самом покрытии или на границе с клеем. Между тем хромовое и никелевое покрытия на низкоуглеродистой стали отслаивались по границе с основным металлом и имели низкое временное сопротивление ($5,88—6,86$ МПа).

Сопоставление результатов испытаний на растяжение и структур переходной зоны позволяет выявить следующее их соответст-

12.10. Интерметаллические соединения в переходной зоне между покрытием и основным металлом

Основной металл	Покрытие				
	никелевое	хромовое	молибденовое	танталовое	вольфрамовое
Алюминий	Al ₃ Ni*	Al ₅ Cr	Al ₃ Mo	Al ₃ Ta	WAl ₁₂
Низкоуглеродистая сталь	—	—	σ—FeMo* Fe ₂ Mo	Fe ₇ Ta ₃	Fe ₂ W Fe ₇ W ₆ *

* Температура образования соединения Al₃Ni составляет 824 (854)°С, соединения σ—FeMo — 1540°С и соединения Fe₇N₆ — 1640°С (из книги Хансена «Состав бинарных сплавов»).

12.11. Результаты испытаний на растяжение для различных металлических покрытий на алюминии и низкоуглеродистой стали

Покрытия	Алюминий		Низкоуглеродистая сталь	
	Временное сопротивление, МПа	Место разрушения*	Временное сопротивление, МПа	Место разрушения*
Никелевое	13,7	А, С	5,8	С
Хромовое	13,7	А	6,8	С
Молибденовое	22,6	А	19,6	А
Танталовое	12,7	А	14,7	А
Вольфрамовое	28,4	В	24,5	В

* А — в покрытии; В — по границе между покрытием и клеем; С — по границе между покрытием и основным металлом в форме отслоения.

вие. Образцы, имевшие отслоение покрытия от основного металла, характеризуются адгезией покрытия к основному металлу преимущественно за счет механического сцепления. В образцах, в которых разрушение происходило в покрытии или на границе с клеем, обнаружен промежуточный слой по всей границе между покрытием и основным металлом. Это значит, что прочность сцепления покрытия с основным металлом в значительной мере зависит от образования промежуточного слоя в переходной зоне.

В дальнейшем предстоит изучить вопрос о влиянии фаз, из которых состоит промежуточный слой, и толщины этого слоя на прочность сцепления напыленных покрытий с подложкой.

На границе между низкоуглеродистой сталью и вольфрамовым покрытием, напыленным детонационным способом, виден слой твердого раствора, образование которого связывают с тем, что при высокоэнергетическом столкновении расплавленных частиц вольфрама с поверхностью основного металла происходит плавление

последнего и образование жидкой фазы в виде смеси основного металла с вольфрамом [9].

На рис. 135 показана переходная зона между вольфрамом (основным металлом) и вольфрамовым покрытием, напыленным плазменным способом. В результате разогрева основного металла и осаждения на него нагретых до высокой температуры частиц покрытия произошла рекристаллизация последних. Такой рост зерен, вероятно, представляет собой эпитаксию* [27]. Эпитаксия возникает при напылении стали на сталь, цинка на цинк и т. п. Подобное явление, локально возникающее при ударном осаждении частиц напыляемого материала, оказывает влияние на прочность сцепления покрытия, однако подробности этого явления остаются пока неизвестными.

Окисление поверхности относится к числу факторов, определяющих прочность сцепления покрытия с основным металлом. При нагреве металла в воздухе на его поверхности образуются оксиды, свойства которых зависят от уровня температуры и продолжительности нагрева до этой температуры. Исследование влияния оксидов на стальной поверхности основы на прочность сцепления с ней алюминиевого покрытия, напыленного плазменным способом, показало, что при достаточно высокой температуре поверхности основного металла (например, при температуре взаимодействия алюминия и железа с образованием соединения Al₅Fe₂, равной 400—700°С) частицы алюминия при столкновении с основным металлом, как видно на рис. 136, разрушают оксидную пленку на его поверхности, обнажая свежий металл и обеспечивая образование металлического соединения покрытия с основным металлом [28].

Таким образом, в переходной зоне образуется соединение Al₅Fe₂, а между алюминием и основным металлом возникает диффузионное соединение. Если же на поверхности основного металла остается неразрушенная оксидная пленка, то диффузионное соединение образоваться не может (рис. 136). Следовательно, наличие прочной оксидной пленки на поверхности основного металла исключает получение хороших результатов при напылении. При температуре

* Если на поверхности одного кристалла по какой-либо кристаллографической ориентации происходит рост другого кристалла, то это явление называют эпитаксией, часто наблюдаемой при соприкосновении металлов, сходных по кристаллическому строению и параметрам кристаллической решетки. Это явление наблюдают при осаждении металлов из растворов, электролитическом металлотекании или вакуумном осаждении.

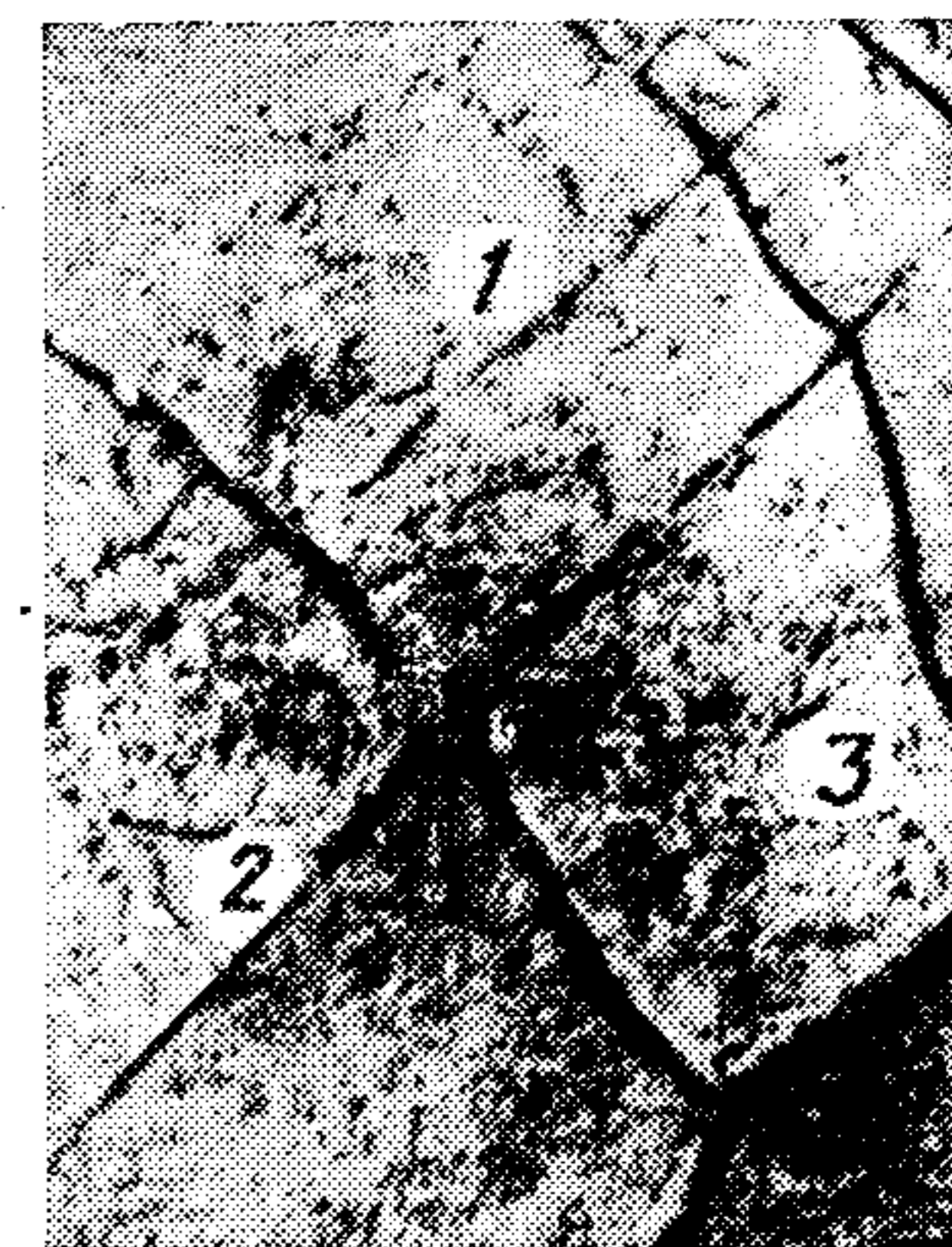


Рис. 135. Граница между вольфрамом (подложкой) и вольфрамовым покрытием, нанесенным плазменным напылением (×5000×4/5):

1 — покрытие; 2 — граница раздела; 3 — основной металл



Рис. 136. Граница между алюминиевым покрытием и сталью ($\times 400 \times 3/5$)

основного металла выше 700°C на его поверхности образуется толстая оксидная пленка (состоящая из FeO), высокая вязкость которой исключает ее разрушение при ударных столкновениях с ней частиц. Это, в свою очередь, исключает диффузию материала покрытия в основной металл, а соединение при этом образуется

между алюминием и оксидной пленкой основного материала. Разрушение оксидной пленки при охлаждении сопровождается отслоением находящегося на ней алюминиевого покрытия.

Микроструктурные исследования поверхности основного металла после отслоения от него защитного покрытия показывают, что разрушение происходит преимущественно между оксидной пленкой и основным металлом, что свидетельствует о более высоком уровне сцепления между покрытием и оксидной пленкой. Таким образом, при напылении на основной металл, покрытый толстой оксидной пленкой, получаемое покрытие имеет слабую прочность сцепления с основным металлом. Это значит, что задача получения покрытия с высокой прочностью сцепления с основой требует, чтобы перед напылением поверхность основного металла (температура которого при напылении не должна превышать оптимальной) была покрыта лишь тонкой оксидной пленкой, например такой, какой она бывает после механической обработки для придания поверхности изделия должной шероховатости.

При сцеплении частиц между собой внутри покрытия действуют те же механизмы, что и при взаимодействии покрытия с поверхностью основного металла. В частности, взаимодействие (прилипание) частиц между собой достигается путем их простого механического сцепления (анкерный эффект), а также за счет диффузии, эпитаксии и физической связи под действием вандервааль-

12.12. Коэффициенты линейного расширения для некоторых металлов и их оксидов [27]

Металлы и оксиды	Металлы		Оксиды	
	Температурный диапазон, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}, ^{\circ}\text{C}^{-1}$	Температурный диапазон, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}, ^{\circ}\text{C}^{-1}$
Fe/FeO	0—900	15,3	100—1000	12,2
Fe/Fe ₂ O ₃	0—900	15,3	20—900	14,9
Cu/Cu ₂ O	0—800	18,6	20—750	4,3
Cu/CuO	0—800	18,6	20—600	9,3
Ni/NiO	0—1000	17,6	20—1000	17,1

совых сил. На практике при сцеплении частиц между собой в той или иной степени действуют все перечисленные механизмы.

При напылении на поверхности нагретых (или расплавленных) металлических частиц образуются оксиды или нитриды, между которыми собственно происходит взаимодействие. Эффективность взаимодействия значительно зависит от различия коэффициентов линейного расширения напыляемого металла и оксидов (нитридов). При охлаждении усадка металлических частиц происходит в большей степени, чем усадка оксидов, и чем значительней это различие, тем хуже условия образования напыляемого покрытия (табл. 12.12).

12.4. ТЕРМООБРАБОТКА ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

В состоянии после напыления покрытие имеет обычно пористую структуру с большим содержанием кислорода, азота и водорода. Кроме того, покрытие в этом состоянии характеризуется низкой прочностью сцепления с основным металлом, слабым сцеплением частиц внутри покрытия и неудовлетворительной пластичностью. Повышение свойств таких покрытий требует последующей термообработки.

Термообработка. В табл. 12.13 приведены данные по относительной плотности покрытий, полученных плазменным напылением вольфрамовым порошком разной фракции.

Снижение фракции порошкового напыляемого материала сопровождается уменьшением пористости получаемого покрытия. Для повышения механических свойств после напыления рекомендуется термообработка в печи с водородной атмосферой. В табл. 12.14 представлены механические свойства покрытий в состоянии после напыления в сравнении с соответствующими свойствами образцов, полученных методами порошковой металлургии (прессованием в холодном состоянии с последующим спеканием). На рис. 137 показано содержание газов в исходном вольфрамовом порошке, в напыленном этим порошком покрытии в разных состояниях и образцах, полученных из вольфрамового порошка методами порошковой металлургии. Особенно высокое содержание кислорода характерно для вольфрамового покрытия в состоянии после напыле-

12.13. Относительная плотность вольфрамовых покрытий, %

Размер зерен порошка, мкм	После напыления	После напыления и термообработки при температуре, $^{\circ}\text{C}$				
		1700	1800	2000	2200	2400
8	82,8	84,5	92,6	95	94,9	—
44	83,5	—	89,5	89,8	90,6	92,6
44—74	81,4	82,5	87	86,3	87,9	89,4

12.14. Механические свойства вольфрамовых покрытий после напыления и спекания (свойства при нормальной температуре)

Показатель	После напыления	После напыления и термообработки	После холодного прессования и спекания
Относительная плотность, %	86	93	93
Микроструктура	Слоистая	Равноосная	Равноосная
Твердость HV	250	300	300
Временное сопротивление, МПа	151,7	482,6	417,6
Ковкость	Неудовлетворительная	Хорошая	Хорошая

ния. В связи с этим покрытие обычно подвергают последующему отжигу, в течение которого происходит снижение содержания кислорода за счет восстановления оксидов [29].

Отжиг покрытия проводится при достаточно длительной выдержке при высокой температуре, а поскольку при этой температуре находится и основной металл, структурные и иные его изменения приводят к возникновению термических напряжений, противоположных для многих марок основного материала.

Обработка напыленного покрытия, сочетающая нагрев (без плавления покрытия) с приложением давления (на короткое время), сулит перспективу повышения плотности покрытия, прочности его сцепления с основным металлом и прочности сцепления частиц внутри покрытия. Обработке с последующим оплавлением подвергают покрытия, напыленные газопламенным и плазменным способами самофлюсующимися сплавами на основе никеля, содержащими хром, кремний и бор [30].

В структуре между основным металлом и покрытием из самофлюсующегося никелевого сплава в состоянии после напыления между частицами покрытия видны многочисленные пустоты (поры), а сцепление покрытия с основным металлом не имеет доста-

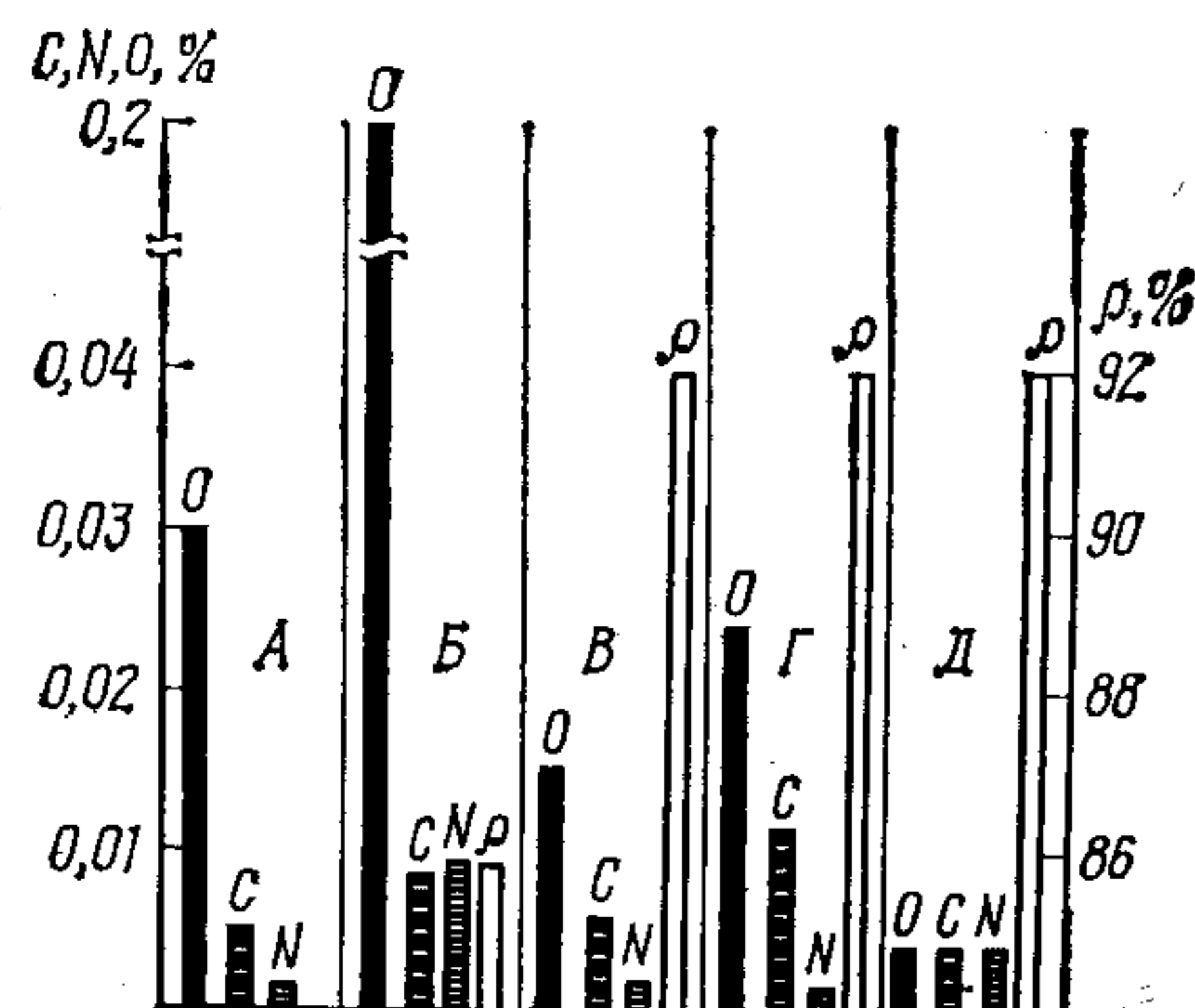


Рис. 137. Содержание газа (С, N, O, %) в исходном вольфрамовом порошке, покрытии в разных состояниях и образцах с разной относительной плотностью ρ , изготовленных методами порошковой металлургии:

А — исходный порошок; Б — покрытие в состоянии после напыления; В — покрытие в состоянии после напыления и термообработки; Г — покрытие после напыления в среде инертного газа; Д — образцы, изготовленные методами порошковой металлургии

точной прочности. То же покрытие в состоянии после обработки, включающей нагрев до 900°C и опрессовку при давлении 48,05 МПа, приобретает однородную структуру без пор с равномерно рассеянными мелкодисперсными частицами вторичных фаз. На границе между покрытием и основным металлом четко просматривается диффузионный слой. Покрытие в целом характеризуется радикальным повышением плотности и прочности сцепления с основным металлом. Прочность такого покрытия превышает 294,2 МПа.

Диффузионная обработка. Термообработка с целью получения диффузионного слоя на границе покрытия с основным металлом придает последнему жаростойкость и коррозионную стойкость.

Один из способов поверхностного упрочнения стали, в частности, включает напыление на стальное изделие алюминиевого покрытия толщиной 0,13—0,40 мм, нанесение на поверхность покрытия смеси кремнийорганической смолы с алюминиевым порошком и нагрев таких слоев до $800\text{—}900^{\circ}\text{C}$ в течение 5—10 мин с последующим охлаждением на воздухе [31]. Кроме того, на поверхность изделия наносят защитный слой жидкого стекла или раствора буры толщиной 0,3 мм с последующим нагревом до $800\text{—}850^{\circ}\text{C}$ и выдержкой в течение 30—180 мин [32]. Во время выдержки при высокой температуре на границе покрытия с основным металлом происходит взаимная диффузия алюминия и железа с образованием различных интерметаллических соединений и твердого раствора. При этом следует иметь в виду, что на участках неполной адгезии покрытия к поверхности основного металла, а также на участках пор и трещин, выходящих из покрытия на поверхность основного металла, слой взаимной диффузии алюминия — железа не образуется. Кроме того, при температуре нагрева выше 900°C в покрытии и легированном слое могут возникать трещины.

На рис. 138 схематически показано изменение микроструктуры переходной зоны между основным металлом и покрытием в состояниях после напыления и диффузионной обработки с изображением отдельных ступеней обра-

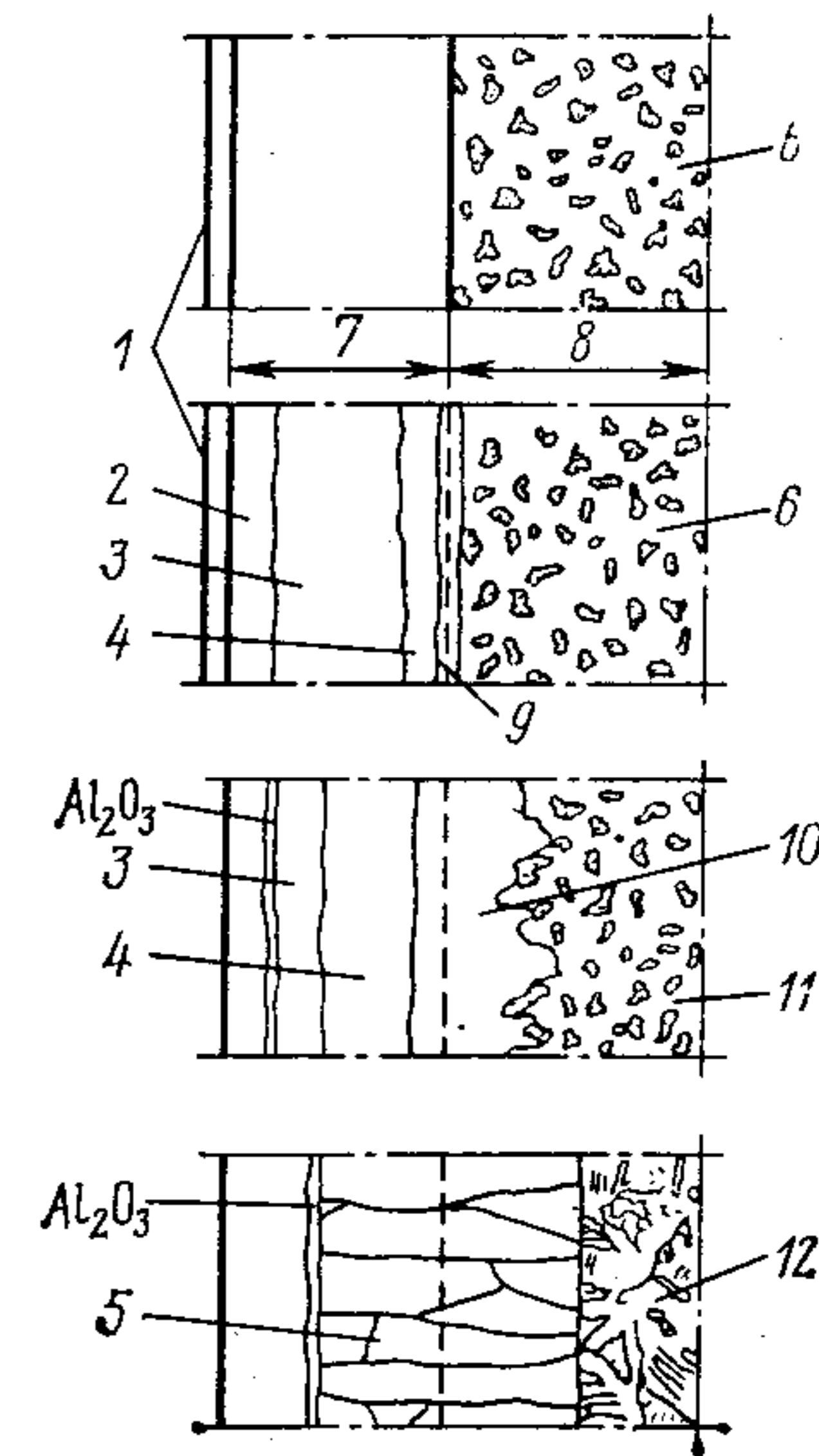


Рис. 138. Процессы, протекающие при термообработке стального изделия с алюминиевым покрытием:

1 — защитный слой из жидкого стекла или кремнийорганической смолы; 2 — напыленное алюминиевое покрытие; 3 — доэвтектоидный или заэвтектоидный сплав с высоким содержанием алюминия; 4 — хрупкие интерметаллические соединения FeAl_3 , Fe_2Al_3 и FeAl ; 5 — твердый раствор алюминия в феррите; 6 — отожженная сталь; 7 — напыленное покрытие; 8 — основной металл; 9 — слой твердого раствора, содержащий соединение FeAl_2 ; 10 — слой твердого раствора, содержащий соединение FeAl ; 11 — сталь после термообработки (отсутствие структурных изменений); 12 — сталь после нагрева до чрезмерно высокой температуры

зования легированного слоя. Глубина слоя диффузии алюминия находится в пределах 0,1—0,2 мм (согласно японскому промышленному стандарту H8301 глубина этого слоя должна быть не менее 70 мкм). Диффузионный слой, в структуру которого входят чрезвычайно твердые и хрупкие интерметаллические соединения и твердый раствор, обеспечивает повышение жаростойкости и коррозионной стойкости, т. е. по достигаемому эффекту аналогичен слою, получаемому способом алитирования.

Оплавление напыленных покрытий из самофлюсующихся сплавов. Покрытия самофлюсующимися сплавами, особенно при большой их толщине, предпочтительней наносить способом газовой или дуговой наплавки. Однако дуговая наплавка сопровождается значительным проплавлением основного металла, что приводит к сильному перемешиванию наплавленного металла с металлом основы. При толщине наплавленного слоя примерно 3,2 мм в материале покрытия содержится 30% металла основы, что не позволяет получить наплавленный слой с заданным составом и желаемыми свойствами.

После газопламенного напыления самофлюсующимися сплавами пористость покрытия достигает 25% при неудовлетворительной его адгезии к основному металлу.

В связи с этим возникает необходимость последующей уплотнительной термообработки. Самофлюсующиеся сплавы представляют собой высокопрочные сплавы на основе никеля или кобальта с добавлением не менее 1,5% В и Si. Эти два элемента, превосходящие никель, кобальт и железо по химическому сродству к кислороду, при оплавлении покрытия в процессе его уплотнительной термообработки образуют оксиды B_2O_3 и SiO_2 , расплавляющиеся как стекловидные вещества и выходящие на поверхность покрытия в виде шлака. В результате после охлаждения получают плотное покрытие, не имеющее пор. Такая обработка, кроме уплотнения покрытия, обеспечивает его полное сплавление с основным метал-



Рис. 139. Покрытие из сплава типа стеллит после газопламенного напыления ($\times 100 \times 4/5$)

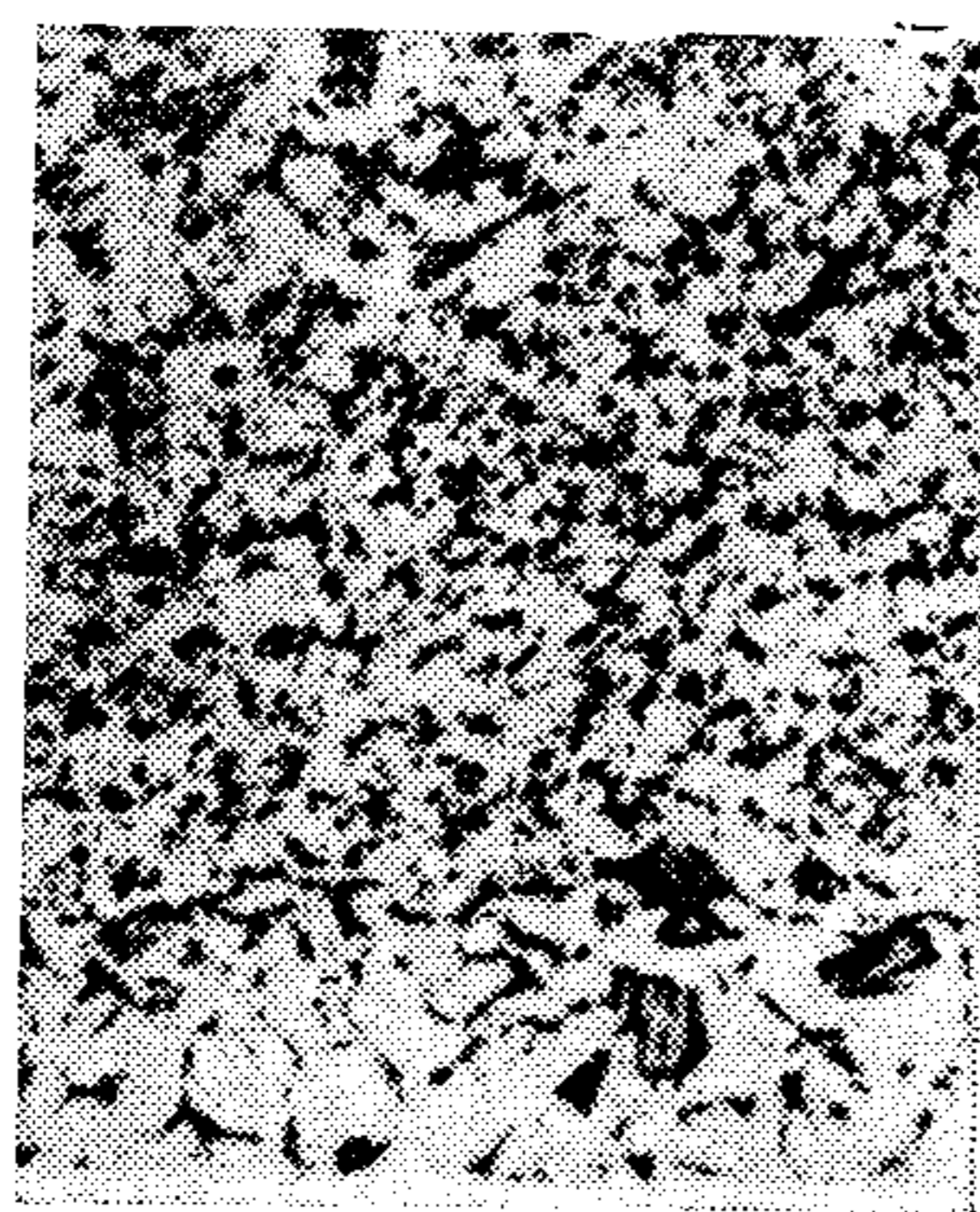


Рис. 140. Покрытие из сплава типа стеллит после напыления с последующим оплавлением ($\times 100 \times 4/5$)



Рис. 141. Покрытие из сплава колмоной № 6 после напыления и последующего оплавления ($\times 500 \times 3/4$):
1 — карбид хрома; 2 — борид хрома

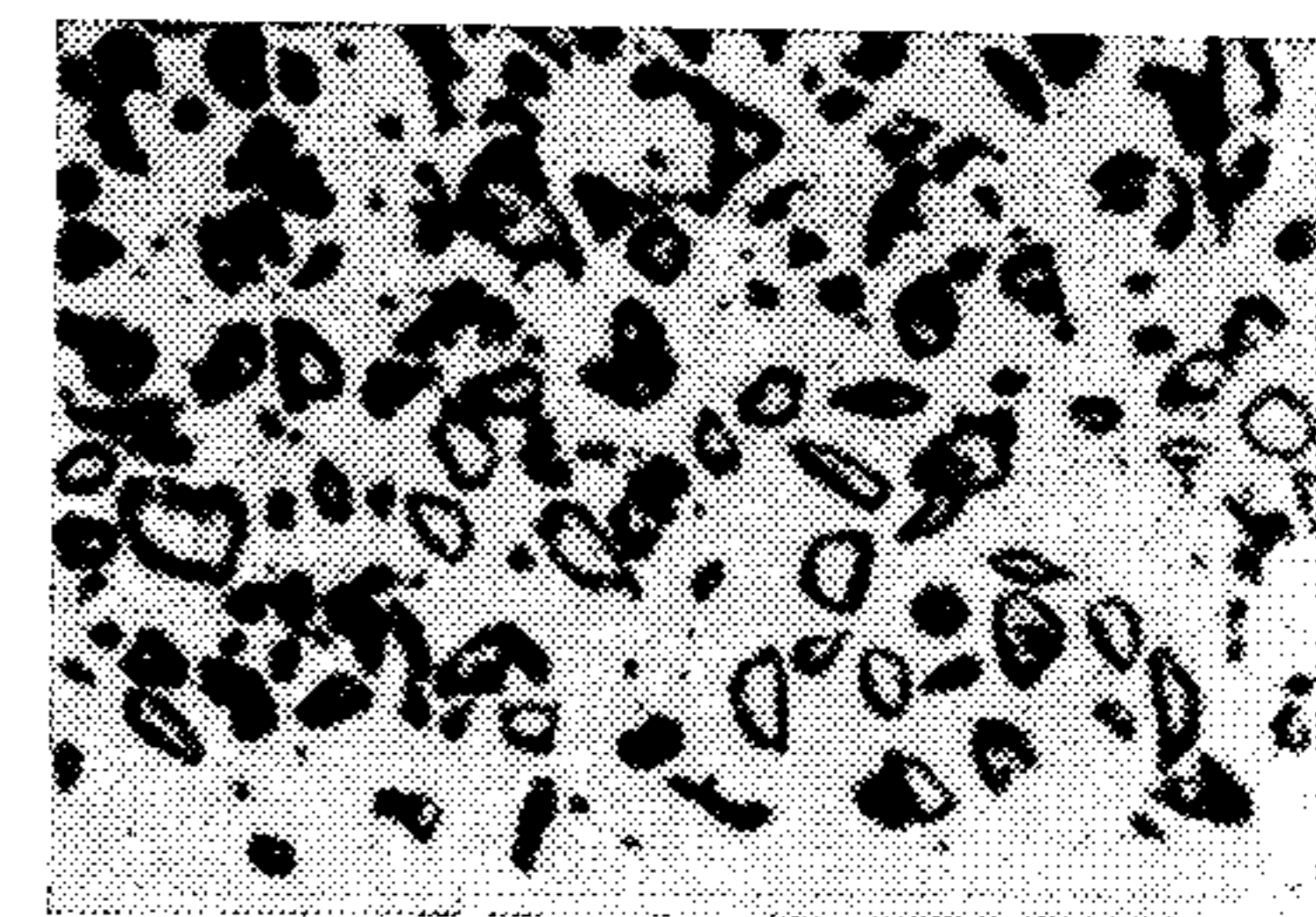


Рис. 142. Покрытие из сплава колмоной № 75 с добавлением карбида вольфрама после напыления и оплавления ($\times 400 \times 3/4$)

лом в связи с тем, что тонкий слой последнего во время термообработки также переходит в расплавленное состояние.

На рис. 139 и 140 приведены микроструктуры шлифов с покрытием из сплава SF12 типа стеллит в состоянии после напыления и последующего оплавления соответственно [34]. Если в состоянии после напыления видны оксиды и многочисленные поры на границах между частицами, то после оплавления покрытие имеет плотную структуру, свободную от пор, при полном сплавлении с основным металлом.

На рис. 141 показана микроструктура покрытия, нанесенного сплавом колмоной № 6 в состоянии после его оплавления [35, 36]. Основу структуры составляет твердый раствор никеля и хрома, в котором образовались сложные эвтектические структуры. Произошло соединение углерода и бора с хромом, что привело к образованию карбидов и боридов хрома. Дисперсия кристаллических частиц карбида и борида хрома повышает износостойкость покрытия. Сплав никеля с хромом придает покрытию стойкость к окислению. На участках карбида хрома, показанных на рис. 141 (позиции 1, 2), микротвердость находится в пределах $HV 2100—2900$.

На рис. 142 показана микроструктура покрытия из колмоной № 75 с добавлением порошка карбида вольфрама после оплавления. Карбид вольфрама равномерно распределен в материале покрытия, представляющего собой никелевый сплав (светлые участки), содержащий бориды хрома. Средняя твердость такого покрытия $HRC 54—59$ [37].

ПРАКТИКА НАПЫЛЕНИЯ

Напыление как процесс ударного осаждения нагретых до плавления частиц на поверхности основного металла включает следующие операции: предварительная обработка поверхности основного металла для обеспечения хорошей адгезии частиц напыляемого материала; напыление; последующая обработка покрытия, осуществляемая по необходимости и включающая термообработку и уплотнительную обработку термическим или иным способом; чистовая отделка поверхности покрытия.

13.1. ПОДГОТОВКА К НАПЫЛЕНИЮ

Предварительная обработка поверхности основы относится к числу важнейших факторов, определяющих прочность сцепления напыленного покрытия с основным металлом. Адгезия покрытия возникает под действием ряда механизмов, из которых определяющее значение для многих покрытий имеет механическое сцепление напыляемого материала с поверхностью основы. Следовательно, для того чтобы напыляемые частицы, которые ударяются и деформируются об основу, прочно сцеплялись с неровностями поверхности, основа должна быть достаточно шероховатой. В тех случаях, когда адгезия покрытия существенно зависит от сплавления напыляемого материала с материалом основы или от образования химических соединений в переходной зоне, предварительная обработка изделия должна включать очистку поверхности. Предварительная обработка поверхности изделия для придания ей шероховатости — важная мера увеличения площади поверхности основы и создания большей активности основы.

Для удаления с поверхности жиров и масел широко используют промывку растворителями, например бензолом, пиробензолом, трихлоропреном, перхлоропреном, парами трихлорэтилена и т. п.

Для снятия с поверхности изделия оксидной пленки изделия подвергают дробеструйной или пескоструйной обработке с использованием стальной дроби, кварцевого и глиноземного песка.

Для придания шероховатости поверхности основы используют следующие основные способы обработки [1]: 1) дробеструйную или пескоструйную обработку; 2) механическую обработку поверхности; 3) нанесение на поверхность изделия подслоя материала, об-

ладающего высокой адгезией к основному металлу (например, молибдена или алюминиды никеля).

Для придания поверхности изделия шероховатости наиболее широко применяют дробеструйную (пескоструйную) обработку, преимущество которой связано с возможностью равномерной обработки больших площадей.

Дробеструйную (пескоструйную) обработку осуществляют в двух вариантах: нагнетательную, при которой дробь (песок) направляют на обрабатываемую поверхность в струе сжатого воздуха, и инжекционную путем всасывания дроби (песка) из бункера (японский промышленный стандарт Н9301—1977).

Кроме того, применяют центробежную дробеструйную (пескоструйную) обработку путем подачи дроби (песка) во вращающуюся с большой скоростью крыльчатку, благодаря чему дробь разгоняется и под действием центробежных сил сбрасывается на обрабатываемую поверхность изделия. Центробежный способ особенно ценен для обработки изделий на конвейерах производственных линий.

В качестве абразивных материалов используют стальную дробь (крошку), дробь отбеленного чугуна, силикатный песок, речной песок, кремний, гранит, шлак, плавленный глинозем, карбид кремния и другие виды материалов в форме угловатых частиц.

При обработке одним соплом дробеструйного аппарата с использованием одной и той же обрабатывающей среды производительность процесса обдувки возрастает при повышении давления сжатого воздуха. Эффективность обработки повышается при увеличении размера дроби (частиц песка), однако при этом возрастает шероховатость обрабатываемой поверхности. Малый размер частиц абразива обеспечивает небольшую шероховатость. На практике обработку поверхности материала изделий осуществляют смесью крупного и мелкого абразивного материала, чтобы полнее использовать преимущества той и другой фракции.

Японский промышленный стандарт Н9301—1977 определяет размер абразивных материалов для придания шероховатости поверхности основного металла перед напылением алюминием и цинком. В практике технологии дробеструйной обработки руководствуются различными нормами на расход и давление сжатого воздуха, диаметр сопла дробеструйного устройства, расход дроби (песка), марку и фракцию абразивного материала и т. п. Для обработки поверхностей изделий с высокой твердостью (перед напылением керамики) используют глиноземную дробь размером 305—991 мкм [2].

Нанесение покрытия следует начинать вскоре после окончания предварительной обработки поверхности, поскольку длительная выдержка активированной поверхности с большой эффективной площадью сопровождается активным ее окислением, снижающим прочность сцепления покрытия с основным металлом [3].

Шероховатость в виде мелкой винтовой нарезки, мелких канавок и накатки на поверхности валов, цилиндров и других цилинд-

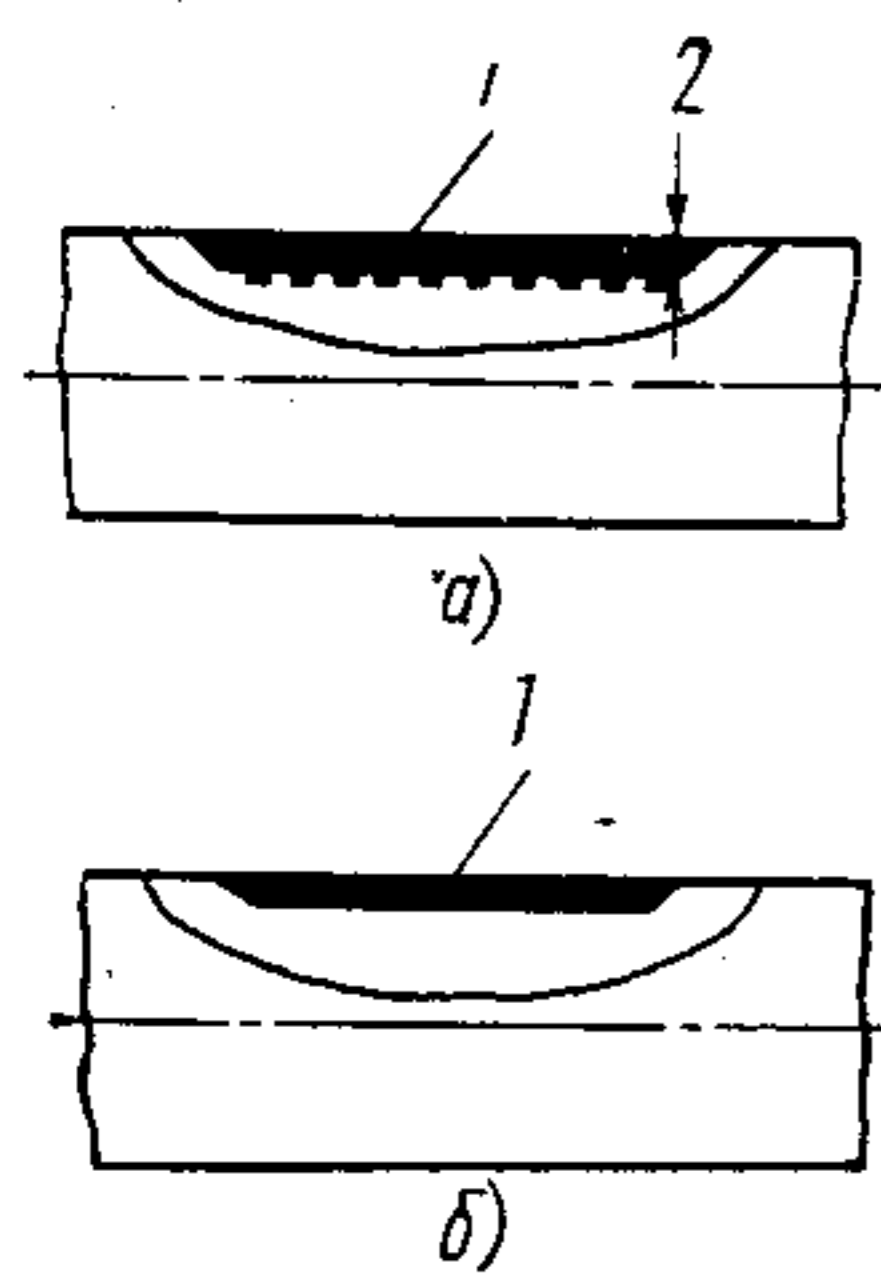


Рис. 143. Проточки:

a — ладенной формы; *б* — клиновидная; 1 — напыленное покрытие; 2 — глубина проточки (см. японский промышленный стандарт H8302 — 1977)

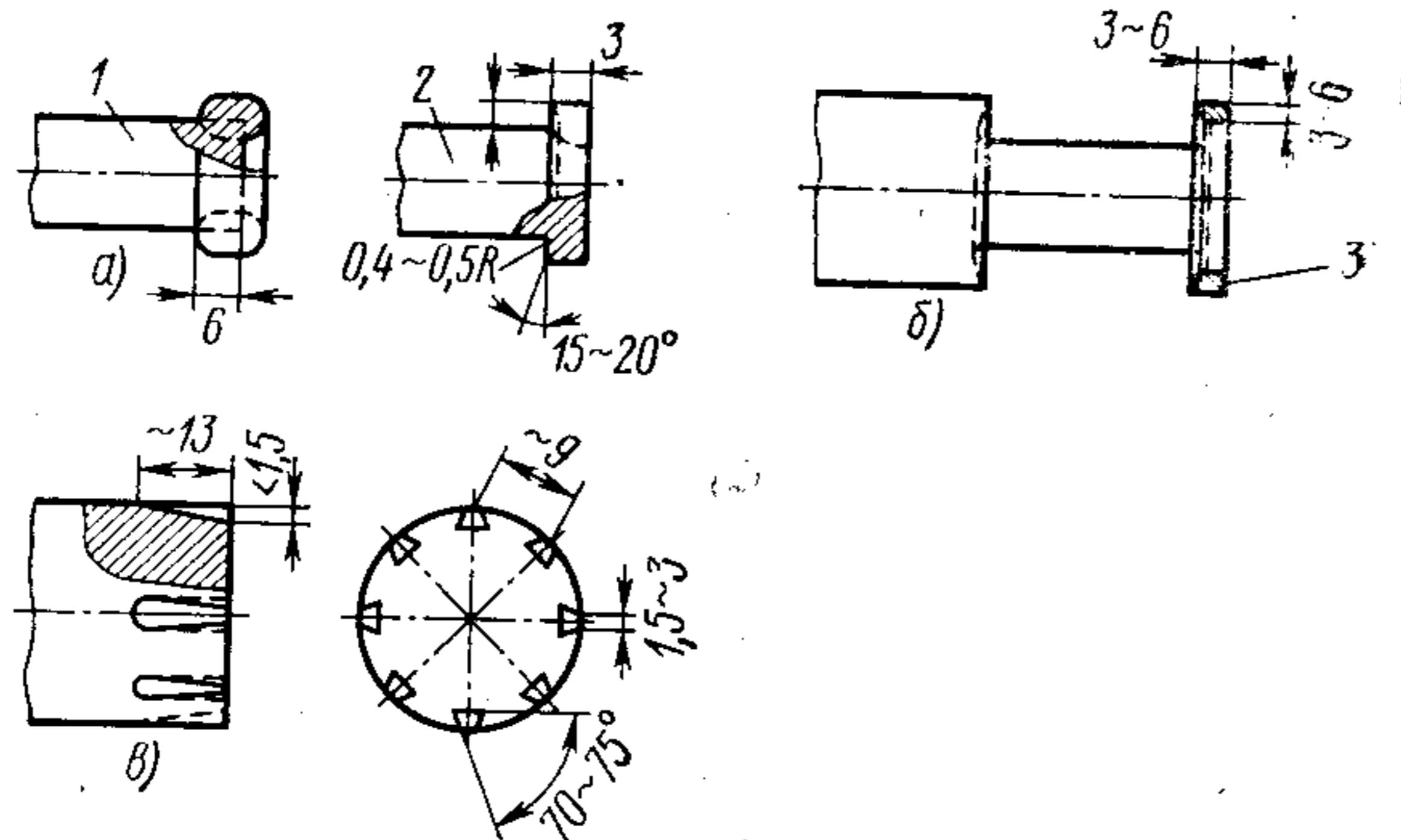


Рис. 144. Специальная концевая разделка валов перед напылением:

a — наплавка концевое утолщения; *б* — напрессовка концевое буртика; *в* — концевое шлифование; 1 — первая операция — наплавка концевое утолщения; 2 — вторая операция — механическая обработка; 3 — напрессовка концевое буртика

рических деталей можно обеспечить методами механической обработки, которую, в частности, применяют как способ предварительной обработки поверхности в случаях необходимости нанесения покрытия большой толщины или получения покрытия, предназначенного для работы в условиях больших нагрузок.

При механической обработке цилиндрических деталей на участках под напыление делают проточку, соответствующую толщине напыляемого слоя, которую затем заполняют напыляемым материалом (рис. 143) [4].

Напыление концевых участков валов возможно только при выполнении специальной концевой разделки одним из показанных на рис. 144 способов. В противном случае произойдет растрескивание или отслаивание покрытия [2].

Путем напыления молибденом или плакированным порошком системы никель — алюминий на поверхности основного металла получают тонкое покрытие с шероховатой поверхностью, на которую можно напылять другой материал. Такие подготовительные покрытия называют обычно подслоем. Молибденовое покрытие и покрытие плакированным порошком широко используют при напылении на углеродистую и коррозионно-стойкую сталь как способ повышения адгезии последующего упрочняющего или коррозионно-стойкого покрытия. Покрытия в качестве подслоя имеют обычно толщину порядка 0,05—0,13 мм.

При напылении алюминиевого покрытия толщиной более 0,2 мм или цинкового толщиной более 0,25 мм на поверхность, предварительно подготовленную дробеструйной обработкой, напыляют подслоем (~0,03 мм) из углеродистой стали, содержание углерода в которой не превышает 0,25%. Такой подслоем позволяет в значительной степени повысить прочность сцепления алюминиевого или

цинкового покрытия с основой, полностью исключая опасность его отслаивания.

Перечисленные выше способы подготовительной обработки поверхности изделия, каждый из которых предназначен для применения в отдельности, в случае их сочетания обеспечивают значительное повышение адгезии покрытий. В частности, механическую обработку иногда сочетают с дробеструйной (пескоструйной); дробеструйную — с напылением тонкого подслоя; механическую обработку также сочетают с напылением подслоя.

13.2. НАПЫЛЕНИЕ

Процесс напыления необходимо осуществлять на режимах, оптимальных для выбранного способа и типа оборудования. Оптимальный режим напыления зависит от многих факторов: характеристик источника нагрева (род рабочего газа, его расход, потребляемая мощность); химического состава, теплофизических свойств, формы, грануляции или диаметра (в случае проволочного и пруткового) напыляемого материала; состава металла основы; размера и формы изделия, состояния его поверхности под напыление, температуры подложки; угла и дистанции напыления и др. В практике напыления следует руководствоваться приведенными ниже общими рекомендациями, касающимися различных сторон процесса напыления.

1. Состояние поверхности металла изделия. Если при визуальном осмотре на поверхности изделия обнаружены следы загрязнений (влага, оксиды, окалина и т. п.), то следует вновь осуществить соответствующую очистку поверхности. После пескоструйной обработки первый слой следует напылять не позднее чем через 4 ч, а общая продолжительность от окончания пескоструйной обработки до завершения процесса напыления покрытия не должна превышать 8 ч.

2. Дистанция напыления. Оптимальное расстояние от среза сопла горелки до поверхности напыления обычно не выходит за пределы 75—250 мм. При малой дистанции напыления создается опасность деформации основного металла под влиянием термических напряжений; когда же расстояние слишком большое, температура и скорость напыляемых частиц снижается, что приводит к образованию рыхлого покрытия и уменьшению прочности сцепления с основой. В конечном счете может произойти отслоение покрытия от основы.

3. Угол напыления. Наибольшая деформация напыляемых частиц при соударении с поверхностью основы происходит, если горелка установлена перпендикулярно к ее поверхности. В случаях, когда невозможно обеспечить этот угол, допускается отклонение от вертикали, но не более чем на 45°. При угле напыления менее 90° несколько снижается качество покрытия.

4. Температура поверхности основного металла в процессе напыления. Перегрев поверхности основного металла в процессе

напыления вызывает снижение прочности сцепления покрытия или становится причиной деформации. Теоретическая температура поверхности основного металла не должна превышать 260°C. При более низкой температуре проводить напыление не рекомендуется, так как напыленное покрытие может отслоиться или растрескаться. В таких случаях рекомендуется предварительный подогрев основного металла до температуры 120—150°C.

5. Равномерность толщины покрытия. Для получения покрытия равномерной толщины желательно, чтобы толщина напыляемого за один проход слоя покрытия не превышала 0,25 мм. Покрытие требуемой толщины следует напылять за несколько проходов.

6. Толщина напыляемого покрытия. При нанесении покрытия необходимо учитывать, что на поверхности основы происходит усадка напыленного слоя [6]. При большой толщине покрытия под действием остаточных напряжений, которые появляются в нем в результате усадки напыленного материала, происходит разрушение контактной зоны и в конечном счете отделение покрытия от основы. При напылении на внутреннюю поверхность труб материалов, имеющих большую усадку, происходит вспучивание покрытия. Поэтому в таких случаях напыляют покрытия минимально допустимой толщины.

Одним из путей предотвращения вспучивания покрытия является предварительный подогрев основы до соответствующей температуры (в диапазоне допустимых температур).

Минимальная толщина покрытия должна включать припуск на обработку после напыления и некоторый допуск на возможный износ. В частности, при восстановлении валов напылением и их диаметре 76—100 мм толщина покрытия должна составлять не менее 0,6 мм [6]. На участках, где необходима запрессовка, независимо от диаметра вала следует напылять покрытия толщиной ~0,13 мм [6].

7. Скорость подачи напыляемого материала. Очень важно, чтобы напыление проходило на оптимально выбранной и поддерживаемой на заданном уровне скорости подачи напыляемого материала. Так, при газопламенном напылении проволокой снижение скорости ее подачи вызывает уменьшение размера частиц и их быстрое охлаждение во время движения от горелки до основного металла. Поэтому теплосодержание соударяющихся с поверхностью частиц меньше, и сцепление их с поверхностью будет плохое. При этом возрастет также интенсивность окисления частиц в период их движения в струе.

При слишком большой скорости подачи напыляемого материала увеличивается длина участка проволоки, на котором происходит расплавление, что может привести к значительному ее окислению в процессе распыления. Это усугубляется увеличением размера частиц до значений, ухудшающих качество напыляемого покрытия.

13.3. ПОСЛЕДУЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Покрытие, полученное после напыления, по своей структуре в значительной степени пористое. Для одних назначений покрытий пористость является полезным свойством, а для других она нежелательна и требует принятия мер по ее ликвидации. Один из способов ликвидации пор — нанесение слоя краски на поверхность покрытия. Находит применение также способ заполнения пор за счет пропитки покрытия специальными составами, а для покрытий, напыленных самофлюсующимися сплавами, проводят оплавление покрытий после их нанесения. Для улучшения механических свойств и термостойкости покрытия их нередко подвергают последующей термообработке.

Окраска. Окраску покрытий проводят в основном для того, чтобы повысить антикоррозионную стойкость покрытий, наносимых на черные металлы. Проникание красителя внутрь пор способствует упрочнению напыленного покрытия при одновременном повышении стойкости самого красителя.

При окраске с целью блокировки пустот и трещин внутри покрытия высокого эффекта достигают при использовании растворов красителей с низкой вязкостью. Такие растворы при их нанесении на поверхность покрытия легко проникают вглубь за счет капиллярного эффекта. Поэтому предпочтение следует отдавать красителям, которые при низкой вязкости отличаются высоким содержанием твердых фракций. Быстро высыхающие краски использовать не рекомендуется, поскольку они не способны к глубокому прониканию внутрь покрытий.

Для окраски напыленных покрытий используют хлорвиниловые [7], эпоксидные, фенольные и другие красители, к выбору которых необходимо подходить со всей серьезностью, поскольку ошибки в этом вопросе могут привести к непредвиденным последствиям.

Для обработки напыленных покрытий, осуществляемой с целью повышения их жаростойкости путем пропитки пор, используют кремнийорганические соединения [5]. В состав средства для пропитки пор входят следующие компоненты: 5% алюминиевого порошка, 15% кремнийорганической смолы и 80% растворителя. В качестве растворителей используют спирты, ароматические углеводороды или эфиры. Термическая диффузионная обработка алюминиевых покрытий рассмотрена в предыдущей главе [5].

Для пропитки пор керамических покрытий в случае использования их при низких температурах применяют воск и жидкие фенольные смолы, а при аналогичной обработке покрытий, предназначенных для работы при температуре 100—290°C, — эпоксидные и фенольные смолы. Покрытия, пропитанные силиконовыми смолами, выдерживают ускоренные коррозионные испытания в атмосфере, заполненной парами соленой воды, при температуре 480°C [6].

Оплавление покрытий из самофлюсующихся сплавов. С целью ликвидации пор, повышения адгезии к основному металлу и проч-

ности сцепления между частицами покрытия из самофлюсующихся сплавов последние подвергают уплотнительной термообработке, осуществляемой по рассматриваемым ниже вариантам.

1. Оплавление газовой горелкой. Этот способ обработки, имеющий наиболее широкое применение, включает нагрев покрытия спокойным нейтральным или восстановительным ацетилено-кислородным или пропано-кислородным пламенем. Нагрев рекомендуется осуществлять постепенно, после предварительного подогрева всей детали, избегая резкого перехода покрытия в расплавленное состояние. При быстром нагреве возникает опасность отслоения покрытия из-за значительной разницы коэффициентов линейного расширения основы и напыленного слоя.

Температуру нагрева не следует повышать до значений, намного превышающих температуру плавления покрытия. Оптимальной температурой, при которой происходит оплавление покрытия, принято считать температуру, когда поверхность покрытия становится зеркальной и в ней отражается сопло нагревательной горелки. При перегреве покрытия не исключены его подтеки, вызывающие в данном месте локальное снижение толщины; после охлаждения этой зоны на покрытии возникают усадочные раковины, придающие поверхности покрытия губчатый характер. При этом заметно снижается твердость покрытия [8].

2. Оплавление в печи с контролируемой атмосферой. Оплавление покрытий можно осуществлять в печи с восстановительной атмосферой, создаваемой газами при сгорании древесного угля или аммиаком, или в печах с нейтральной атмосферой, для образования которой используют водород или азот. При длительном нагреве составляющие основы начинают диффундировать в покрытие, что может снизить его качество из-за неблагоприятного изменения состава.

3. Высокочастотный индукционный нагрев. Этот способ применяют в основном в массовом производстве при изготовлении деталей простой формы. Низкая пластичность самофлюсующихся сплавов и высокий коэффициент линейного расширения создают опасность растрескивания покрытия во время охлаждения. Если основной металл представляет собой углеродистую сталь с содержанием менее 0,25% С, ферритную коррозионно-стойкую сталь SUS38, аустенитную коррозионно-стойкую сталь SUS27 или иную сталь, при охлаждении которой исключены мартенситные превращения, охлаждение изделий после оплавления тонкого покрытия не требует принятия каких-либо мер. Вместе с тем быстрое охлаждение таких же изделий с покрытием большой толщины сопряжено с опасностью растрескивания покрытия. Для предупреждения этого явления охлаждение желательнее проводить под слоем теплоизоляционного материала (минеральная вата, зола после сжигания соломы и т. п.). Во избежание образования трещин при оплавлении покрытий, нанесенных на углеродистые стали с содержанием 0,25—0,4% С, перед оплавлением их необходимо подогреть до температуры 250—370°C, а после оплавления медленно охладить.

Причина растрескивания покрытия на изделиях из стали, охлаждение которой сопровождается мартенситными превращениями, состоит в следующем. Если в покрытии на протяжении всего периода охлаждения происходит только усадка (сужение), то процесс охлаждения основного металла в аустенитной области до точки M_s сопровождается началом мартенситных превращений и соответствующим расширением основного металла. Растрескивание покрытия является результатом противоположных объемных изменений: усадка покрытия сочетается с расширением основного металла. Растрескивание можно предотвратить путем изотермического отжига, режим которого следует выбрать по диаграмме распада аустенита (S-образной диаграмме). Для того чтобы в процессе охлаждения системы основа — покрытие, нагретой выше точки фазового превращения A_{c3} , аустенит за минимальный период времени перешел в феррит, необходимо покрытие охладить до температуры, соответствующей наибольшей скорости процесса аустенитного превращения, затем выдержать (выдержка зависит от состава стали и обычно составляет 0,5—2 ч) и лишь после этого охладить до нормальной температуры. Если температура выдержки несколько отклонится от указанной, время превращения резко возрастет. Поэтому изотермическую выдержку изделий при

13.1. Дефекты и причины их возникновения в покрытиях, напыленных самофлюсующимися сплавами с последующим оплавлением покрытия

Дефекты	Основные причины
Газовые раковины	Выделение газов при нагреве основного металла в процессе оплавления, применение основного металла, склонного к выделению газов при нагреве: 1) автоматная сталь со сравнительно высоким содержанием серы; 2) некачественные отливки и участки некачественных сварных швов с высоким содержанием газа; 3) наличие загрязнителей после пескоструйной обработки (жиры, масла и т. п.)
Вздутия	Плохая адгезия покрытия к основному металлу: 1) на участках неудовлетворительной пескоструйной очистки; 2) на загрязненных участках, не поддающихся пескоструйной очистке; 3) выделение газа из основного металла
Трещины	Различие коэффициентов линейного расширения (сужения) в процессе оплавления покрытия и основного металла: 1) недостаточный или неравномерный предварительный нагрев основного металла; 2) недостаточно медленное охлаждение после оплавления; 3) значительное расширение основного металла, например, под влиянием закалки (фазовые превращения)
Пригар	Перегрев покрытия при оплавлении, связанный: 1) с резким изменением толщины основного металла на отдельных участках; 2) с неправильной корректировкой датчиков температуры и т. п.
Брызги	Дефекты наплавленного покрытия, возникшие до его сплавления: наличие конгломератов частиц напыляемого материала на участках неудовлетворительной адгезии покрытия к основному металлу (по разнообразным причинам)

заданной температуре осуществляют в печах или соляных ваннах, где достаточно строго контролируется температура среды.

В табл. 13.1 приведены виды дефектов и причины их возникновения в покрытиях, напыленных самофлюсующимися сплавами, после оплавления покрытия [9].

13.4. ЧИСТОВАЯ ОБРАБОТКА ПОКРЫТИЙ

В состоянии после напыления размер изделий со слоем покрытия не имеет достаточной точности, а сама поверхность получается неровной и относительно шероховатой. Поэтому при напылении дают обычно припуск на последующую механическую обработку, которую осуществляют резанием или мокрым шлифованием.

При необходимости пропитки пор ее желательно проводить до чистовой механической обработки покрытия, чтобы исключить попадание в поры загрязнений: охлаждающей жидкости, мелкой стружки и т. п.

Покрытия из углеродистых и коррозионно-стойких сталей. Для обработки покрытий из углеродистых и коррозионно-стойких сталей можно использовать быстрорежущий и твердосплавный инструмент. В настоящее время нет точных или общепринятых данных по скорости резания, геометрии режущего инструмента и другим параметрам обработки покрытий резанием, которыми необходимо руководствоваться при обработке наименьших покрытий.

Задача получения хорошей отделки при шлифовании покрытий требует тщательного выбора абразивных инструментов и режима шлифования. Обычно для этой цели используют сравнительно крупнозернистые шлифовальные камни с низким содержанием связующих. Окончательное шлифование осуществляют при особо малой глубине резания. Шлифование в жестком режиме может вызвать поверхностное растрескивание покрытия.

Покрытия из самофлюсующихся сплавов. Практически все покрытия этого класса подвергаются обработке резанием с помощью твердосплавных инструментов, хотя в большинстве случаев практикуют мокрое шлифование. Для этого в зависимости от вида покрытия (сплава) используют керамические шлифовальные круги из оксида алюминия или карбида кремния. Особо твердые покрытия шлифуют высокостойкими алмазными кругами, обеспечивающими удовлетворительную отделку поверхности.

Притирка и другие способы особо точной обработки обеспечивают более качественную отделку, чем шлифование (шероховатость 0,5 мкм). Притирку осуществляют пастой из глинозема, карбида кремния или алмаза с использованием чугунных притиров. Для высокоточной чистовой обработки используют шлифовальные круги из глинозема и карбида кремния [10].

Керамические покрытия. Покрытия этого класса подвергают черновой и прецизионной обработке [11]. Для черновой обработки используют шлифовальные круги умеренной твердости, изготавливаемые из карбида кремния с размером частиц 175 мкм с использо-

ванием резиновой связки. Иногда используют круги из более мелко-го карбида кремния с размером частиц 1,75—49 мкм или алмазно-керамические круги (Н—L). Во избежание разогрева покрытия шлифование осуществляют мокрым способом в режиме ограниченной скорости вращения круга.

Прецизионное шлифование осуществляют алмазными кругами (L или N), изготовленными из крупнозернистого (175; 147 и 125 мкм), среднезернистого (104—62 мкм) и мелкозернистого (50—14 мкм) сырья с резиновой связкой. В табл. 13.2 приведена шероховатость H_{rms} (средняя квадратичная шероховатость) для поверхностей, подвергнутых прецизионному шлифованию кругами разной зернистости.

При мокром шлифовании используют охлаждающую воду с добавлением 2% ингибитора коррозии [11].

Шлифование алмазными кругами зернистостью 147—27 мкм осуществляют при глубине резания в пределах 2,5—12,5 мкм в условиях подачи круга при поперечных колебаниях с амплитудой 1—2 мм. Окружная скорость круга находится в пределах 5—33 м/с.

Особо чистую отделку поверхностей (шероховатость не более 0,2 мкм) осуществляют притиркой с помощью пасты (табл. 13.3).

13.2. Шероховатость шлифованных поверхностей керамических покрытий

Зернистость шлифовальных кругов, мкм	H_{rms} , мм
147	4—6
323	2—3
646	1—2

13.3. Шероховатость поверхностей керамических покрытий, подвергнутых притирке

Номер пасты	Величина зерна алмазной пасты, мм	Эквивалентная крупность алмазной пасты, мкм	H_{rms} , мм
1	0—2	20 580	0,03
3	1—5	11 760	0,05
6	4—8	4 410	0,08—0,13

Покрытия, нанесенные смесью карбида вольфрама с кобальтом (12 или 20%), шлифуют камнями из нитрида бора при окружной скорости 60 м/с [12].

13.5. ДЕФЕКТЫ И МЕРЫ ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

К числу дефектов покрытий относятся отслоение или вздутие покрытия из-за его плохой адгезии к основному металлу, трещины, сплошная пористость, низкая твердость и неоднородность структуры. При возникновении в покрытии дефектов необходимо вторичное напыление, для чего покрытие с дефектных участков полностью удаляют вплоть до поверхности основного металла и производят

СВОЙСТВА НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ И ИХ ИСПЫТАНИЯ

полный цикл обработки, включая очистку поверхности и предварительную ее обработку для придания шероховатости. Участки реставрации должны быть нагреты газовым пламенем до температуры не ниже 540°С. После окончания реставрации проводят нагрев по всей поверхности покрытия для выравнивания температуры, а затем изделие медленно охлаждают [10]. В случае невозможности удаления старого покрытия путем простого соскабливания прибегают к механической обработке или химическому травлению погружением в агрессивную среду после наложения защитных масок на участки, не подлежащие удалению покрытия. В частности, химическое травление многократным погружением с использованием масок применяют для удаления покрытий с жаропрочных облицовок камер сгорания реактивных двигателей, отличающихся особой сложностью формы при большой толщине напыляемых покрытий. В табл. 13.4 приведены данные по удалению покрытий способом химического травления [13].

При повторном напылении необходимо соблюдать осторожность, чтобы не расплавить или не нанести какой-либо вред старому покрытию на участках стыковки с ним [14].

13.4. Удаление напыленных покрытий способом химического травления

Основной металл	Напыляемые материалы							
	WC*	CrC*	WC	CrC	Mo	Co	Ni—Al	Ni—C
Дисперсионно-упрочняемая коррозионно-стойкая сталь	AB CD	ABC	AB CD	ABC	—	A	D	DE
Аустенитная коррозионно-стойкая сталь	ACD	AC	ACD	AC	—	A	D	DE
Низколегированная сталь	D	—	D	—	—	—	D	D
Кобальтовые сплавы	D	—	CD	—	—	—	D	DE
Титановые сплавы	D	—	D	—	F	—	D	D
Мартенситная коррозионно-стойкая сталь	ACD	AC	ACD	AC	—	A	D	DE
Никелевые сплавы	ACD	AC	ACD	AC	—	A	D	DE

* Покрытия, напыленные детонационным способом.

Примечание. А — травление в соляной ванне Na₂CO₃; В — в соляной ванне NaNO₃; С — в соляной ванне для удаления окислов; D — в растворе для удаления никелевого покрытия; E — в растворе HNO₃; F — в растворе HNO₃·H₂SO₄.

Напыленные покрытия, служащие для защиты поверхности деталей машин от износа или коррозии, должны обладать требуемыми прочностью сцепления с подложкой, износостойкостью, жаростойкостью и теплоизоляционными свойствами, коррозионной стойкостью и другими свойствами в зависимости от назначения.

Для напыления используют самые разнообразные материалы: металлы и сплавы, керамику и пластмассы. При напылении одним и тем же материалом уровень свойств получаемого покрытия в значительной мере зависит от режима и техники напыления. Напыленное покрытие представляет собой тонкий слой, имеющий сцепление с основным металлом и отличающийся высокой пористостью, требует специальных способов оценки свойств, которые к настоящему времени не достигли статуса общепринятых методов измерений или испытаний. В связи с этим в опубликованных по данной проблеме работах описаны разнообразные способы определения свойств, результаты которых не всегда поддаются прямому сопоставлению.

14.1. ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ

Адгезия покрытия к основному металлу обеспечивается преимущественно механическим сцеплением, тогда как сплавление, взаимная диффузия и физическая связь вандерваальсовыми силами служат обычно дополнением к механическому сцеплению. Это значит, что прочность сцепления покрытия с основой определяется величиной и характером шероховатости поверхности основного металла.

При определении прочности сцепления напыленных покрытий необходимо оценить степень достоверности выбранных лабораторных методик испытаний, поскольку результаты испытаний различными методами значительно различаются.

Растяжение. Для определения прочности сцепления покрытия с основным металлом применяют следующие способы испытаний, связанные с применением растягивающей или сходной с ней нагрузки.

1. Испытание на прочность сцепления вытягиванием штифта (штифтовая проба). Как видно на рис. 145, в цилиндрическое или

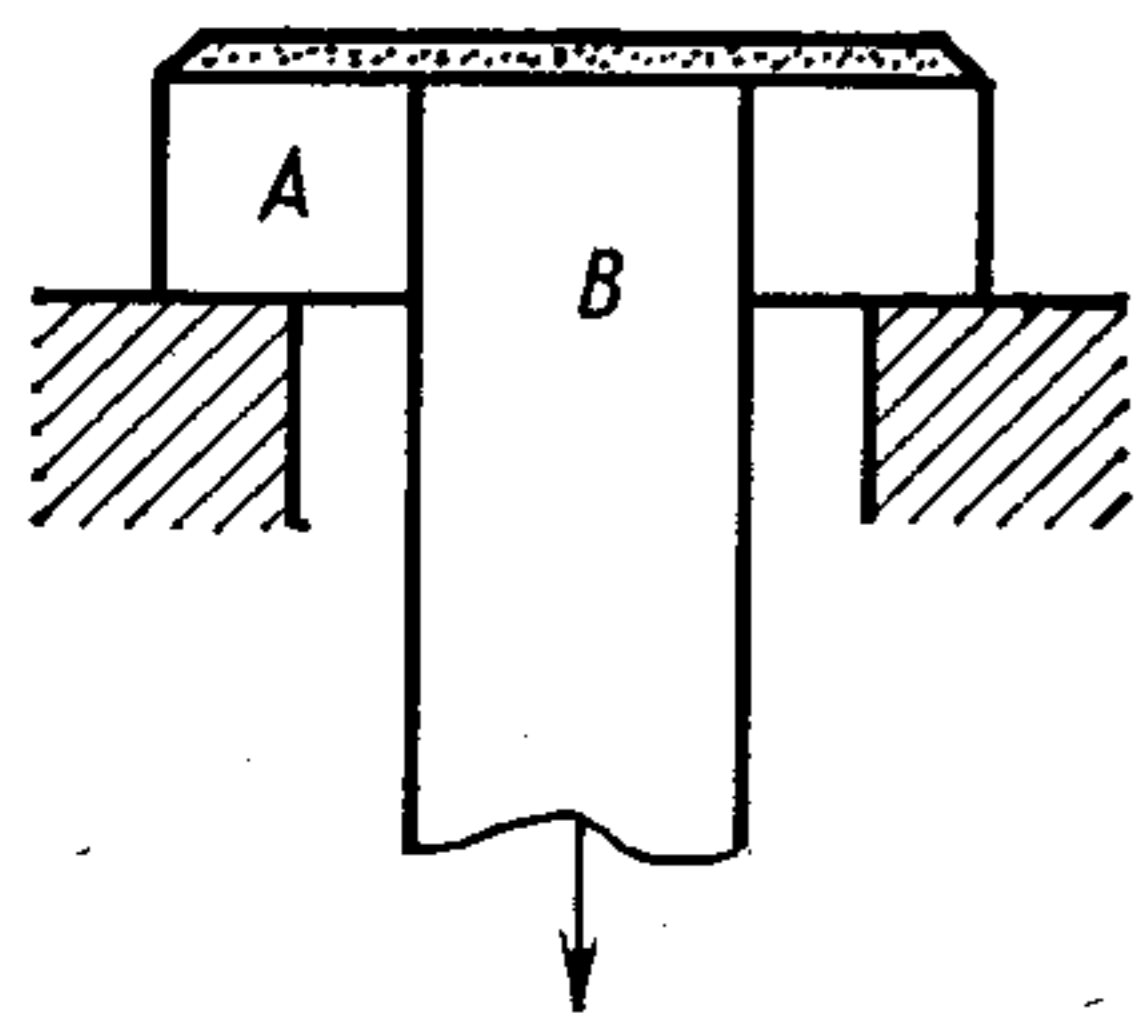


Рис. 145. Схема испытания на прочность сцепления вытягиванием штифта (штифтовая проба)

коническое центральное отверстие, выполненное в основном металле *A*, вставляют штифт *B* таким образом, чтобы торцовая поверхность штифта и поверхность основы находились в одной плоскости. После сборки и предварительной обработки образцов для придания им шероховатости на верхнюю поверхность собранных образцов напыляют покрытие. При испытании основу *A* устанавливают на упоры, а штифт *B* вытягивают вниз. Отношение нагрузки, при которой происходит отрыв штифта от покрытия, к площади его напыленного торца характеризует прочность сцепления покрытия с основой.

Недостатком этого метода испытаний является то, что даже при высокой точности изготовления образцов по скользящей посадке между поверхностью штифта и основой образуется микрозазор, на котором происходит концентрация напряжений, приводящих к разрушению покрытия при более низких нагрузках. Поэтому такой метод определения прочности сцепления дает заниженные значения.

2. Испытание на прочность сцепления на отрыв с использованием клея (клеевая проба). Торцовую поверхность цилиндрического образца *A* (основного металла) подвергают предварительной обработке для придания шероховатости, а затем напыляют на нее требуемое покрытие. К поверхности покрытия приклеивают цилиндрический образец *B*, диаметр которого равен диаметру образца с покрытием, и проводят испытание на растяжение (рис. 146). Прочность сцепления в таком случае определяется как частное от деления разрушающей нагрузки на площадь торцовой поверхности. Толщина напыленного покрытия при этом виде испытаний должна быть не менее 0,25 мм и иметь равномерную толщину по всей

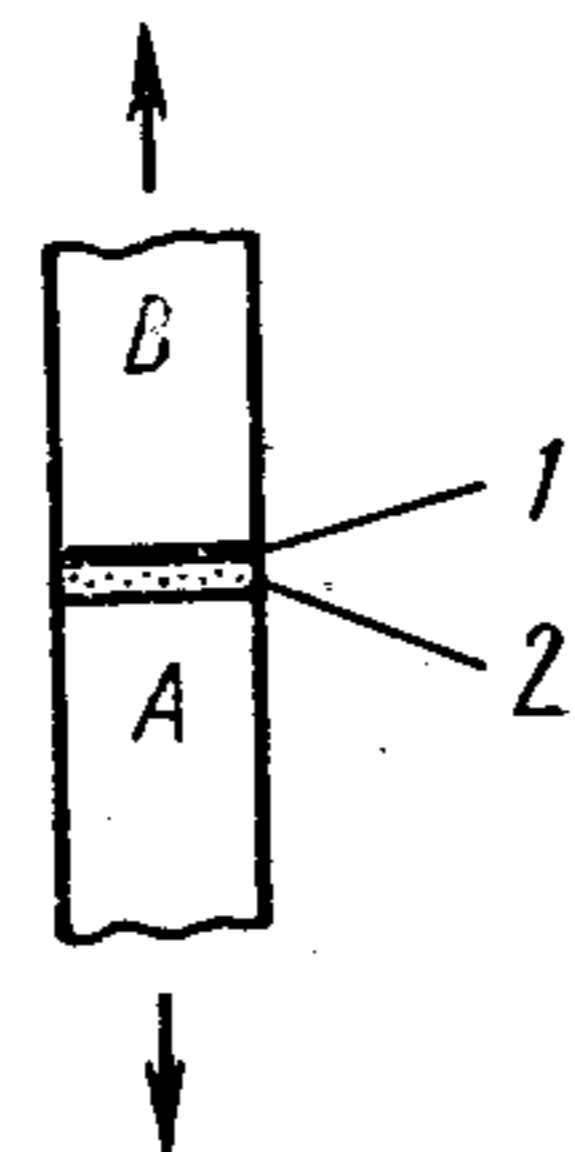
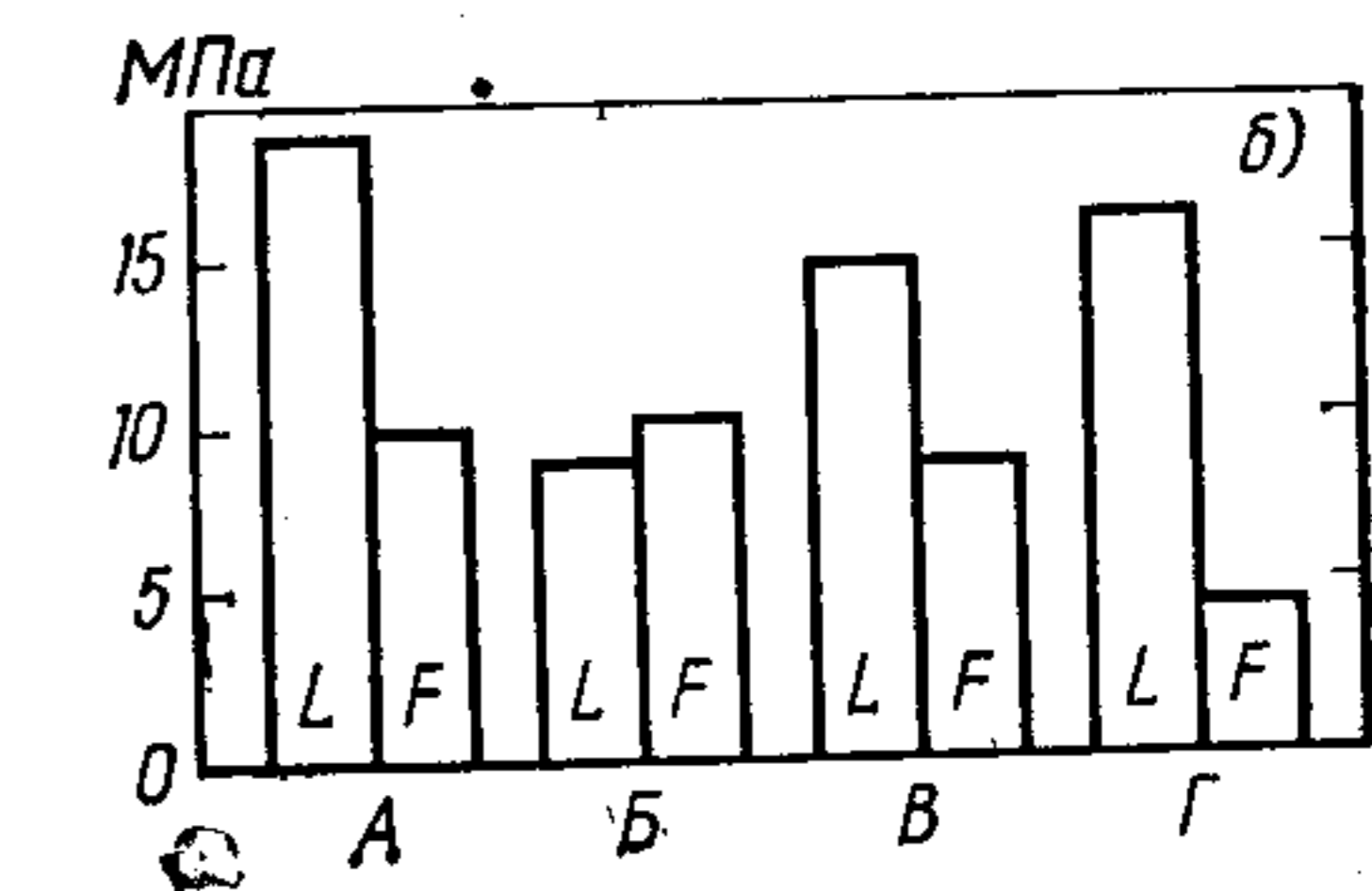
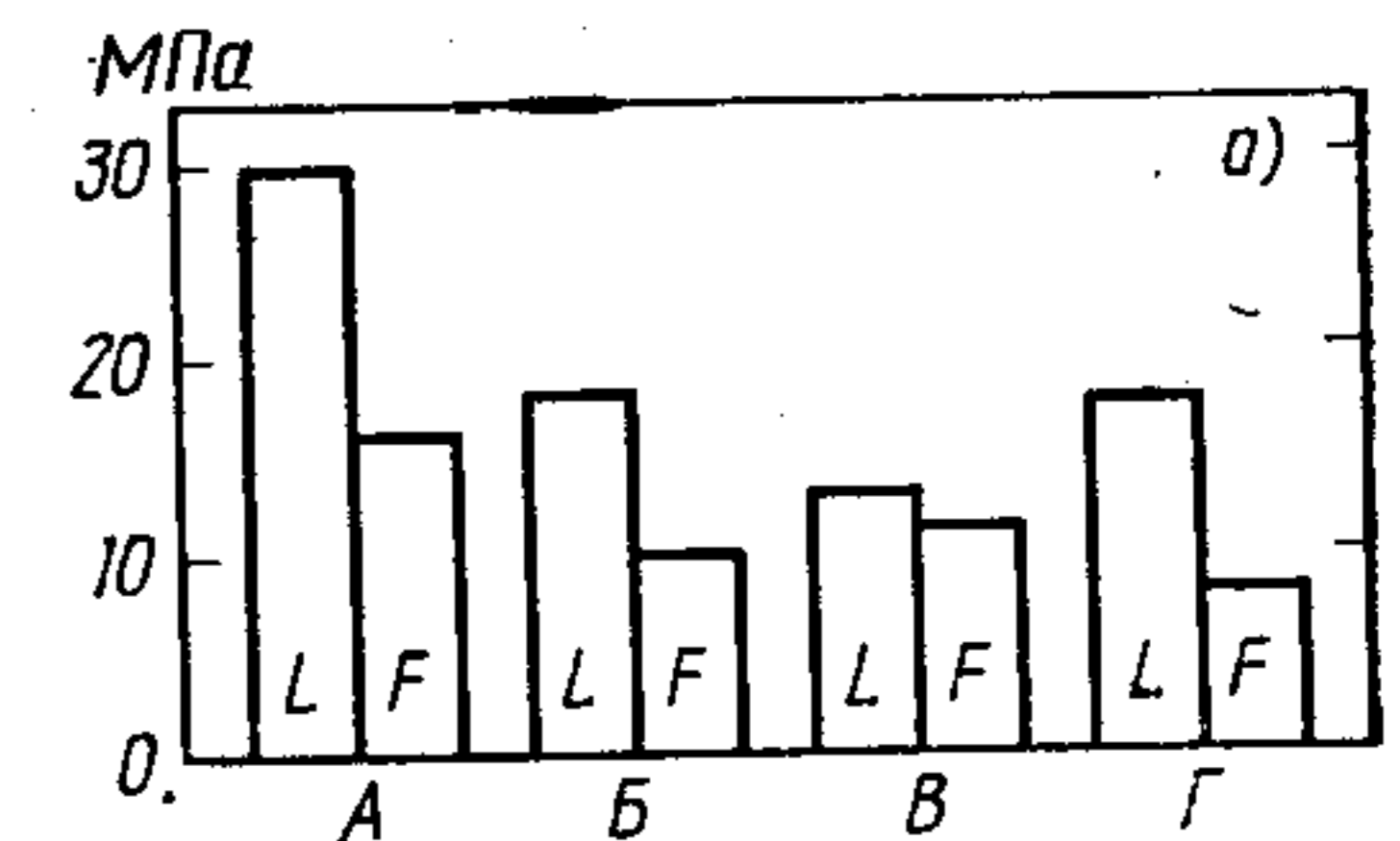


Рис. 146. Схема испытания на прочность сцепления с использованием клея (клеевая проба):

1 — клей; 2 — покрытие

Рис. 147. Прочность сцепления (МПа) покрытий из углеродистой стали и алюминия, нанесенных на основной металл разного состава способами дугового и газопламенного напыления:

a — покрытие углеродистой сталью; *в* — алюминиевое покрытие; *A* — углеродистая сталь; *B* — алюминий; *В* — электролитическая медь; *Г* — цинк



поверхности. В качестве клея используют эпоксидную смолу. Диаметр образца в большинстве случаев не превышает 10—40 мм*.

Этот метод испытаний применим только для покрытий, прочность сцепления которых с основой не превышает прочности клея. При определении прочности сцепления этим способом получают данные, превышающие результаты испытаний на прочность сцепления вытягиванием штифта.

На рис. 147 показаны данные по прочности сцепления покрытий из углеродистой стали и алюминия, нанесенных на основной металл разного состава способами дугового (*L*) и газопламенного (*F*) напыления (испытание на растяжение с использованием клея, диаметр образца 40 мм) [2]. Дуговое напыление обеспечивает более высокую прочность сцепления во всех случаях, кроме одного (алюминиевое покрытие на алюминии).

В табл. 14.1 приведены данные по прочности сцепления покрытий, полученных способом газопламенного напыления молибдено-

14.1. Твердость, пористость и прочность сцепления покрытий, полученных газопламенным методом напыления молибденовой проволоки при разных режимах

Режим напыления			Поверхностная твердость <i>HV</i> (нагрузка 50 г)	Пористость, %	Прочность сцепления, МПа
Скорость подачи проволоки, мм/мин	Расстояние от среза сопла до поверхности, мм	Давление воздуха, МПа			
200	100	34,3	841—927	2	21,8
340	100	34,3	746—800	5,3	25,1
520	100	34,3	667—713	4,2	24,1
340	100	45,1	781—795	5,2	21,4
340	150	34,3	720—772	—	21,6

Примечание. Разрушение во всех случаях происходило на границе между покрытием и основным металлом.

* В японском промышленном стандарте H8664—1977 для испытаний напыленных (сталь) покрытий предусмотрен образец \varnothing 40 мм, а в стандарте американского общества по испытаниям материалов (C633 69 [1]) — образец \varnothing 25,4 мм.

14.2. Прочность сцепления покрытий, нанесенных плазменным методом кермета на основе карбида титана

Содержание карбида титана, %	Твердость HV (нагрузка 100 г)	Пористость, %	Средняя прочность сцепления, МПа	
			на алюминии	на коррозионно-стойкой стали
50—60	885	11	54,9	48,05
60—70	897	11	52,9	47,7
20—25	729	1	59,8	—

вой проволоки на углеродистую сталь (испытание на растяжение с использованием клея, образец 10×10 мм). Прочность сцепления в таблице сопоставлена с данными по твердости при различных режимах газопламенного напыления [3].

При плазменном напылении никелевым сплавом, нихромом и механической смесью никелевого сплава с порошком карбида вольфрама (50%) на поверхность низкоуглеродистой стали, подвергнутой дробеструйной обработке, получают покрытия, прочность сцепления которых составляет соответственно 11,6; 9,8 и 20,6 МПа (штифтовая проба, диаметр штифта 10 мм) [4]. Разрушение практически всегда происходит внутри покрытия.

В табл. 14.2 приведены данные по прочности сцепления, твердости и пористости покрытий, полученных способом плазменного напыления карбида титана (керметом системы карбид титана — сталь) на алюминий (AMS * 4220) и коррозионно-стойкую сталь [5]. Прочность сцепления определяли путем испытаний на растяжение с использованием клея по стандарту С633 американского общества по испытаниям материалов. Прочность сцепления покрытий в первую очередь зависит от вида основного металла, его твердости и шероховатости поверхности. В табл. 14.3 приведены данные по

14.3. Прочность сцепления покрытий из карбида титана на различных материалах с разными твердостью и шероховатостью поверхности

Основной металл	Твердость	Средняя шероховатость поверхности, мкм	Средняя прочность сцепления, МПа
Алюминий AMS4220	HV 75	10	54,9
Сталь 1018*	HRB 90	6—7	51,9
Серый чугун	HRB 95	7	50,01
Сталь 1045*	HRC 25	6	54,9
Сталь 1080*	HRC 27	5—6	43,1
Коррозионно-стойкая сталь (12% С)	HRB 90	6—7	43,1

* Стали по одному из промышленных стандартов США. (Прим. пер.).

* AMS — стандарты на авиаматериалы (США). (Прим. пер.).

14.4. Прочность сцепления различных покрытий, напыленных плазменным способом

Напыляемый материал	Рабочий газ	Твердость HV*	Шероховатость поверхности, мкм			Прочность сцепления**, МПа
			после напыления	после шлифования	после притирки	
Сплав кобальта ***	Аргон	350—450	6—7	0,2	0,05—0,06	54—5860
Сплав карбида вольфрама с кобальтом (12%)	»	850—950	4—5	0,2	0,05—0,09	69
Сплав карбида вольфрама с кобальтом (17%)	»	750—950	6—8	0,25—0,46	0,05—0,06	69
Сплав карбида хрома с нихромом	Аргон и гелий	500—550	4,4—5,7	0,51	0,05—0,09	62—69
Оксид алюминия	Азот	950—1000	2,8—3,8	0,38	0,05—0,10	5515
Оксид алюминия с добавлением 2,5% диоксида титана	»	950—1000	3—4,3	0,51	0,05—0,10	5515
Оксид алюминия с добавлением 10% диоксида титана	»	850—1075	3,8—5	0,18	0,025—0,08	5515
Твердое хромовое покрытие ****	—	600—1000	—	—	—	103

* Измерение твердости с помощью алмазного конуса в соответствии с нормой E-92 американского общества по испытаниям материалов.

** По результатам испытаний на растяжение с использованием клея в соответствии с нормой С633-69 американского общества по испытаниям материалов. Основной металл перед напылением подвергали пескоструйной обработке для придания шероховатости с помощью глиноземного песка с размером частиц 125 мкм.

*** Сплав кобальта с содержанием 25,5% Cr; 10,5% Ni; 7,5% W (остальное — кобальт).

**** Данные для твердого хромового покрытия, полученного электролитическим способом, приведены для сопоставления.

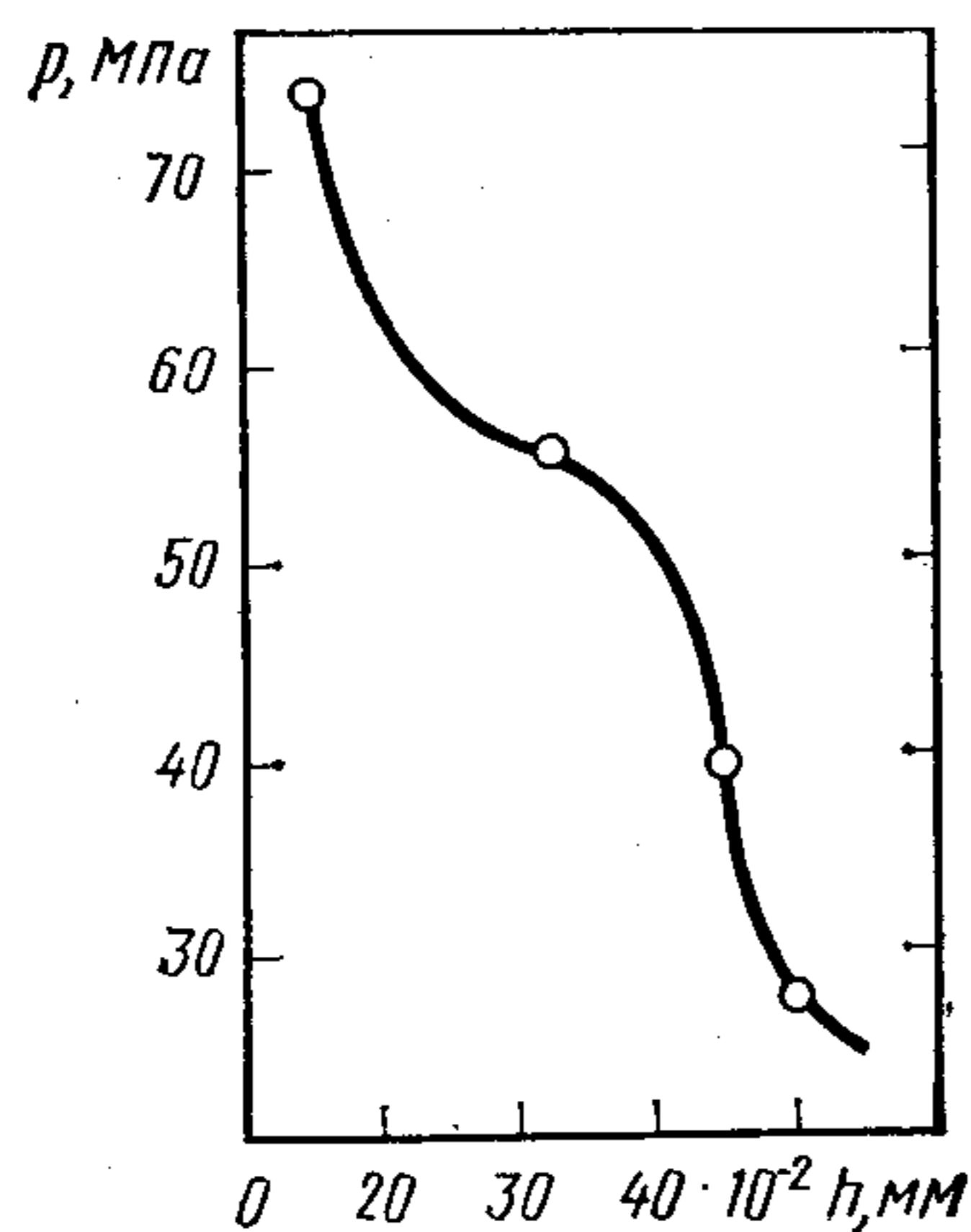


Рис. 148. Соотношение между толщиной покрытия h и прочностью сцепления (МПа) покрытия с основным металлом (сталь AMS4220)

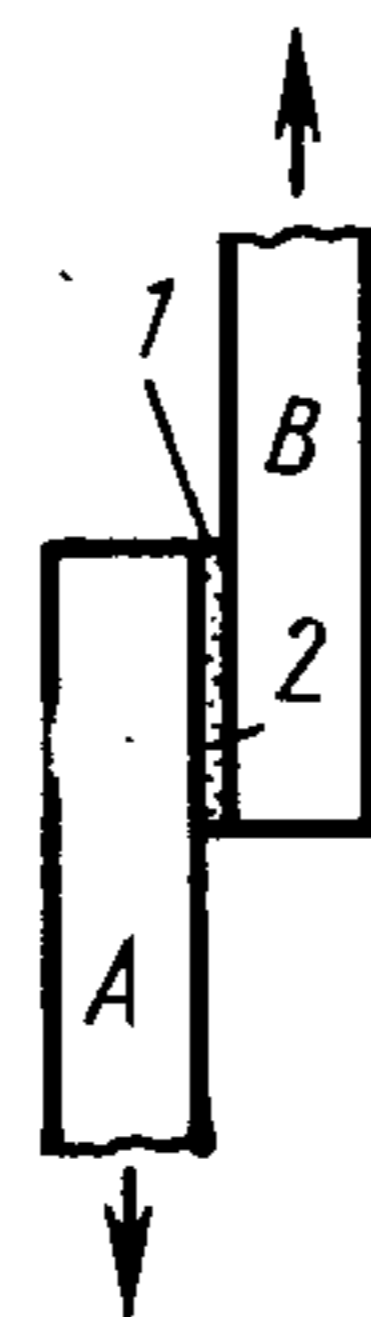


Рис. 149. Испытание на прочность сцепления покрытий при сдвиге (плоский склеенный образец):

1 — покрытие; 2 — клей

прочности сцепления покрытий из карбида титана на различных материалах [5].

В табл. 14.4 приведены данные по прочности сцепления различных покрытий, полученных способом плазменного напыления [6].

На рис. 148 показана зависимость прочности сцепления от толщины покрытия. При напылении одним и тем же материалом увеличение толщины покрытия сопровождается снижением прочности сцепления с основным металлом [5]. Это связано с тем, что в покрытиях большой толщины возникают значительные остаточные напряжения, способствующие разрушению сцепления покрытия с основным металлом.

Испытание проводят с использованием показанного на рис. 149 образца, получаемого приклеиванием металлической пластины B к поверхности покрытия с основным металлом A . Во время испытания определяют максимальное усилие, при котором происходит отделение покрытия от основного металла. Путем деления значения этого усилия на площадь приклеивания определяют прочность покрытия на сдвиг. Необходимо следить за тем, чтобы в процессе действия сдвигающей нагрузки на основной металл и металлическую пластину в рабочей зоне образца возникали чистые напряжения среза. Прочность сцепления покрытия определяют также путем испытания на сдвиг по схеме, показанной на рис. 150. На центральную часть поверхности цилиндрического образца A (основного металла) напыляют исследуемое покрытие. Образец без покрытия входит по скользящей посадке в матрицу. Затем образец с покрытием устанавливают в матрице таким образом, чтобы покрытие опиралось на торцовую поверхность матрицы. Размеры цилиндрического образца и покрытия показаны на рис. 151 [7]. Прочность сцепления при сдвиге для такого образца определяют как отношение

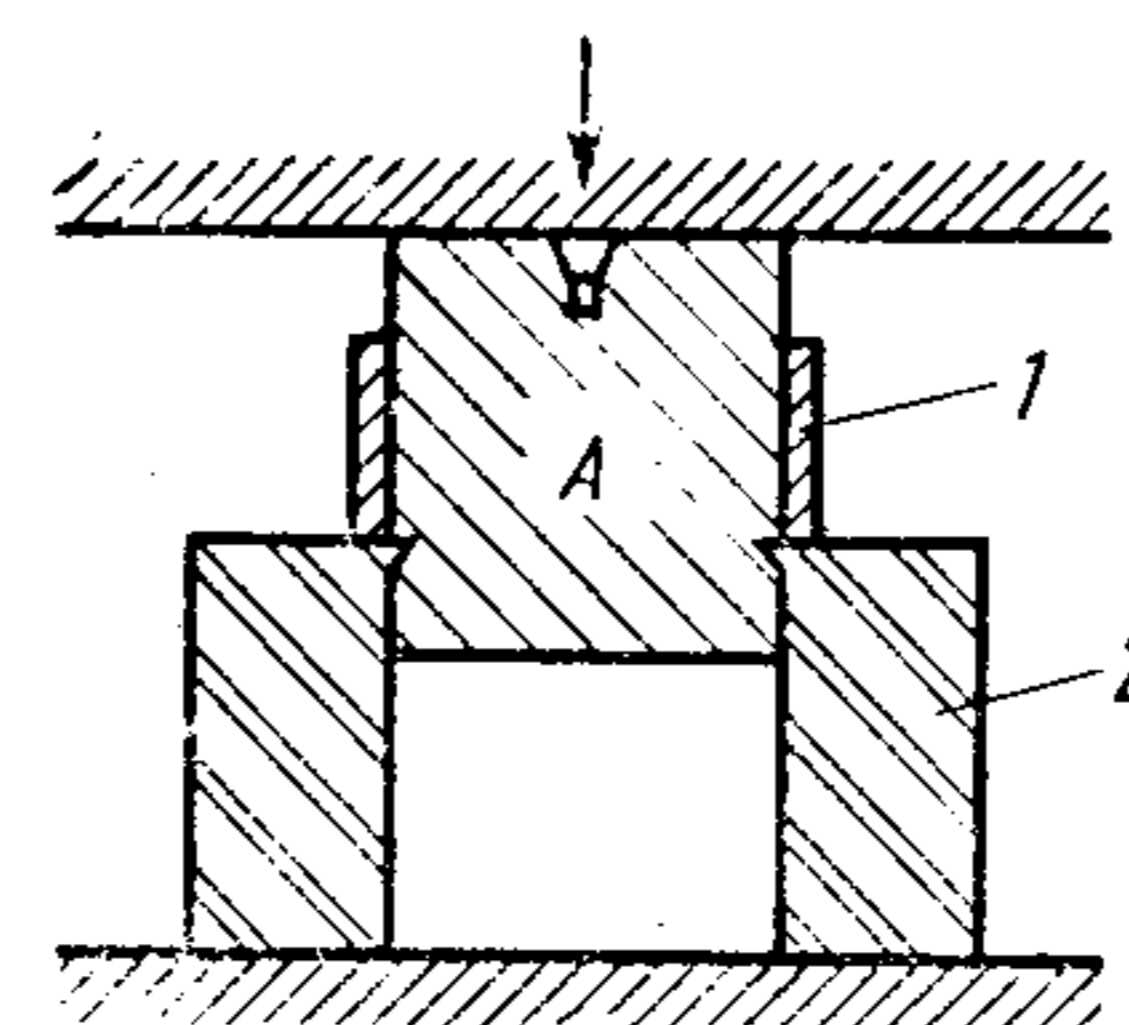


Рис. 150. Испытание на прочность сцепления покрытия при сдвиге (цилиндрический образец):

1 — покрытие; 2 — матрица

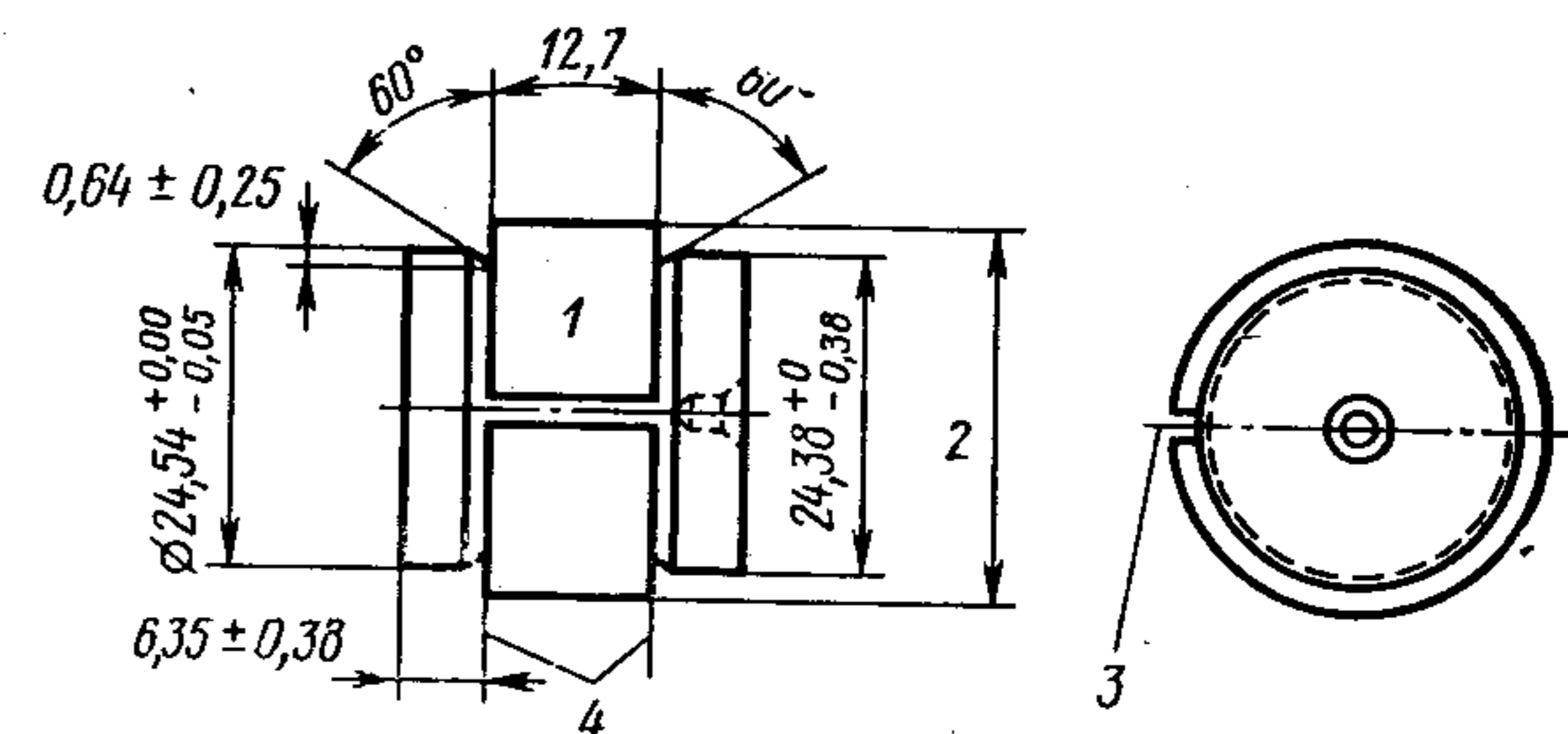


Рис. 151. Размеры образцов для испытания на прочность сцепления при сдвиге:

1 — покрытие; 2 — 29,36 мм после напыления и $28,35 \pm \pm 0,13$ мм после чистовой обработки; 3 — вырез 0,76 мм; 4 — поверхности, параллельные друг другу и перпендикулярные оси образца

усилия срезающей нагрузки к площади цилиндрической поверхности, на которую напылено покрытие.

В табл. 14.5 приведены результаты измерений прочности сцепления покрытий для образцов, напыленных в одинаковых условиях и подвергнутых испытаниям на сдвиг и прочность сцепления вытягиванием штифта [7]. Предел прочности сцепления при сдвиге значительно превышает предел прочности сцепления вытягиванием штифта.

Прочие виды испытаний. Рассмотренные способы испытания на прочность сцепления при растяжении и сдвиге позволяют дать количественную оценку прочности сцепления покрытия с основой. Однако в случаях, когда необходимо качественное сопоставление

14.5. Прочность сцепления по результатам испытаний штифтовой пробой и на сдвиг для покрытий, нанесенных из различных материалов, МПа

Напыляемый материал	Вид испытаний	Обработка для придания шероховатости поверхности		
		Пескоструйная обработка	Напыление подслоя молибдена	Нанесение равной резьбы и напыление молибдена
Углеродистая сталь (0,1% С)	На сдвиг	47,9	60,8	110,1
	Штифтовая проба	18,3	14,8	20,9
Коррозионно-стойкая сталь типа 18-8	На сдвиг	57,3	65,3	140,9
	Штифтовая проба	20,9	15,5	20,9
Технически чистый алюминий	На сдвиг	19,4	30,2	37,7
	Штифтовая проба	7,06	11,3	16,5
Сплав кремния с алюминием (силумин)	На сдвиг	30,8	35,0	56,09
	Штифтовая проба	11,7	14,1	21,4

покрытий, существует ряд перечисленных ниже упрощенных способов испытаний.

1. Испытание на изгиб. После напыления покрытия на плоский образец его изгибают и определяют угол изгиба в момент возникновения трещин в покрытии [8].

2. Испытание царапанием. Этот способ используют для оценки прочности сцепления покрытий из металлов с низкой твердостью (японский промышленный стандарт H8663—1961, покрытия из цинка, алюминия, свинца и др.). На покрытие специальным резцом, перпендикулярно расположенным к поверхности основы, наносят две параллельные царапины таким образом, чтобы полностью прорезать покрытие. Прочность сцепления характеризуется расстоянием между этими канавками, при котором покрытие будет отделяться от основы.

3. Испытание циклической ударной нагрузкой. О прочности сцепления судят по числу ударов и степени отслоения покрытия после многократного сбрасывания шарика или бойка на данный участок поверхности образца (японский промышленный стандарт H8663—1961).

4. Испытания выдавливанием. Этот наиболее применяемый на практике способ качественной оценки прочности сцепления и других свойств напыленных покрытий заключается во вдавливании стального шарика в поверхность плоского образца со стороны, противоположной покрытию, с последующим визуальным осмотром деформированной поверхности покрытия [9].

Ниже приведен конкретный пример испытания покрытий, используемый в производстве деталей реактивных двигателей. Плоский образец толщиной 1,3—1,5, длиной 75 и шириной 44 мм после напыления покрытия кладут (покрытием вниз) на стальную плиту, в которой выполнено отверстие $\varnothing 35$ мм. Далее на образце в позиции, соответствующей центру отверстия, устанавливают стальной шарик

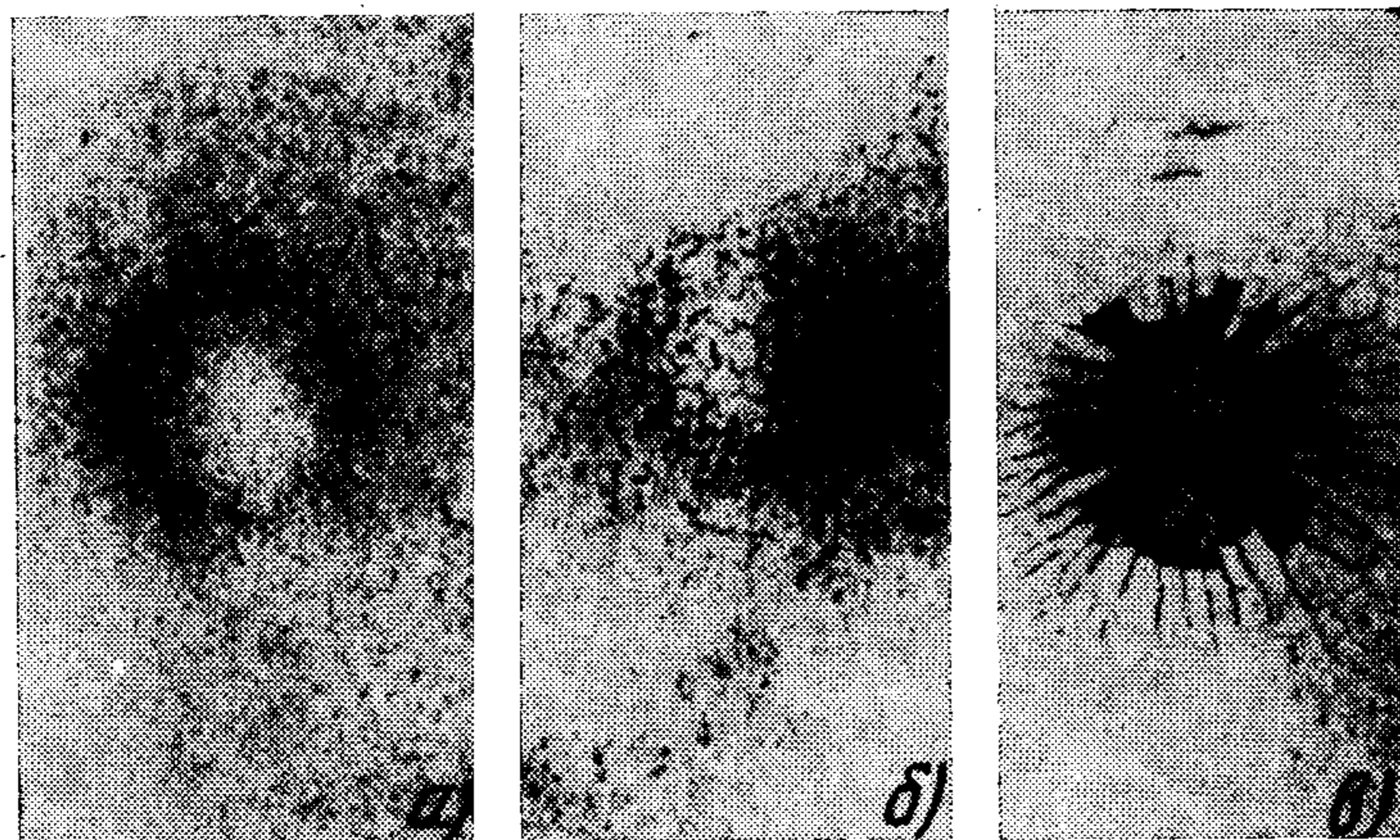


Рис. 152. Состояние покрытия после испытания выдавливанием

$\varnothing 22,2$ мм и вдавливают его со скоростью ~ 10 мм/мин на глубину 7,6 мм. По состоянию покрытия после деформации судят о приемлемости выбора режима напыления, правильности его выполнения и качестве покрытия. На рис. 152, а показано состояние покрытия при хорошем его качестве, на рис. 152, б — состояние в случае неудовлетворительной структуры переходного слоя и на рис. 152, в — состояние при плохом качестве самого покрытия. Толщина покрытия составляет 0,1—0,15 мм. При меньшей толщине покрытия следы разрушения неразличимы даже при плохом качестве напыления.

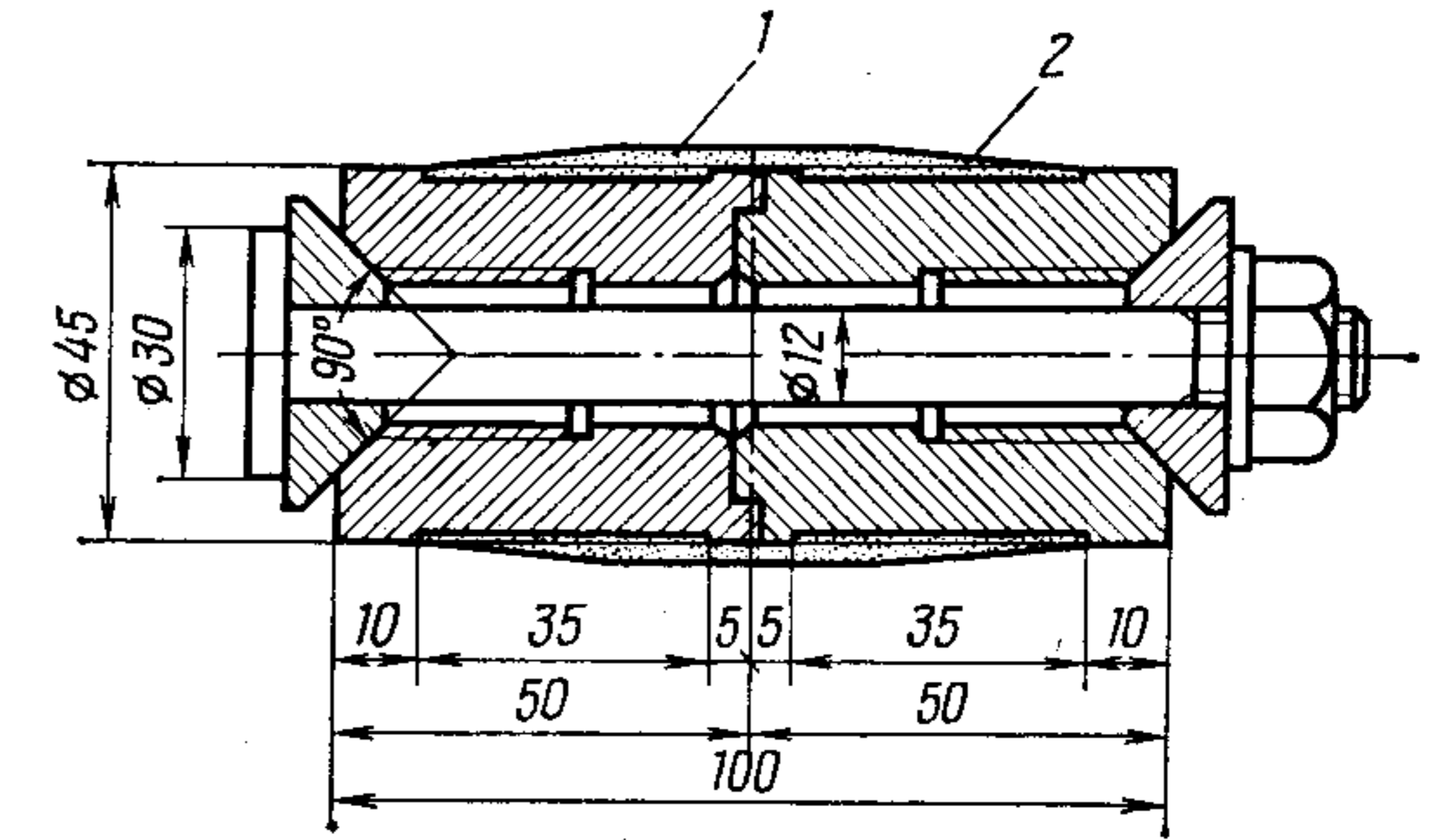


Рис. 153. Образец для испытаний напыленного материала покрытия на растяжение:

1 — напыленное покрытие; 2 — резьба (шаг 1,25 мм)

14.2. ПРОЧНОСТЬ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ НАПЫЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОКРЫТИЙ

14.6. Прочность при растяжении различных напыленных покрытий

Напыляемые материалы	Прочность при растяжении (средние данные для пяти образцов, МПа)		
	Максимальная	Минимальная	Средняя
Углеродистая сталь с содержанием углерода, %:			
0,1	193,8	118,5	168,8
0,15	208,5	181,2	188,4
0,25	196,4	165,6	181,4
0,8	200,8	126,9	146,9
1,1	139,4	114,9	131,1
Марганцовистая сталь с низким содержанием никеля	153	116,6	150,4
Аустенитная коррозионно-стойкая сталь SUS27	210,9	202,1	205,4
Коррозионно-стойкая сталь SUS23	187,5	136,9	152,4
Коррозионно-стойкая сталь SUS32	211,4	150	174,9
Высокоуглеродистая коррозионно-стойкая сталь (13% Cr)	175,1	128,1	167,4
Бронза	117,2	88,4	97,9
Алюминиевая бронза	131,8	82,7	119,0
Алюминий	113,3	85,9	95,6
Сплав алюминия с кремнием	240	153,4	165,7
Молибден	43,9	33,8	37,8
Алюминид никеля	92,3	74,7	84,4

Для определения прочности самого материала покрытия на растяжение, т. е. прочности сцепления частиц внутри покрытия, используют показанные на рис. 153 образцы (японский промышленный стандарт H8302—1977).

В табл. 14.6 приведены значения прочности различных покрытий на растяжение по результатам испытаний с помощью образца, представленного на рис. 153 [10]. Предел прочности покрытий в 2—3 раза ниже прочности самого напыляемого материала в литом виде. Это значит, что напыленное покрытие не способствует повышению прочности подвергнутого напылению изделия [11].

14.3. ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Применение для упрочнения деталей машин износостойких покрытий позволяет изготавливать детали машин и механизмов ответственного назначения из обычных конструкционных сталей. Специфическая особенность напыленных покрытий, связанная с наличием пустот в промежутках между частицами, состоит в том, что при умеренной макротвердости покрытия отдельные частицы в его структуре обладают высокой твердостью [12]. При напылении деталей, работающих в условиях периодического смазывания, пустоты покрытия, впитывающие в себя смазочный материал, выполняют ту же роль, что и поры в самосмазывающихся подшипниках из спеченных металлических порошков. Напыленные покрытия имеют обычно сложную структуру, в которой слои частиц напыленного материала чередуются с оксидными прослойками. Такой характер структуры составляет одну из причин высокой износостойкости напыленных покрытий.

При дуговой металлизации с использованием двух электродов из разнородных металлов получают покрытие в виде псевдосплава, состоящего из смеси двух материалов. В последнее время в связи с разработкой плакированных порошковых материалов различного состава открылась возможность более широкого применения композиционных покрытий, напыляемых разнородными материалами. Это обеспечивает расширение области применения технологии напыления в промышленности.

Износостойкость напыленных покрытий. При напылении износостойких покрытий наиболее широко используют углеродистую и коррозионно-стойкую аустенитную стали, молибден, самофлюсующиеся спла-

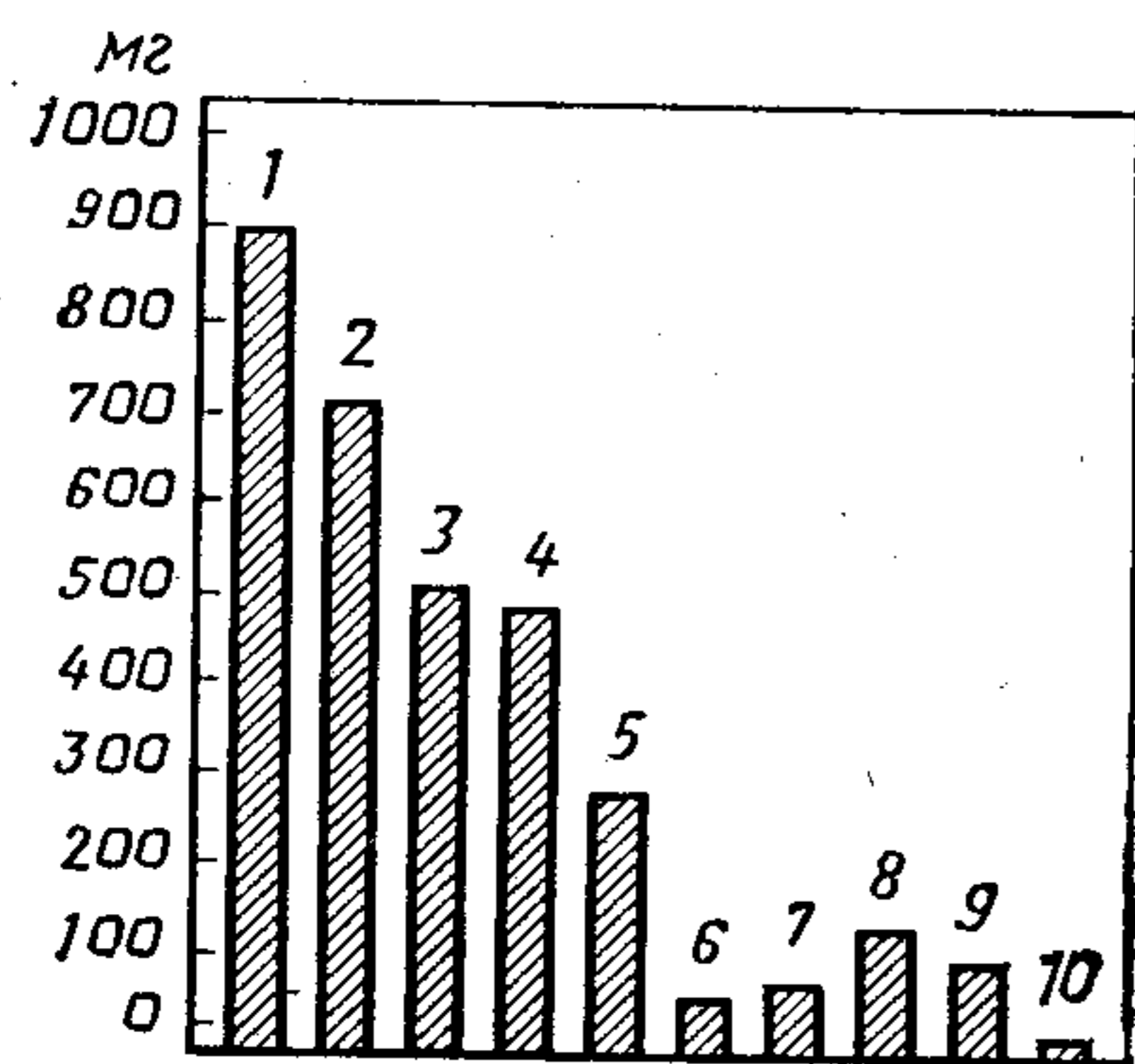
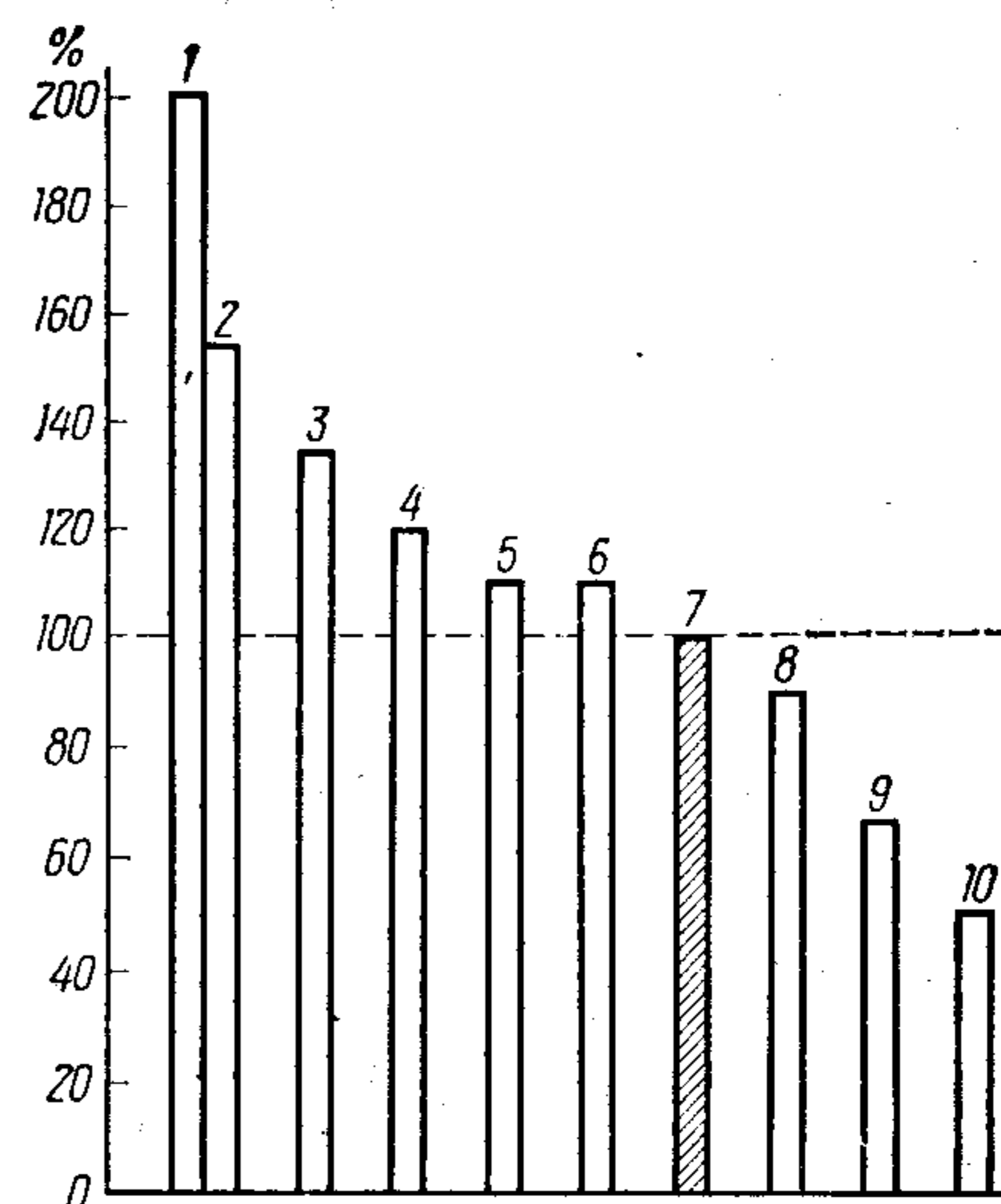


Рис. 154. Величина износа (мг) как характеристика износостойкости различных сплавов:

1 — низкоуглеродистая сталь; 2 — коррозионно-стойкая сталь типа 18-8 с содержанием молибдена; 3 — хромо-молибденовая сталь; 4 — стеллит № 66; 5 — стеллит № 33; 6 — стеллит № 11; 7 — сплав на хромоникелевой основе; 8 — колмоной № 4; 9 — колмоной № 5; 10 — колмоной № 6

Рис. 155. Относительный износ (%) для различных покрытий, напыленных газопламенным и плазменным способами:

1 — сплав карбида вольфрама с кобальтом (17%), плазменное напыление в аргоне; 2 — сплав карбида вольфрама с кобальтом (17%), плазменное напыление аргоно-водородной плазмой; 3 — керамика системы $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$, плазменное напыление аргоно-водородной плазмой; 4 — сплав карбида вольфрама с кобальтом (50%) с добавлением никеля, хрома, железа, бора, алюминидов никеля, плазменное напыление аргоно-водородной плазмой; 5 — особо тонкий порошок сплава оксида алюминия и оксида титана (13%), плазменное напыление аргоно-водородной плазмой; 6 — сплав оксида алюминия с диоксидом титана (13%), плазменное напыление аргоно-водородной плазмой; 7 — твердое хромовое покрытие (электролитическое); 8 — композиционное покрытие системы Fe—Mo—Al—B, плазменное напыление в среде азота или аргона; 9 — смесь с содержанием 75% Mo, плазменное напыление аргоно-водородной плазмой; 10 — композиционный материал в виде смеси сплава никеля (с хромом, бором и кремнием) с алюминиевым порошком, плакированным молибденом, газопламенное напыление



вы и их смеси с порошками карбидов и оксидов с высокой твердостью, керамические материалы, включая оксид алюминия и оксид хрома.

В зависимости от свойств основы и условий работы на трущиеся участки можно напылять также баббит, кермет, фосфористую и адмиралтейскую бронзу.

На рис. 154 приведены данные по износостойкости при работе в условиях низкого давления на поверхность покрытия для различных материалов, включая сплавы на никелевой и кобальтовой основе. Значения износа получены при истирании образца наждачной бумагой в течение 1 мин при скорости скольжения 8 м/с и давлении 1,66 МПа [13]. Наиболее высокую износостойкость показал сплав колмоной № 6*.

На рис. 155 представлены данные по относительному износу для различных покрытий, напыленных газопламенным и плазменным способами (за 100% принят износ твердого хромового покрытия, нанесенного электролитическим способом) [14]. Данные основаны на результатах испытаний на абразивный износ в среде абразивного шлама с использованием некоторых результатов испытаний в реальных условиях. Наиболее высокую износостойкость показало покрытие из механической смеси карбида вольфрама с кобальтом (17%), полученное плазменным напылением.

Испытания напыленного плазменным способом молибденового покрытия на износ (машина трения SL-04 типа Огоэ для ускоренных испытаний при скоростях 0,1—0,8 м/с) показали, что в диапазоне низких скоростей скольжения названное покрытие по износо-

* Сплав колмоной № 6 содержит 73,75% Ni; 13,50% Cr; 3,0% B; 4,25% Si; 4,75 Fe и 0,75% C.

стойкости превосходит инструментальную сталь SKS-2 (твердость HRC 63).

Термическая обработка молибденового покрытия (отжиг в среде аргона при температуре 800°С в течение 1 ч) значительно снижает износостойкость, несмотря на повышение плотности и существенное уменьшение пористости напыленного материала [15].

Рассмотренные испытания на износ осуществляли в условиях сухого трения, которые по результатам значительно отличаются от испытаний на износ в присутствии смазочного материала.

В последнем случае молибден, обладая большим химическим сродством с серой, которая выделяется из смазочного масла, соединяется с ней, образуя дисульфид молибдена (MoS₂). Дисульфид молибдена, который представляет собой своего рода смазочный материал, значительно повышает износостойкость покрытия. Это свойство молибденового покрытия, подкрепляемое пропиткой пор смазочным материалом, открывает возможность его использования в условиях трения под действием высоких нагрузок [16, 17].

Высокие результаты испытаний в условиях сухого трения получены для напыленных плазменным способом покрытий из оксида алюминия и смеси оксида алюминия с диоксидом титана (2,5%) [18]. Испытания проводили в условиях, аналогичных испытанию покрытий из молибдена. «Мягкие» покрытия* из этих материалов уступают инструментальной стали по износостойкости, однако «твердые» покрытия из них значительно ее превосходят. Во время испытаний мягких покрытий истирание самих частиц напыленного материала отсутствует, а износ имеет форму выкрашивания этих частиц при трении о вращающийся диск.

На рис. 156 показаны результаты испытаний на износ в условиях сухого трения нанесенных газопламенным напылением покрытий из никелевого сплава, содержащего 50% карбида вольфрама. Испытания проводили как на покрытиях, полученных сразу после напыления, так и на покрытиях, которые после напыления подвергались отжигу при 1000°С [19]. Покрытия, напыленные при силе тока электрической дуги 600 А, показали более высокую износостойкость по сравнению с покрытиями, напыленными при силе тока

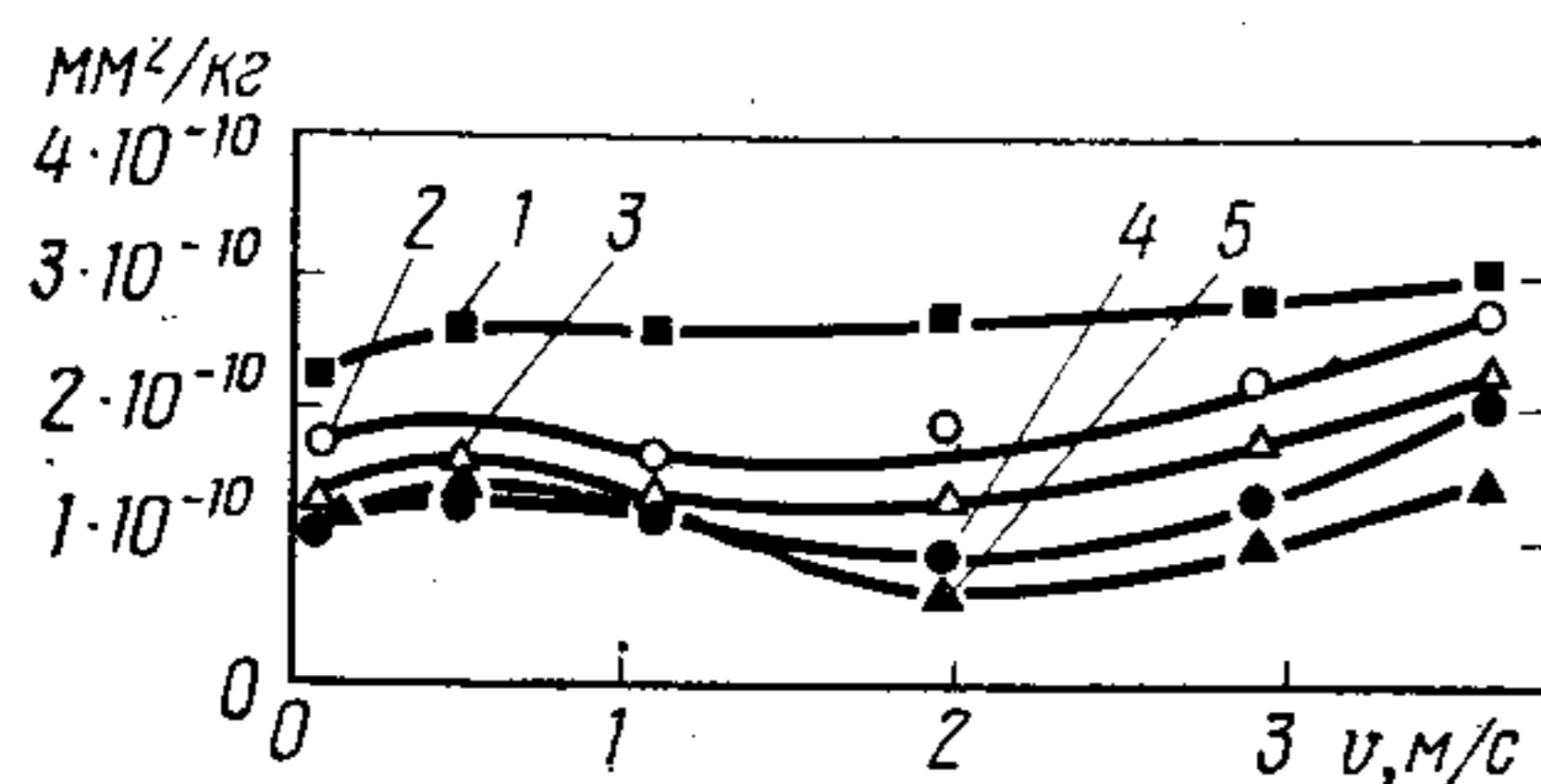


Рис. 156. Результаты испытаний на износ покрытий из никелевого сплава с добавлением 50% карбида вольфрама. Соотношение между удельным износом (мм²/кг) и скоростью v скольжения:

1 — инструментальная сталь SKS-2 (HRC 63); 2 — покрытие после напыления, сила тока дуги 400 А; 3 — покрытие после напыления, сила тока дуги 600 А; 4 — покрытие после отжига при 1000°С, сила тока дуги 400 А; 5 — покрытие после отжига при 1000°С, сила тока дуги 600 А

* «Мягкие» покрытия, отличающиеся большой пористостью и шероховатостью, образуются при напылении в режиме недостаточного выделения теплоты для нагрева частиц материала и большом расстоянии от среза сопла горелки до поверхности основного металла. Для ряда случаев мягкие покрытия предпочтительны.

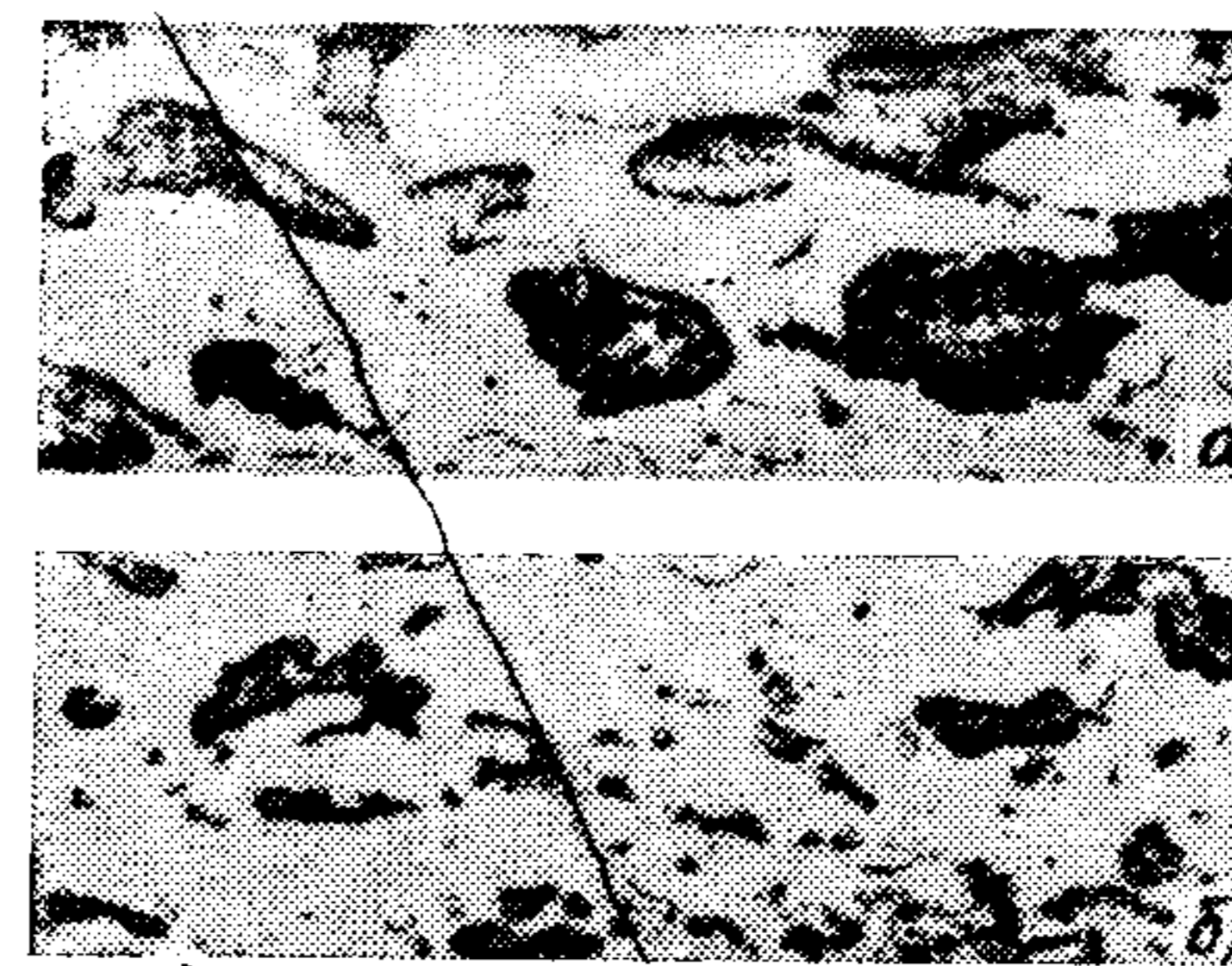


Рис. 157. Покрытие из никелевого сплава с добавлением 50% карбида вольфрама, нанесенное плазменным напылением при силе тока 400 А (а) и 600 А (б)

электрической дуги 400 А. Это связано с тем, что в покрытии, напыленном при большой силе тока, карбид вольфрама в виде мелких частиц распределен в материале покрытия более равномерно (рис. 157). После отжига износостойкость этого покрытия становится еще выше. Напыленные покрытия в любом состоянии заметно превосходят инструментальную сталь по износостойкости.

Фрикционные свойства напыленных покрытий. Пористая поверхность напыленных покрытий, обладая способностью к удержанию смазочного материала на поверхности, обеспечивает повышение износостойкости.

1. Покрытие, напыленное сталью. На рис. 158 показано изменение коэффициента трения в период после прекращения подачи смазочного масла при вращении стального закаленного вала и вала со стальным покрытием в баббитовых подшипниках при скорости скольжения 1,3 м/с и давлении 2,06 МПа [8]. При испытании сталь-

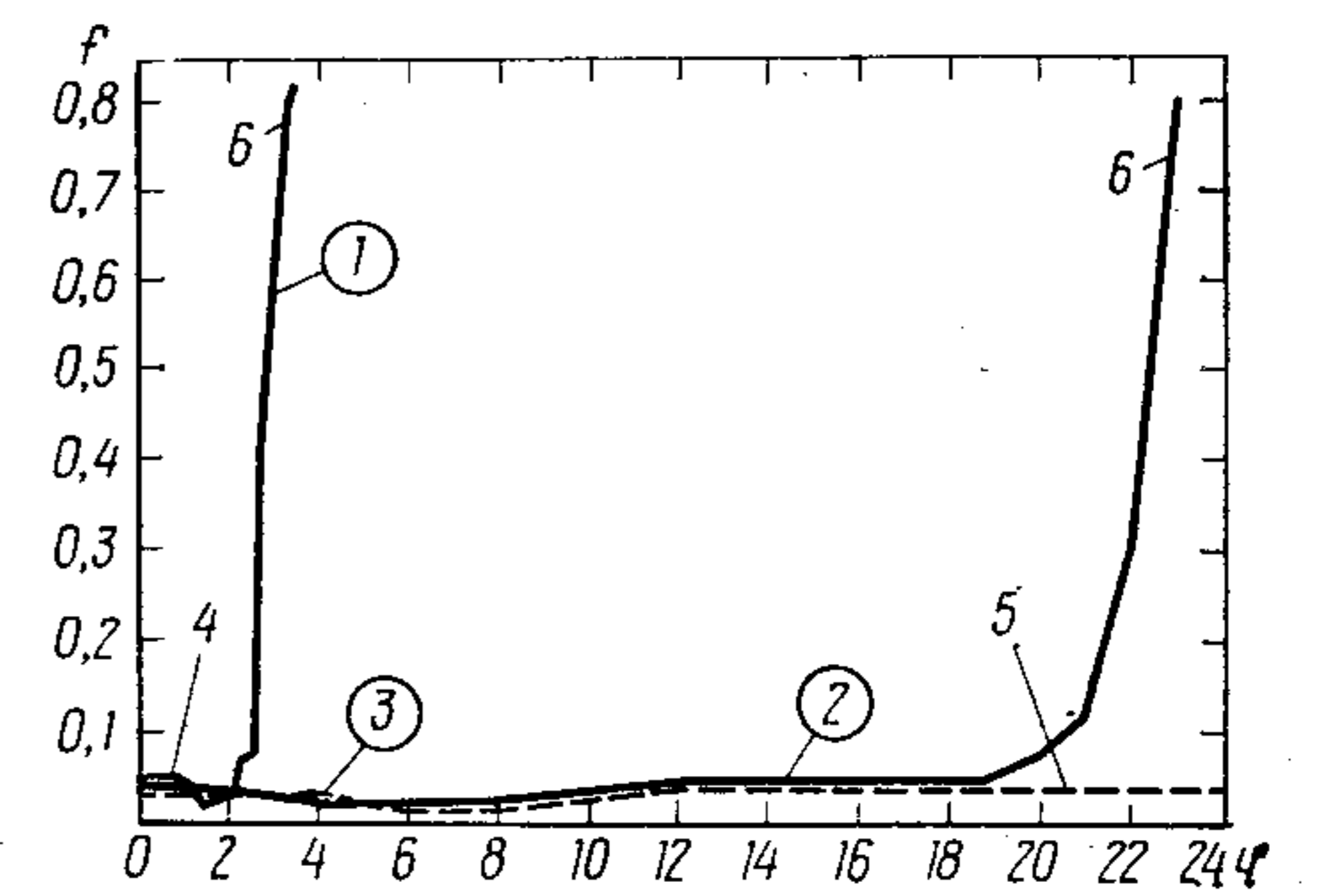


Рис. 158. Изменение коэффициента трения f в период после прекращения подачи смазочного масла при вращении стального закаленного вала и вала со стальным покрытием в баббитовых подшипниках:

1 — для вала без покрытия; 2 — для вала с покрытием; 3 — для вала с покрытием и использованием смазочного масла с добавлением графита; 4 — без подачи масла; 5 — участок работы вала в течение 190 ч с момента прекращения подачи масла; 6 — участок схватывания

17.7. Свойства покрытий PStM15 и PMS30

Свойства	Покрытия	
	PStM15	PMS30
Пористость, %	10—15	10—15
Плотность, г/см ³	6,5—7	7,5—8
Модуль упругости, ГПа	58,8—63,7	29,4—49
Прочность на растяжение, МПа	98—117,6	34,3—49
Твердость HB	120—150	35—45
Относительное удлинение, %	До 1	До 3

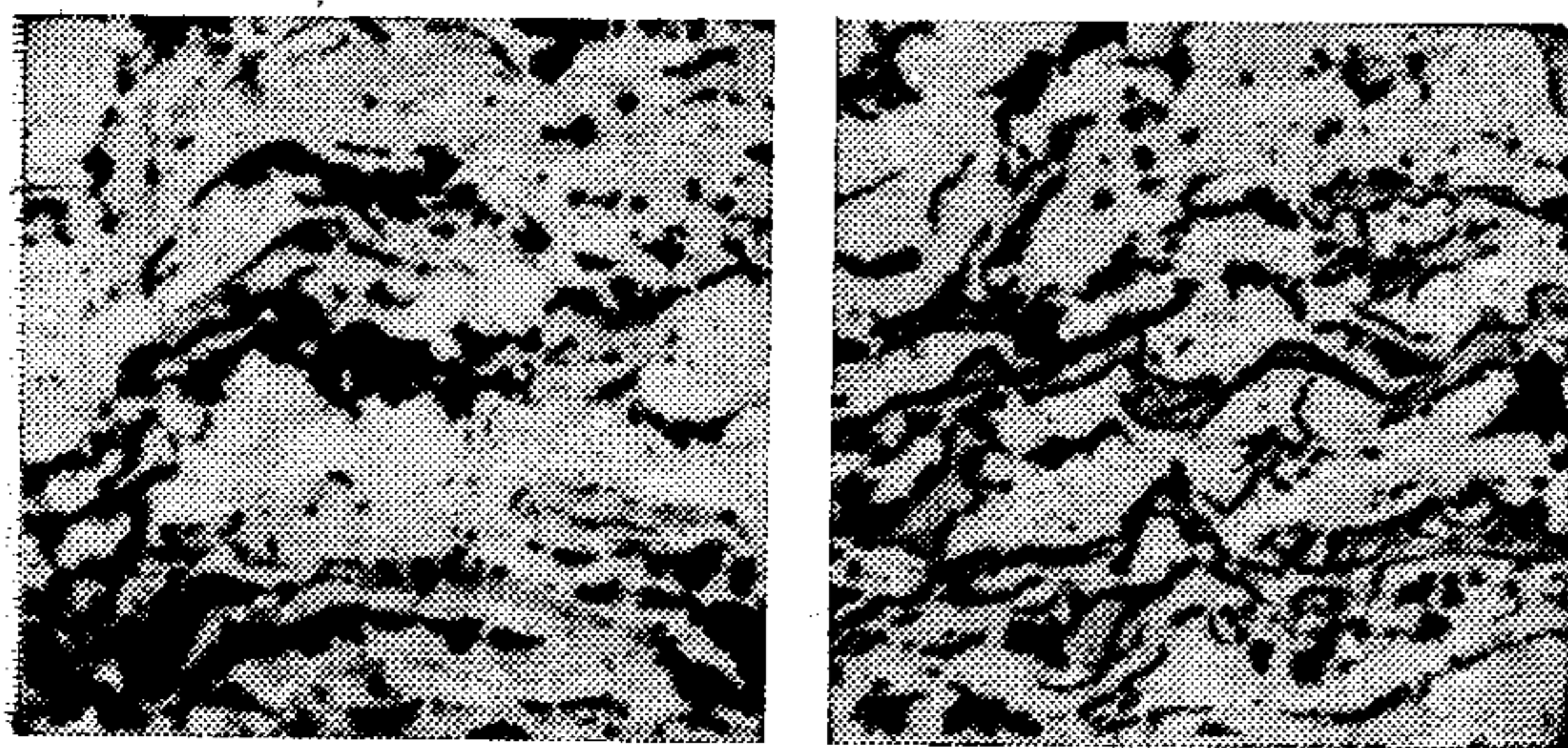


Рис. 159. Структура напыленных покрытий из сплавов PMS30 (медь — свинец) и PStM (сталь — медь) ($\times 175$)

ного закаленного вала через 2,5—3 ч после прекращения подачи смазочного масла происходит разрушение масляной пленки, что приводит к резкому увеличению коэффициента трения и появлению заеданий в подшипнике. Между тем заедание вала со стальным напыленным покрытием начинается в подшипнике только через 22,5 ч при постепенном повышении коэффициента трения. В случае использования смазочного масла с добавлением графита вал со стальным напыленным покрытием работает без заедания в течение 190 ч с момента прекращения подачи масла.

2. Покрытия из свинцово-медных и медно-стальных псевдосплавов. При дуговой металлизации двумя проволоками из двух различных металлов происходит образование покрытия из псевдосплава. Два таких покрытия, включая PMS30 (70% Cu, 30% Pb) и PStM15 (85% стали, 15% Cu), были предметом экспериментального исследования для изучения фрикционных свойств [20] (табл. 14.7). Структура таких покрытий (рис. 159) содержит оксиды в виде волнообразных включений между частицами или инородных включений внутри зерен.

На рис. 160 показано влияние нагрузки на коэффициент трения для подшипников из разных материалов при работе в условиях хорошей смазки при скорости скольжения 3 м/с и переменной нагрузке. Для бронзовых подшипников характерно резкое повышение коэффициента трения при увеличении нагрузки. При давлении 19,6 МПа коэффициент трения возрастает до определенного значения, создающего опасность заедания в подшипнике. Между тем для подшипников, на которые были напылены покрытия PStM15 и PMS30, коэффициент трения достигает предельного значения при

давлении 34,3 и 49,0 МПа соответственно, что в 1,75—2,5 раза выше, чем для бронзовых подшипников. Контрольные подшипники изготовлены из бронзы, содержащей 5% Sn, 5% Zn, 4% Pb (остальное медь).

14.4. ЖАРОСТОЙКИЕ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ

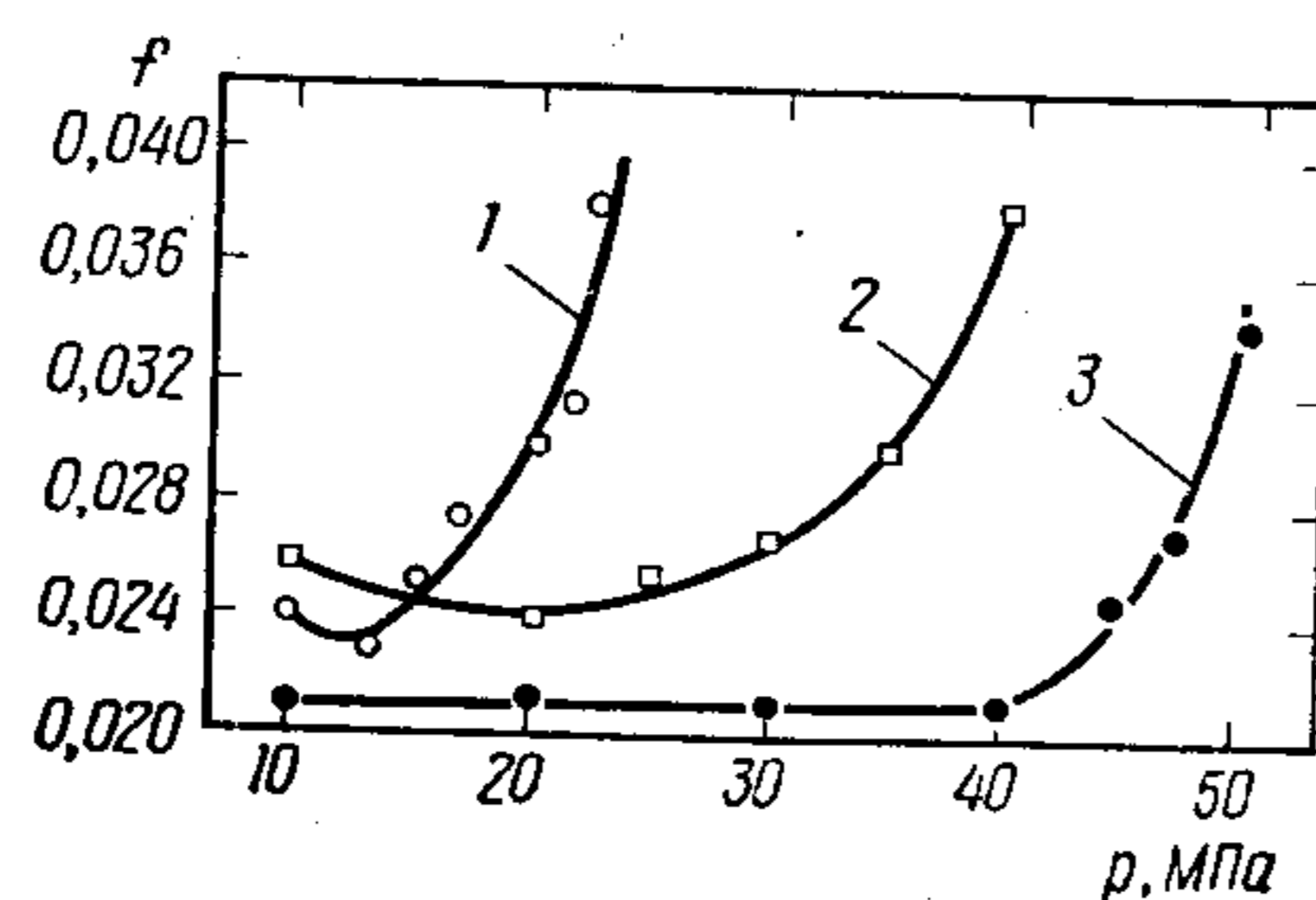
Теплоизоляционные и жаростойкие покрытия имеют различные структуры. Для повышения жаростойкости необходимо напылять плотные покрытия, имеющие хорошую теплопроводность для отвода теплового потока, воздействующего на поверхность покрытия. Окружающая атмосфера не должна проникать внутрь покрытия. Между тем, для получения хороших теплоизоляционных свойств необходимо напылять пористые покрытия, обладающие низкой теплопроводностью. Через некоторые покрытия указанного типа окружающая атмосфера может проникнуть к поверхности основного металла. В результате происходит окисление или коррозия основы и может нарушиться связь покрытия с основой, что приведет к его отслоению. Перед напылением жаростойких или теплоизоляционных покрытий для повышения их качества на основной металл (гальваническим методом или напылением) наносят подслои из материалов, которые обладают хорошей адгезией к основе и коррозионной стойкостью. Для повышения жаростойкости и теплоизоляционных характеристик покрытия требуются тугоплавкие материалы, обладающие химической стабильностью при высокой температуре.

Для работы в условиях, характеризующихся частыми тепловыми ударами, подходят пористые покрытия. Вместе с тем при работе в условиях газоабразивного или эрозионного износа задача увеличения износостойкости покрытия требует повышения его плотности. Для улучшения теплоизоляционных характеристик можно увеличивать толщину покрытия. Однако необходимо учитывать, что увеличение толщины покрытия обычно сопровождается повышением в нем остаточных напряжений, снижающих прочность сцепления покрытия с основным металлом. Кроме того, увеличение толщины покрытия повышает опасность отслоения его от основы под действием термических деформаций, которые возникают при нагревании из-за различного теплового расширения основы и покрытия. Обычно рассматриваемые покрытия имеют толщину в пределах 0,1—1 мм. В случаях, когда детали с напыленными покрытиями используют в условиях, при которых необходимо учитывать излучение и поглощение теплоты, важным фактором становится степень их черноты, особенно в области инфракрасного излучения.

Жаростойкость покрытий. В качестве напыляемых материалов, предназначенных для повышения жаростойкости покрытий, используют металлы, сплавы и керамику: вольфрам, молибден и другие тугоплавкие металлы, сверхпрочные сплавы на основе никеля и кобальта, эмали, оксид алюминия, диоксид циркония и другие оксид-

Рис. 160. Зависимость коэффициента трения f от давления на бронзовый подшипник с напыленными покрытиями из сплавов PStM15 и PMS30:

1 — бронзовый подшипник; 2 — подшипник с напыленным покрытием из сплава PStM15; 3 — то же с покрытием из сплава PMS30



ные материалы. Помимо этих материалов для получения жаростойких покрытий перспективны многие тугоплавкие карбиды различных металлов, соединения бора и керметы. Жаростойкие покрытия из металлов обладают высоким сопротивлением к действию циклических тепловых нагрузок, однако они легко подвергаются коррозии в окислительных средах.

Чтобы воспрепятствовать прониканию газов окружающей среды в покрытие, жаростойкие покрытия, работающие при сравнительно низких температурах, подвергают пропитке для блокировки пор. Отсутствие аналогичных средств для пропитки покрытий, работающих при высокой температуре, требует применения необходимых технологических приемов для повышения плотности покрытия.

1. Керамические покрытия. Покрытия из диоксида циркония, оксида алюминия с диоксидом титана, напыленные плазменным методом на пластины из низкоуглеродистой стали толщиной 3 мм, были подвергнуты испытаниям на жаростойкость в плазменной струе [21], температура которой в точке нагрева составляла 2200—2300°С. На рис. 161 показано состояние различных образцов через разные промежутки времени после начала нагрева плазменной струей. На рис. 161, а показан контрольный образец в виде пластины основного металла (низкоуглеродистой стали) без покрытия. Этот образец был прожжен насквозь через 34 с после начала нагрева. На рис. 161, б представлен образец с покрытием из оксида алюминия с диоксидом титана, нанесенным на подслоу нихрома толщиной 0,1 мм, а на рис. 161, в — образец с покрытием из диоксида циркония, также нанесенным на нихромовый подслоу. Образец с покрытием из оксида алюминия с диоксидом титана, для сквозного прожога которого потребовалось 140 с, показал более высокую жаростойкость по сравнению с контрольным образцом, а образец с покрытием из диоксида циркония не был прожжен после 1200 с нагрева, что подтверждает особо высокую жаростойкость покрытия из диоксида циркония, обеспечивающего надежную защиту основного металла в самых экстремальных условиях. В связи с этим следует заметить, что жаростойкость покрытия в первую очередь зависит от температуры плавления напыляемого материала. Именно с этим связана более высокая жаростойкость покрытия из диоксида циркония (температура плавления ~2700°С) по сравнению с покрытием из смеси оксида алюминия и диоксида титана (температура плавления ~2000°С). Напыление подслоу нихрома, обеспечивая высокую прочность сцепления с основным металлом, способствует также повышению стойкости покрытия к тепловым ударам [22].

2. Многослойные покрытия. Если комбинировать напыление оксидов с напылением металлов, то можно получить плотные многослойные покрытия с повышенной стойкостью к окислению.

При разработке материалов для облицовки задних газоотводных элементов ракетных двигателей проведены испытания образцов с защитными покрытиями из новых материалов в высокоскоростном газовом потоке при 2760°С [23]. Испытывали образцы из коррозионно-стойкой стали типа 17-7 толщиной 1,8 мм с облицовкой из

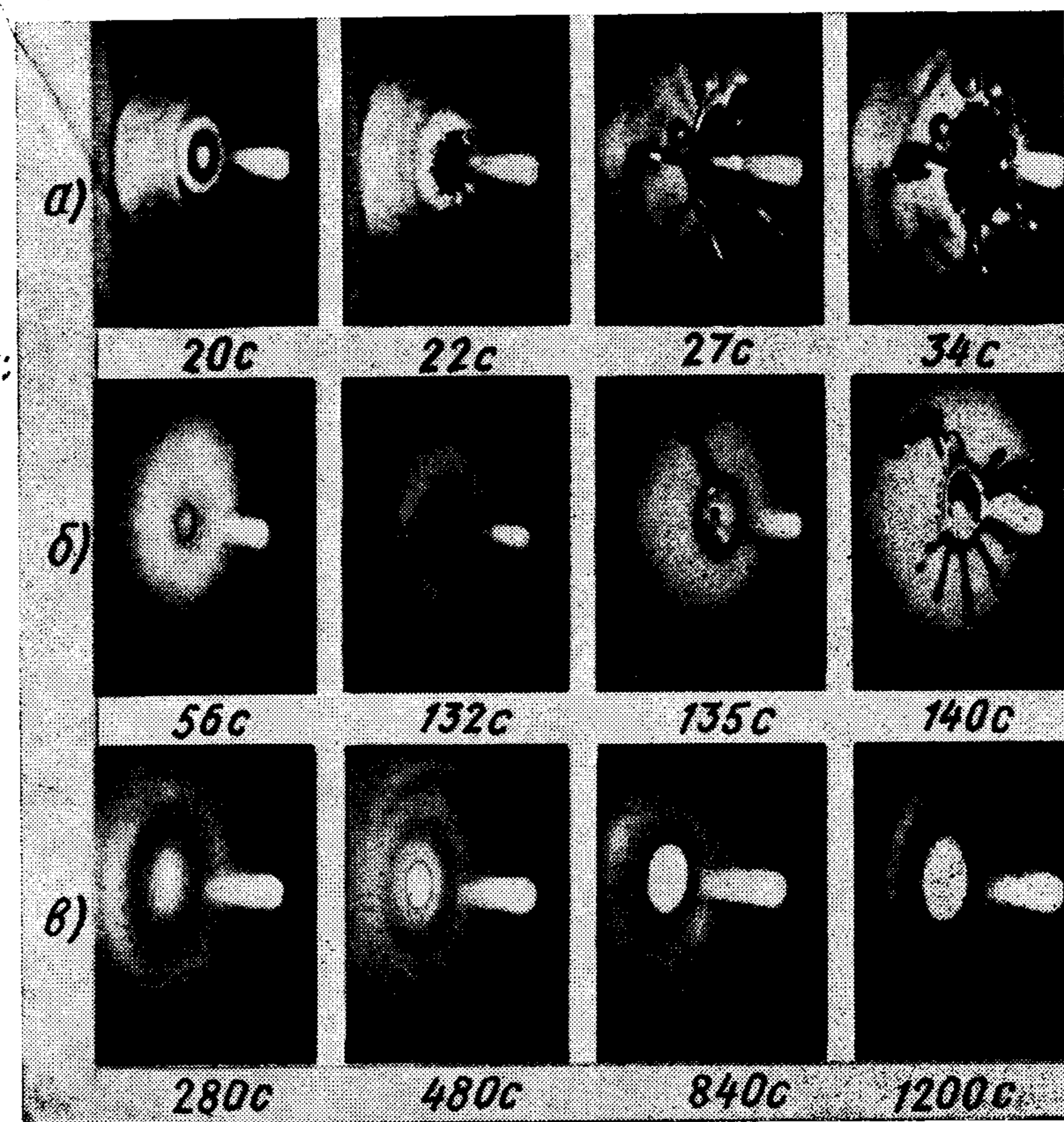


Рис. 161. Испытание различных образцов на жаростойкость в плазменной струе (цифрами обозначена продолжительность после начала нагрева):

а — низкоуглеродистая сталь без покрытия; б — покрытие из оксида алюминия с диоксидом титана, нанесенное на нихромовый подслоу; в — покрытие из диоксида циркония, нанесенное на нихромовый подслоу

силицидов хрома, молибдена (выдерживающих температуру до 2480°С), асбеста, пропитанного силиконом, и некоторых других материалов; их прожигали струей через 2 с после начала испытаний.

Более успешным для указанного назначения оказалось напыленное многослойное покрытие общей толщиной 1,27 мм, в котором шесть слоев молибдена (средняя толщина одного слоя по 0,05 мм) чередовались с пятью слоями оксида алюминия (средняя толщина одного слоя 0,18 мм). Высокие свойства такого покрытия обеспечивались сочетанием стойкости молибденовых слоев к эрозионному износу и их хорошей адгезией к основному металлу, в то время как слои из оксида алюминия служили хорошей теплоизоляцией и придавали покрытию высокую стойкость к тепловым ударам. Микроструктура этого многослойного покрытия показана на рис. 162. Испытание многослойного молибдено-глиноземного покры-



Рис. 162. Многослойное покрытие с чередованием слоев молибдена (темные прослойки) со слоями оксида алюминия (светлые слои)

тия скоростной высокотемпературной газовой струей показало хорошие результаты: следы эрозионного износа были обнаружены только на первом молибденовом слое, а второй слой из оксида алюминия остался практически не поврежденным; признаки отслоения покрытия отсутствовали полностью.

Для повышения стойкости к термическому влиянию покрытий, напыленных оксидом алюминия или диоксидом циркония, на поверхность стали (основного металла) сначала напыляют подслоем плакированным порошком, обладающим высокой адгезией к стали. В табл. 14.8 приведены результаты испытания на стойкость к термическому влиянию (циклическое повторение нагрева до 1000°C в течение 5 мин с последующим охлаждением струей сжатого воздуха в течение 5 мин) для керамических покрытий в сочетании с разными промежуточными слоями, наносимыми на основной металл плакированным порошком [24].

3. Прочие жаростойкие покрытия. Напыление композиционных покрытий — один из методов получения плотных покрытий с малым содержанием пор, обладающих высокой жаростойкостью.

Значительные резервы повышения плотности покрытий кроются в совершенствовании оборудования, используемого для напыления и проведения процесса в контролируемой атмосфере. В частности, большие успехи в этом деле достигнуты в результате применения плазменного напыления плазмотроном, сопло которого снабжено

14.8. Стойкость покрытий, напыленных оксидом алюминия и диоксидом циркония, к термическому влиянию (среднее число циклов до разрушения покрытия)

Напыляемый материал (толщина покрытия 0,3—0,4 мм)	Промежуточный слой, нанесенный плакированным порошком			
	Толщина подслоя системы Ni—Al		Толщина подслоя системы Ni—Cr	
	0,05 мм	0,1 мм	0,05 мм	0,1 мм
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 3,5\% \text{TiO}_2$	3,8	4,2	3,7	7
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 20\% \text{Ni}$	1,3	2	6,2	4
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 20\% \text{Ni} + 5\% \text{Al}$	11	9,1	5	8,2
$\text{ZrO}_2 + 5\% \text{CaO}$	9	18	7	19
$\text{ZrO}_2 + 10\% \text{CaO}$	17	20	19	>20
$\text{ZrO}_2 + 10\% \text{CaO} + 20\% \text{Al—Ni}$	18,3	19,5	—	—
$\text{ZrO}_2 + 10\% \text{CaO} + 20\% \text{Ni—Cr}$	—	—	18	18

насадком [25]; напыления с подачей порошка в струю плазмообразующего газа [18] и плазменного напыления при пониженном давлении в камере для напыления [26].

Определенного эффекта повышения плотности покрытий достигают путем напыления композиционных смешанных материалов [27]. В частности, при газопламенном напылении диоксида циркония в покрытие содержится большое количество пор, которые могут образовать каналы, связывающие поверхность основы с поверхностью покрытия. В случае газопламенного напыления стержнями, изготовленными из диоксида циркония с добавлением 20 или 40% порошка кварцевого песка, можно получить покрытие с пористостью, не превышающей 1—2%. Нанесение таких покрытий на молибденовые электроннагревательные элементы обеспечивает их защиту от окисления во время работы в воздушной атмосфере в течение 40 ч при 1500°C и 0,5 ч при 1800°C .

4. Термообработка жаростойких покрытий. Термообработка изделия с алюминиевым покрытием сопровождается диффузией последнего в основной металл. При продолжительном использовании этих покрытий в области высоких температур алюминий будет постепенно диффундировать в основу, в результате чего образуется толстый слой твердого раствора алюминия в α -железе. Когда концентрация алюминия в этом растворе упадет ниже 6—10%, произойдет резкое снижение жаростойкости. Следовательно, максимальная температура использования покрытия не должна превышать 800°C .

Теплоизоляционные свойства напыленных покрытий. Теплоизоляционные свойства покрытий прежде всего определяются теплопроводностью самого напыляемого материала, а также содержанием пор и оксидов, рассеянных по объему покрытия, их размером и формой, толщиной покрытия, структурой граничного слоя между ним и основным материалом. Пористость покрытия повышает его теплоизоляционные свойства, однако в ущерб жаростойкости и коррозионной стойкости. При увеличении толщины покрытия теплоизоляционные свойства улучшаются, но при этом снижается прочность сцепления с основным металлом. Вопрос о путях повышения теплоизоляционных свойств покрытий в условиях указанных противоречивых тенденций необходимо решать индивидуально в каждом конкретном случае.

Типичными материалами, широко используемыми для напыления теплоизоляционных покрытий, являются керамика и керметы.

На рис. 163 приведены данные изменения теплопроводности керамических материалов в зависимости от температуры [28]. При высоких температурах различие теплопроводности у рассматриваемых керамических материалов невелико. Поэтому при разработке теплоизоляционных керамических покрытий нет необходимости слишком строго учитывать теплопроводность керамики. Более важным является их химическая устойчивость при высоких температурах.

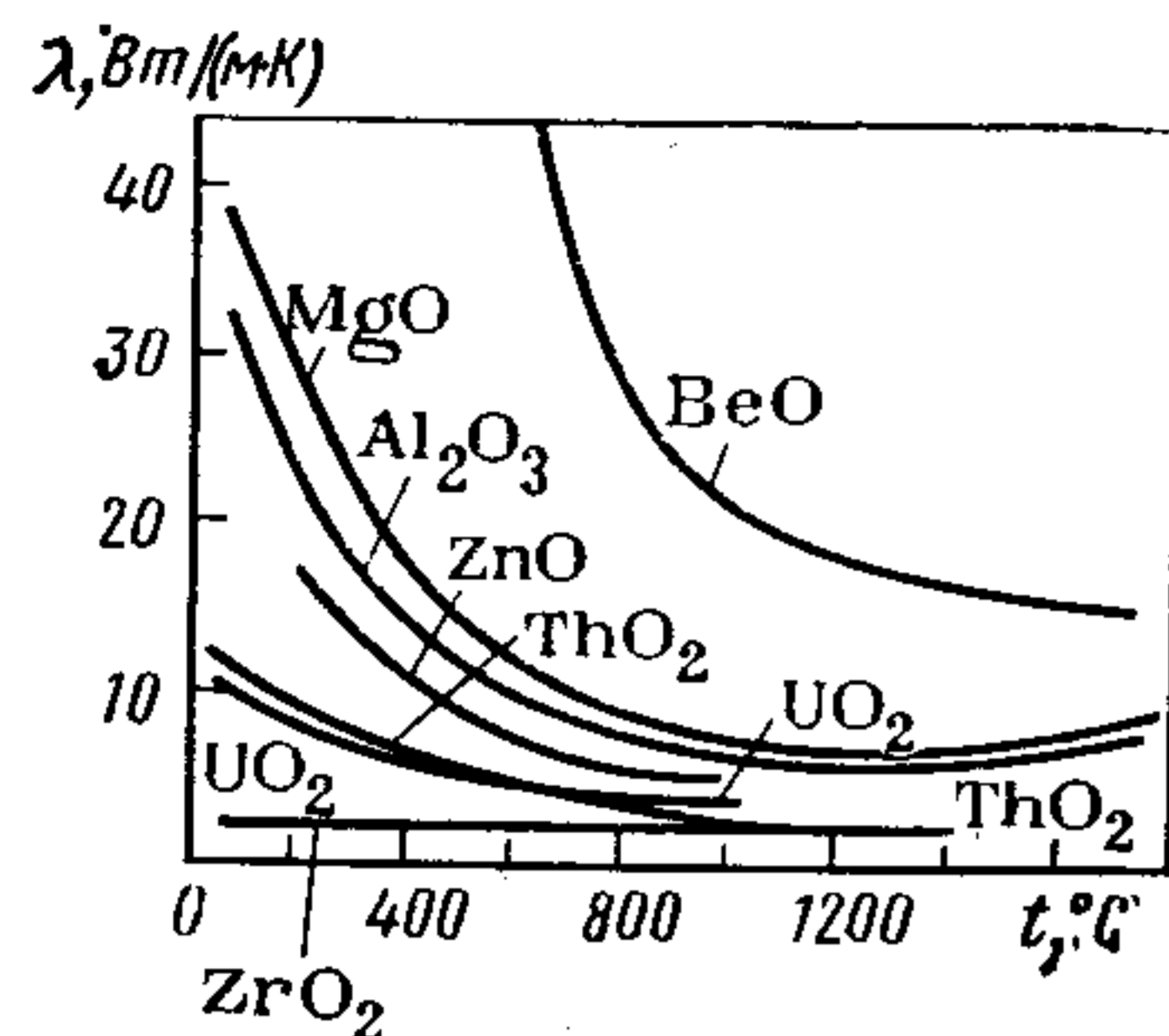


Рис. 163. Изменение теплопроводности λ различных керамических материалов (в пересчете на нулевую пористость) в зависимости от температуры

Для покрытия напыленного порошком из диоксида циркония газопламенным способом (пористость 15%), удельная теплопроводность при температуре 160°C в направлении нормали к поверхности покрытия составляет 0,587 Вт/(м·К), что несколько ниже, чем для огнеупорного материала на основе диоксида циркония. Это связано с отсутствием в огнеупорном материале ярко выраженной направленности пор, характерной для напыленного покрытия [29], хотя величина пористости в обоих случаях примерно одинакова.

В табл. 14.9 приведены данные по теплопроводности различных покрытий, напыленных детонационным способом [31].

Облицовочный лист для ракетного двигателя (толщина основного металла 1,8 мм) с рассмотренным ранее многослойным молибдено-глиноземным покрытием толщиной 1,6 мм испытывали в среде скоростной высокотемпературной газовой струи, эквивалентной по своим параметрам струе выхлопного газа ракетного двигателя, работающего на полную мощность. Испытание показало, что через 30 с после его начала температура на поверхности облицовочного листа стабилизировалась ($\sim 270^\circ\text{C}$), тогда как лист без покрытия прогорел насквозь через 1 с. Это свидетельствует о том, что пористость покрытий значительно повышает их теплоизоляционные свойства и стойкость к термическому влиянию [23]. Изменение температуры облицовочного листа в процессе испытания показано на рис. 164.

В табл. 14.10 приведены значения теплопроводности для различных металлических покрытий, напыленных газопламенным способом, по сравнению с тем же металлом в литом исполнении.

14.9. Теплопроводность покрытий, напыленных детонационным способом

Покрытие	Теплопроводность Вт/(м·К)
Карбид вольфрама с добавлением 9% Со	9,21 (20—260°C)
Карбид вольфрама с добавлением 13% Со	9,21 (20—260°C)
Карбид вольфрама с добавлением 15% Со	9,21 (20—260°C)
Сплав карбида вольфрама (25%) с никелем (7%), вольфрамом и карбидом хрома (Cr_3C_2)	6,7 (260°C)
Карбид хрома (85%) с добавлением 15% сплава никеля с хромом	7,5 (260°C)
Алюминий	2,7—2,8
Диоксид циркония	1,004—1,17
Циркон (ZrSiO_4)	2,17
Силикат алюминия	3,6
Диоксид титана	6,7
Оксид хрома	2,59
Редкоземельные элементы (50% оксида церия)	2,8

14.10. Теплопроводность покрытий, напыленных газопламенным способом

Металлы	Теплопроводность металла, Вт/(м·К)	
	в литом исполнении	покрытия
Медь	272,1	125,6 142,3
Латунь Ms60	92,1 117,2	46,05
Бронза SnBr7	96,29	31,4
Алюминий	159,0	79,54 66,98
Углеродистая сталь с содержанием 0,12% С	66,98	33,4 31,4

Как видно из этой таблицы, теплопроводность покрытий примерно в 2 раза ниже, чем для литых металлов [32].

14.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

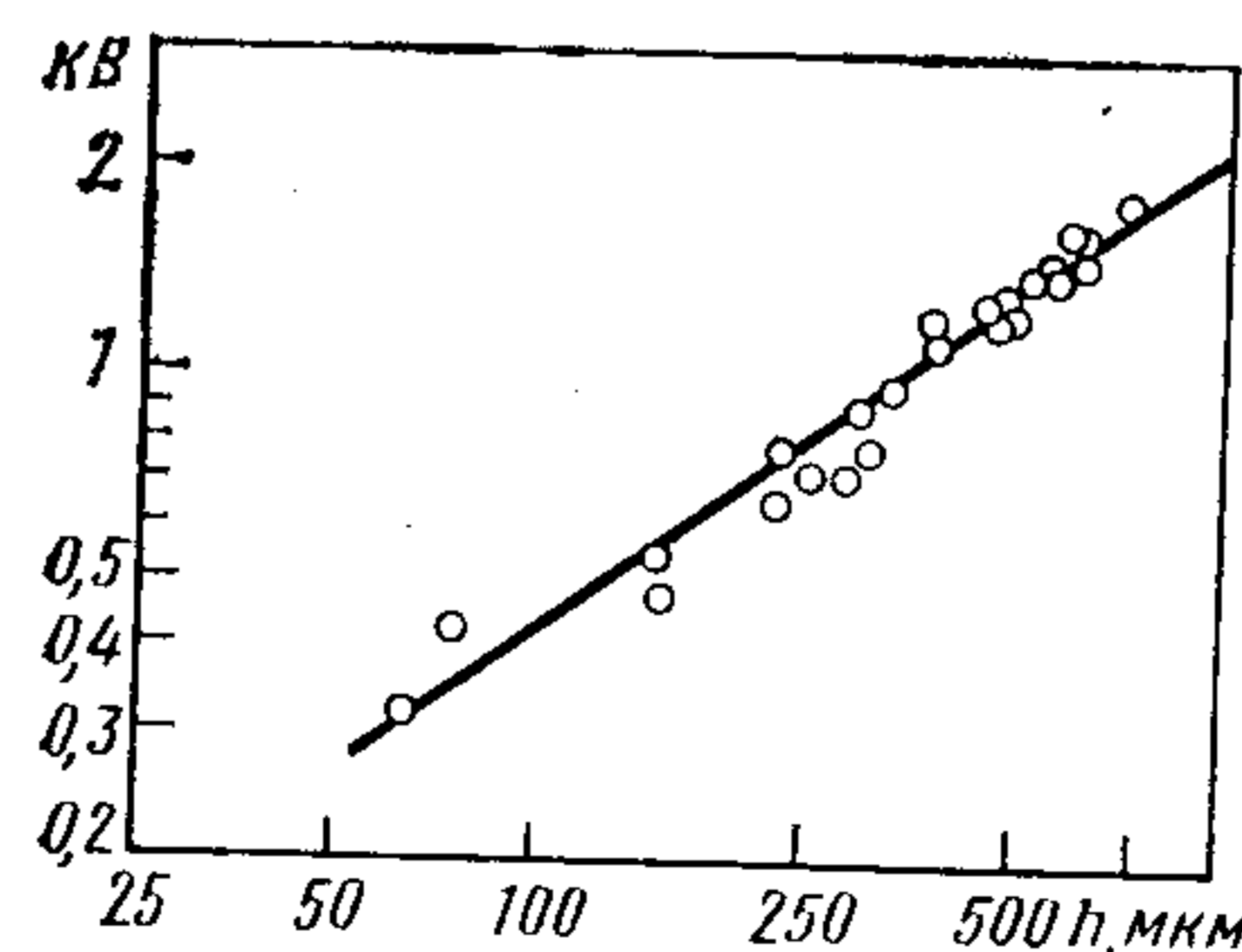
Напыленные покрытия, обладающие высоким пробивным напряжением, электрическим сопротивлением и диэлектрической проницаемостью, широко используют в электротехнике.

На рис. 165 показана зависимость между толщиной покрытия и пробивным напряжением (переменный ток частотой 50 Гц) для покрытия из порошка оксида алюминия с добавлением 2,5% диоксида титана, нанесенного газопламенным методом на низкоуглеродистую сталь.

Для керамических напыленных покрытий соотношение между пробивным напряжением и толщиной покрытия выражают уравнением

$$U = at^n,$$

Рис. 165. Зависимость пробивного напряжения (кВ) от толщины покрытия h из оксида алюминия с добавлением 2,5% диоксида титана



где U — пробивное напряжение; a — постоянная, зависящая от напыляемого материала покрытия; t — тол-

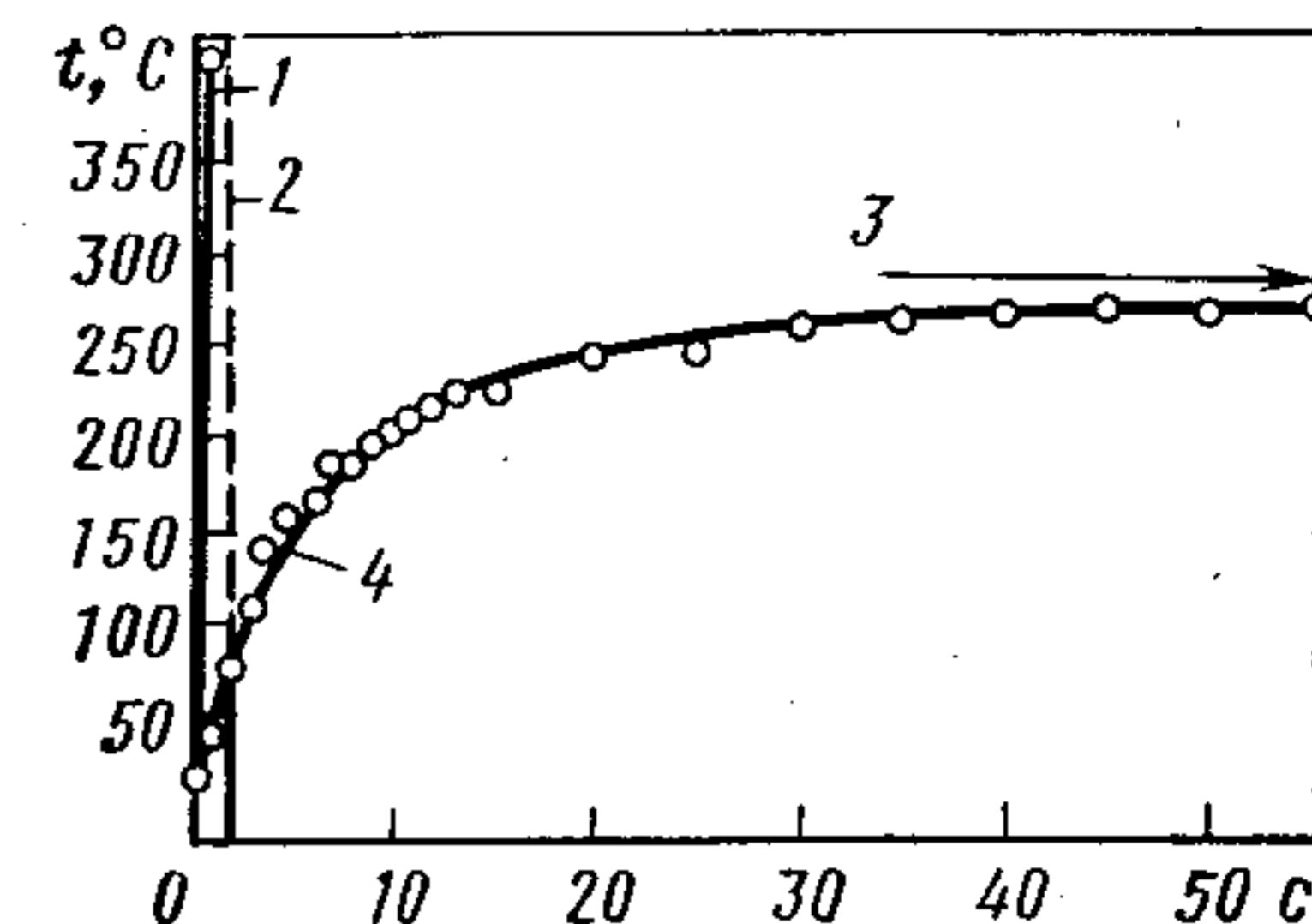


Рис. 164. Изменение температуры листа с облицовочным покрытием для задних газотводных элементов ракетного двигателя:

1 — лист коррозионно-стойкой стали типа 17-7 толщиной 1,78 мм без покрытия; 2 — момент прекращения сжигания ракетного топлива; 3 — сгорание ракетных уплотнителей; 4 — коррозионно-стойкая сталь типа 17-7 с многослойным молибдено-глиноземным покрытием

14.11. Пробивное напряжение различных керамических покрытий *

Покрытие (добавка, %)	Толщина покрытия, мм	Сопротивление, Ом**	Пробивное напряжение, кВ	Пробивное напряжение для покрытия толщиной 508 мкм, кВ***
Al ₂ O ₃ (2,5% TiO ₂)	533	7,4×10 ¹⁰	1,4	1,34
	457	3,9×10 ¹⁰	1,3	1,42
	483	1,8×10 ¹¹	1,2	1,26
	483	2,3×10 ¹¹	1,3	1,36
Al ₂ O ₃	635	2,5×10 ⁹	1,5	1,2
	508	1,8×10 ⁹	1,3	1,3
	483	6,2×10 ⁹	1,3	1,36
	432	5,5×10 ⁹	1,1	1,28
ZrO ₂ (0,5% Al ₂ O ₃ 5% CaO 3% SiO ₂)	406	9,2×10 ¹⁰	1,0	1,25
	406	7,0×10 ¹⁰	0,9	1,13
	330	2,0×10 ⁸	0,72	1,14
	330	2,3×10 ⁸	0,77	1,19

* Измерения осуществляли при температуре воздуха 17°C и относительной влажности 30%.
 ** Сопротивление измеряли при применении постоянного тока напряжением 500 В.
 *** Пересчет на толщину эталонного покрытия (508 мкм) осуществляли по уравнению $U=at^n$.

щина покрытия; n — постоянная (обычно $n > 1$ зависит от метода напыления и термообработки покрытия).

В табл. 14.11 приведены значения пробивного напряжения покрытий, напыленных газопламенным способом из следующих мате-

риалов: оксида алюминия с добавлением 2,5% диоксида титана, чистого оксида алюминия и диоксида циркония, содержащего 0,5% оксида алюминия, 5% оксида кальция и 3% диоксида кремния [33].

На рис. 166 показана зависимость изменения удельного сопротивления (постоянный ток напряжением 0,001—100 В) от температуры покрытий из оксида алюминия, нанесенных порошковым газопламенным напылением при различной пористости. На рисунке представлены данные для покрытия ALCOA A-10, содержащего более 95% α-глинозема и до 0,15% оксида натрия, а также для покрытий из оксида алюминия с добавлением 2,5% диоксида титана [34].

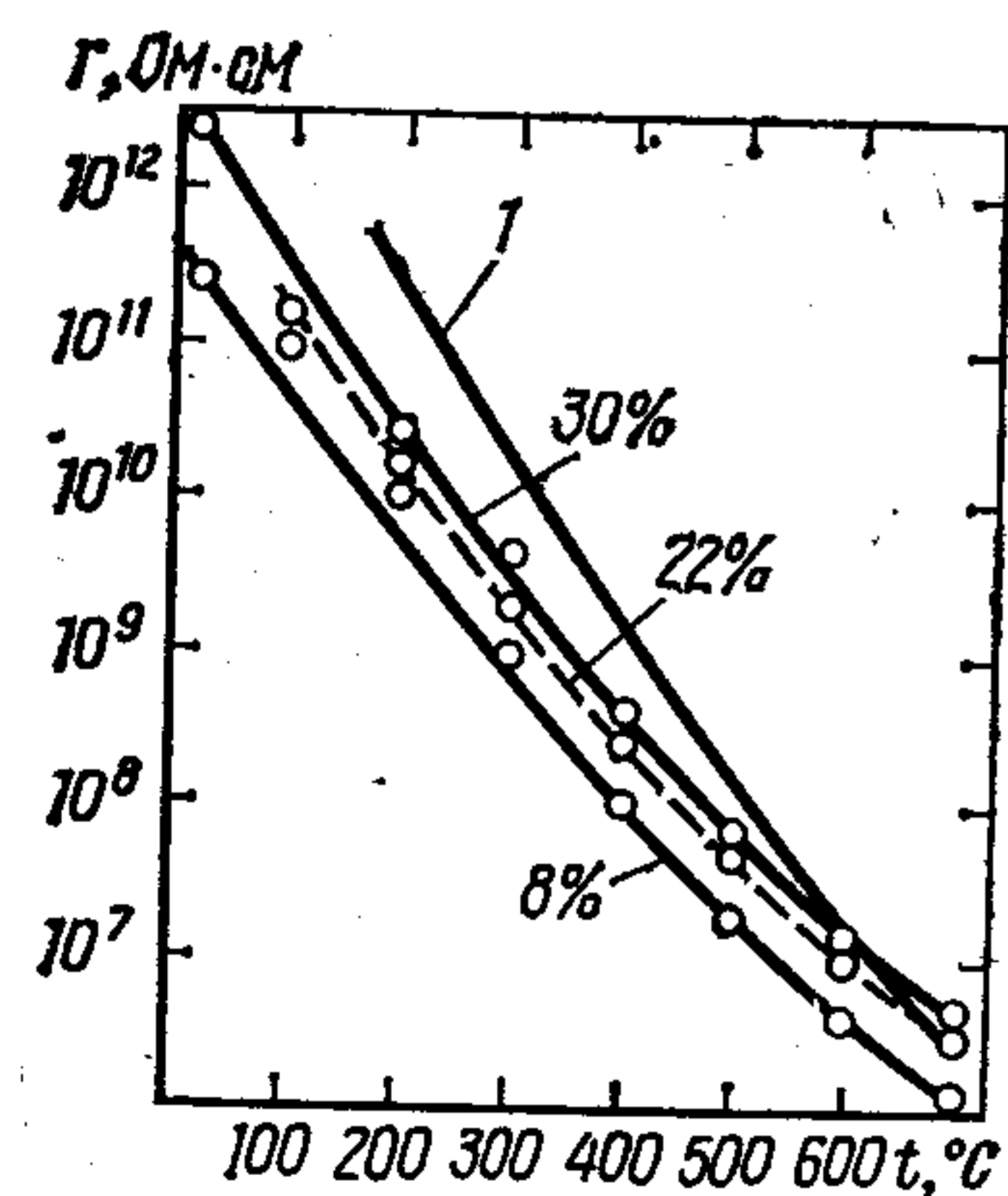


Рис. 166. Зависимость удельного сопротивления r покрытий оксида алюминия, имеющих разную пористость (%), от температуры: 1 — покрытие ALCOA A-10, пористость 18%

14.12. Удельное электросопротивление для различных металлических покрытий (20°C)

Металлы	Удельное электросопротивление металла, мОм·м	
	в литом исполнении	покрытия
Медь (99,95%)	0,0172—0,02	0,03—0,0433
Алюминий (98%)	0,0217—0,026	0,085—0,103
Свинец (99,9%)	0,216—0,217	0,23—0,243
Латунь (40% Zn)	0,0695—0,0708	0,119—0,525
Фосфористая бронза (8,4% Sn, 0,26% P)	0,103	0,2301—0,28
Псевдосплав свинца с медью CuPb50 (50% Pb+50% Cu)	0,0598—0,06	0,078—0,0802
Псевдосплав AlPb70 свинца (72,5%) с алюминием (27,5%)	—	0,0399—0,0401
Сталь с содержанием 0,12 C	—	0,537—0,59

В табл. 14.12 приведены данные по удельному электросопротивлению для различных металлических покрытий, напыленных газопламенным способом (пламя нейтральное, расстояние от среза сопла горелки до поверхности изделия 120 мм), по сравнению с соответствующими данными для тех же металлов в обычном литом состоянии [32].

Электросопротивление напыленных покрытий зависит от содержания в них оксидов, что в свою очередь определяется режимом напыления.

В покрытии из оксида алюминия, выдержанном после напыления в среде с высокой влажностью, возникает большой ток утечки. Значительного снижения тока утечки достигают путем дополнительной обработки покрытия, включающей нанесение на него органической смолы, уплотняющей поры, с последующим ее отвержде-

14.13. Ток утечки при испытаниях на пробой для покрытий из окиси алюминия в состоянии после плазменного напыления и после пропитки покрытия эбмазками

Состояние покрытия	Напряжение постоянного тока, В	Сила тока утечки, мкА
После напыления	100	0,2
	200	0,4
	300	0,7
	400	1,3
	500	3
Обработка Al ₂ O ₃ фенольной смолой	500	0,0026 0,0047 0,0054
Обработка Al ₂ O ₃ уретаном	500	0,0002 0,0002 0,0002
Обработка Al ₂ O ₃ изоляционным лаком	500	0,0001 0,0002 0,002

нием при температуре 150—205° С. Особенно большого эффекта, связанного с прониканием смолы внутрь пор, достигают при использовании уретановой смолы и изоляционного лака.

В табл. 14.13 приведены данные по величине тока утечки для покрытия, напыленного оксидом алюминия (96%) плазменным способом в состоянии после выдержки в течение 24 ч при температуре окружающей среды 36° С и относительной влажности 95% (пористость покрытия 14,6%).

Испытания на тепловой удар с перепадами температур от 204 до —65° С показали некоторое отслоение изоляционного лака на уголках образцов. Поэтому для уплотнительной обработки напыленных покрытий из оксида алюминия наиболее пригоден уретан [30].

14.6. КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИИ

Ниже рассмотрены свойства покрытий в основном с точки зрения эффективности защиты черных металлов от коррозии. Если покрытие плотное и полностью закрывает основной металл от проникания к нему агрессивной среды, то коррозионная стойкость изделия определяется уровнем коррозионной стойкости самого материала покрытия к действию конкретной среды. В случае пористого покрытия или при наличии в нем возникших в процессе эксплуатации дефектов агрессивные компоненты среды беспрепятственно проникают к поверхности основного металла.

При изучении коррозионной стойкости покрытий прежде всего следует рассматривать электрохимические взаимодействия покрытия с основным металлом в данной агрессивной среде. Алюминиевое и цинковое покрытия относятся к числу типичных коррозионно-стойких покрытий для защиты черных металлов. На рис. 167 приведены скорости коррозии алюминия, цинка, железа в водных растворах с различными значениями рН. Для цинка характерна высокая стойкость к растворам с водородным показателем рН=5÷12, а для алюминия — к растворам с рН=3÷4 [35].

В случае проникания агрессивной среды к основному металлу возможны два варианта взаимодействия покрытия с основным металлом. Если потенциал покрытия по отношению к стали является отрицательным, то при проникании агрессивной среды через покрытие к поверхности основы последняя станет анодом, обеспечивая электрохимическую защиту основного металла. В противном случае происходит ускоренная коррозия основы. Следовательно, для защиты стали желательнее выбирать такой материал покрытия, который по отношению к ней служит катодом. Цинк является типичным катодным покрытием при нанесении на сталь. Алюминий же по отношению к стали может быть как анодом, так и катодом, в зависимости от состава агрессивной среды. Электрохимическая коррозия характеризуется постоянной величиной коррозии в единицу времени, поэтому срок службы покрытия определяется его толщиной. На рис. 168 приведены данные, демонстрирующие пропор-

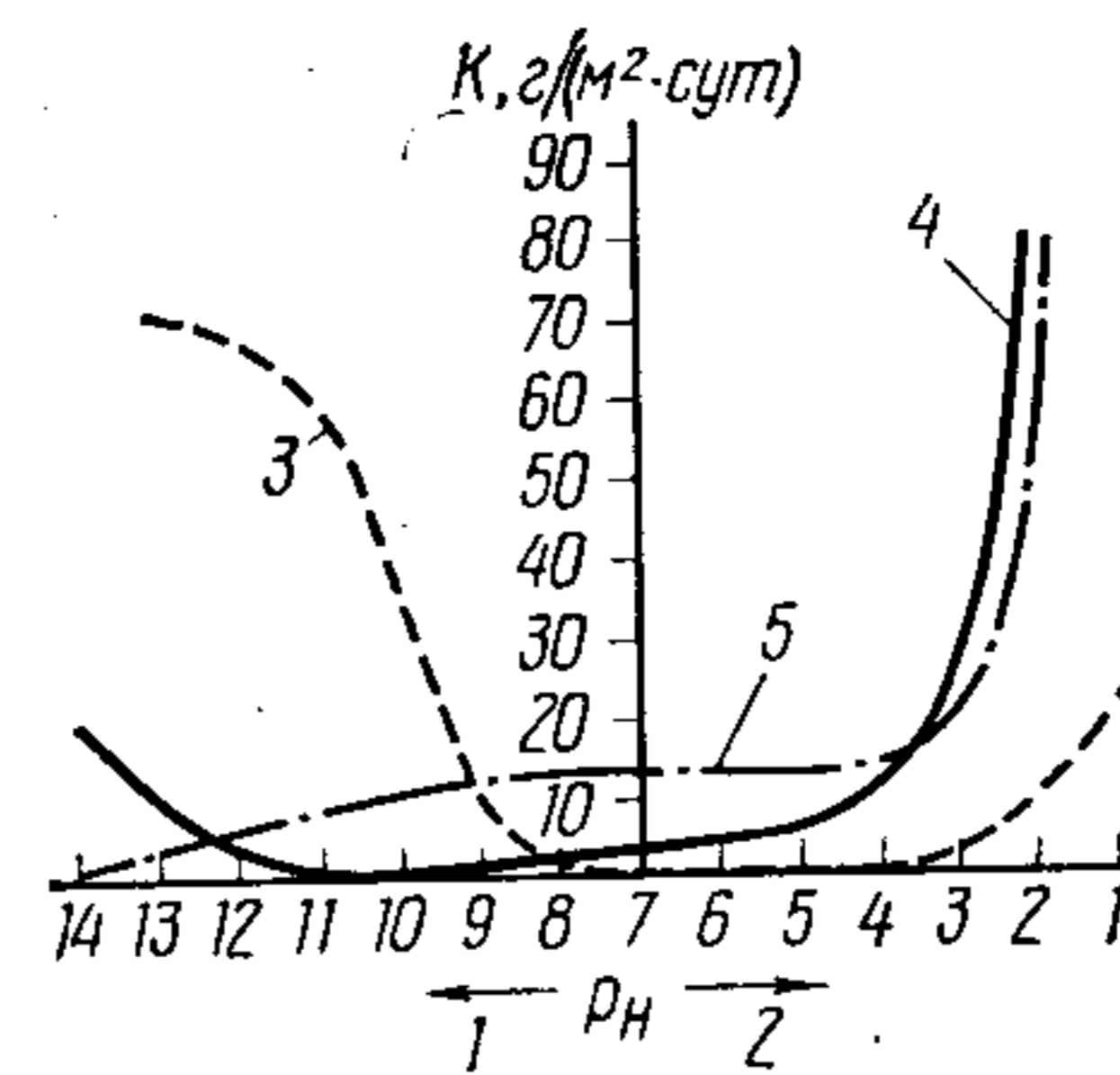


Рис. 167. Скорость коррозии [$г/(м^2 \cdot сут)$] алюминия и цинка в водных растворах с различными значениями рН:

1 — щелочные свойства; 2 — кислотные свойства; 3 — алюминий; 4 — цинк; 5 — железо

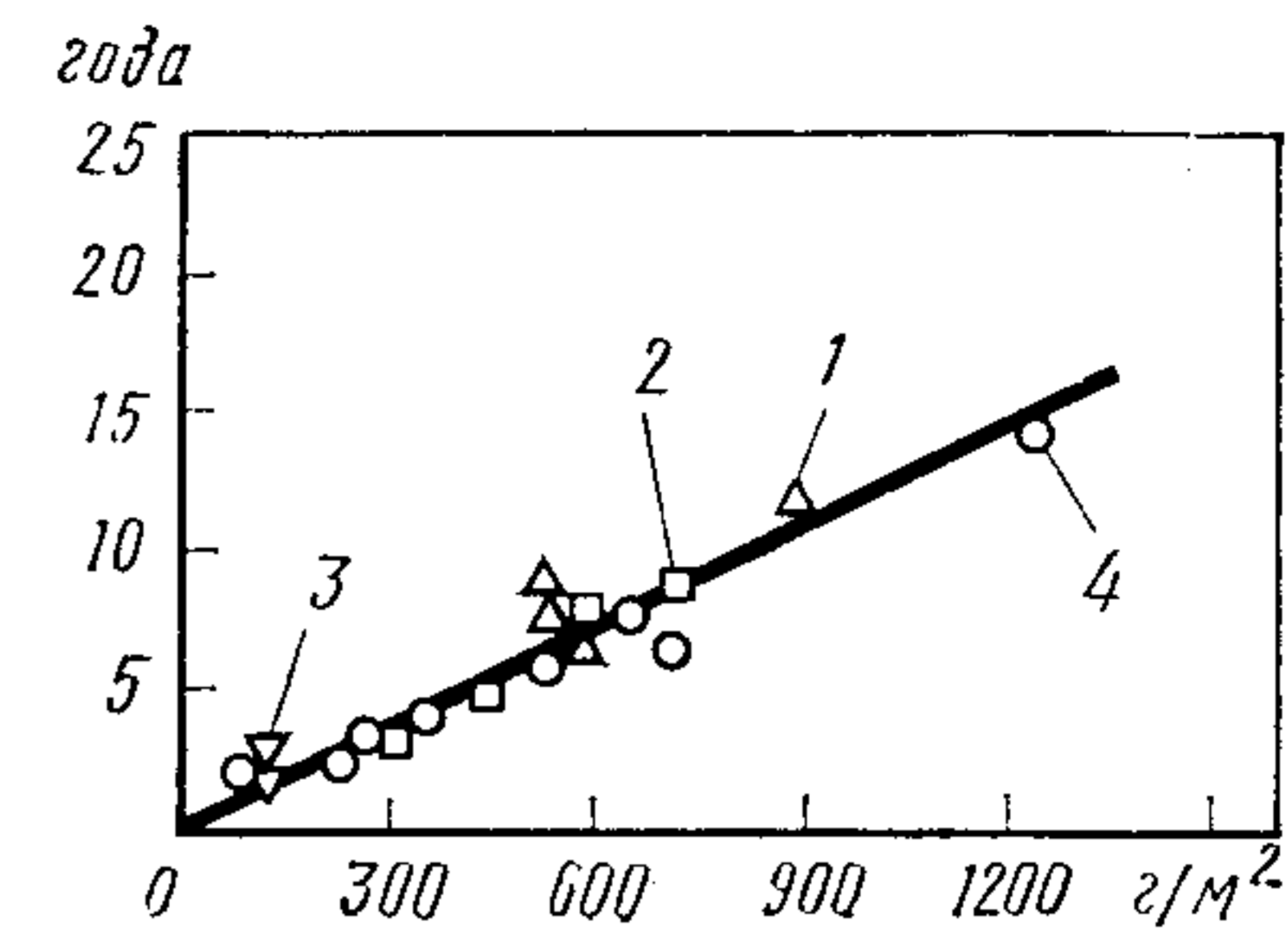


Рис. 168. Коррозионная стойкость (потеря массы $г/м^2$) цинковых покрытий в промышленных районах Англии (число лет до возникновения 5% коррозии):

1 — гальваническое покрытие; 2 — покрытие, полученное погружением в расплавленный металл; 3 — диффузионное покрытие; 4 — напыленное покрытие

циональную зависимость срока службы от толщины цинковых покрытий, нанесенных на стальные изделия при работе в промышленных районах Англии [35].

Развитие коррозии металлических изделий зависит от состояния агрессивной среды. В связи с этим следует обратиться к результатам испытаний на коррозионную стойкость в атмосферных условиях для стальных изделий с напыленными покрытиями [36]. Испытаниям подвергали стальные изделия с цинковым и алюминиевым покрытиями или с покрытием из сплава цинка с алюминием* в состоянии после напыления или последующей окраски покрытия.

Ниже проведены результаты атмосферных испытаний, проведенных в течение 6 лет (с июня 1968 г.) в четырех районах с характерными условиями. Испытанию подвергали стальные полосы и швеллеры с покрытиями после напыления или после окраски покрытий кистью в один слой грунтовкой на бутиралеевой основе и дважды на фталатной основе.

Во время выдержки в атмосферных условиях масса образцов сначала увеличивалась, а затем начинала уменьшаться. Увеличение массы связано со скоплением продуктов коррозии на поверхности, а уменьшение — с их выветриванием. Переход от увеличения массы к уменьшению наступал раньше в районах с высокой концентрацией агрессивных компонентов в окружающей среде. В начальный период испытаний (в продолжение 1—3 лет) изменения массы носили переменчивый характер, а в продолжение последних 3 лет заметно стабилизировались. Такой характер изменений массы образцов в процессе испытаний опровергает правомерность заключений на долгосрочную перспективу по результатам краткосрочных испыта-

* Сплав содержит 81,9% Zn; 17,6% Al; 0,55% Cu; 0,008% Pb; 0,006% Fe; 0,005% Cd и 0,03% Mg.

ний. Скорость и характер коррозии стали показали зависимость от района испытаний. В частности, при испытаниях в районах с высокой концентрацией заводов и на побережье коррозия имела вид ржавчины и разъедания поверхности образцов.

При испытании в промышленном районе образцы с цинковым покрытием имели большую величину коррозии. Образцы с алюминиевым покрытием имели хорошие и стабильные результаты при испытаниях в промышленных районах с высокой и средней концентрацией заводов. Такое состояние образцов с цинковым и алюминиевым покрытиями связано с тем, что в промышленном районе преобладающий агрессивный компонент — сернистый газ.

В прибрежном районе хорошие результаты показали образцы с цинковым покрытием. Для этих образцов характерно увеличение массы в течение первых двух лет испытаний, что связано с осаждением хлоридов, образующих на поверхности образцов плотную пленку, блокирующую пористость покрытия. Образцы с покрытием из сплава цинка с алюминием (от 40% Al до 60% Zn или от 60% Al до 40% Zn) показали хорошие и стабильные результаты во всех районах, включая промышленный и прибрежный [38]. Это объясняется образованием на поверхности образцов прочных пленок продуктов коррозии, надежно блокирующих пористость покрытий.

В практике окраски напыленных покрытий очень важно правильно выбрать основу красителя, поскольку применение красителя, соответствующего виду напыленного покрытия и условиям эксплуатации, показывает высокие результаты даже при низкой стоимости и доступности выбранного красителя. В частности, краситель на фталатной основе, будучи одним из широко распространенных и доступных, повышает стойкость покрытия в 3—4 раза по сравнению с тем же покрытием без окраски.

В США были предприняты крупномасштабные долгосрочные (19 лет) испытания образцов с алюминиевым и цинковым напыленными покрытиями в морской воде, на воздухе в прибрежном районе и в промышленном районе [37].

Испытания проводили на образцах в виде пластин из низкоуглеродистой стали* размером 102×152×3,2 мм (для испытания в воде 102×305×3,2 мм), подвергнутых со всех сторон газопламенному напылению алюминием (более 99,0%) и цинком (более 99,9%) с использованием проволоки Ø 3,2 мм. Перед напылением образцы подвергали предварительной обработке, а после напыления — уплотнению окраской. В табл. 14.14 приведены данные по условиям подготовки образцов для испытаний в морской воде. Образцы № 14—28 использовали для изучения эффекта предварительной обработки (перед напылением) и имели постоянную толщину напыленного покрытия, равную 0,23 мм. Для испытаний в морской воде образцы устанавливали вертикально, а для испытания в атмосфере — под углом 30° к горизонтали.

* Сталь содержит 0,08% С; 0,3% Mn; 0,003% Si; 0,08% P, 0,03% S и 0,3% Cu.

14.14. Условие подготовки образцов с покрытиями для испытаний в морской воде

Образцы с алюминиевым покрытием				Образцы с цинковым покрытием			
Номер образца	Предварительная обработка *	Толщина покрытия, мм	Окраска **	Номер образца	Предварительная обработка *	Толщина покрытия, мм	Окраска **
1	2	0,08	WP+CV(1)	1	2	0,08	CR(1)
2	2	0,08	WP+CV(2)	2	2	0,08	CR(2)
3	2	0,15	—	3	2	0,15	—
4	2	0,15	WP+CV(1)	4	2	0,15	CR(1)
5	2	0,15	WP+CV(2)	5	2	0,15	CR(2)
6	2	0,23	—	6	2	0,23	—
7	2	0,23	WP+CV(1)	7	2	0,23	CR(1)
8	2	0,23	WP+CV(2)	8	2	0,23	CR(2)
9	2	0,23	—	9	2	0,30	—
10	2	0,30	WP+CV(1)	10	2	0,30	CR(1)
11	2	0,30	WP+CV(2)	11	2	0,30	CR(2)
12	2	0,30	—	12	2	0,38	—
13	2	0,38	—	13	2	0,46	—
14	1	0,46	—	14	1	0,23	—
15	1	0,23	WP+CV(1)	15	1	0,23	CR(1)
16	1	0,23	WP+CV(2)	16	1	0,23	CR(2)
17	3	0,23	—	17	3	0,23	—
18	3	0,23	WP+CV(1)	18	3	0,23	CR(1)
19	3	0,23	WP+CV(2)	19	3	0,23	CR(2)
20	5	0,23	—	20	5	0,23	—
21	5	0,23	WP+CV(1)	21	5	0,23	CR(1)
22	5	0,23	WP+CV(2)	22	5	0,23	CR(2)
23	4	0,23	—	23	4	0,23	—
24	4	0,23	WP+CV(1)	24	4	0,23	CR(1)
25	4	0,23	WP+CV(2)	25	4	0,23	CR(2)
26	6	0,23	—	26	6	0,23	—
27	6	0,23	WP+CV(1)	27	6	0,23	CR(1)
28	6	0,23	WP+CV(2)	28	6	0,23	CR(2)

* 1 — пескоструйная обработка крупным кварцевым песком; 2 — напыление подслоя стали после обдувки крупным кварцевым песком; 3 — пескоструйная обработка мелким кварцевым песком; 4 — напыление подслоя стали после обдувки мелким кварцевым песком; 5 — дробеструйная обработка дробью отбеленного чугуна; 6 — напыление подслоя стали после дробеструйной обработки дробью отбеленного чугуна.

** WP — тонкая грунтовка; CV — винилалюминиевый краситель; CR — хлорированный каучук; в скобках: 1 — один слой, 2 — два слоя.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы.

1. Алюминиевые покрытия толщиной 0,08—0,15 мм обеспечивают полную защиту основного металла (даже без окраски) при испытаниях в морской воде и атмосферном воздухе (в прибрежном ветреном и промышленном районах). Эти покрытия хорошо защищают сталь даже в состоянии частичного вздутия.

2. Для того чтобы цинковое покрытие без последующей окраски обеспечивало надежную защиту основного металла, толщина покрытия должна быть не менее 0,3 мм при испытаниях в морской

ПРИМЕНЕНИЕ НАПЫЛЕНИЯ

воде и не менее 0,23 мм при испытаниях в прибрежном ветреном и промышленном районах. На поверхности цинковых покрытий образуется слой продуктов коррозии, обладающий защитными свойствами. В случае окраски покрытий надежная защита основного металла обеспечивается при толщине покрытия менее 0,15 мм.

3. Алюминиевые покрытия толщиной 0,08 мм в случае последующей окраски (один слой тонкой грунтовки и один или два слоя винилалюминиевого красителя) сохраняют хороший внешний вид и защищают основной металл от коррозии при испытаниях в ветреном прибрежном районе.

Винилалюминиевый краситель на поверхности цинкового покрытия толщиной 0,08 мм быстро исчезает, не обеспечивая защиты стали от ржавчины. Эта окраска частично сохраняется лишь на обратной стороне образцов, а на лицевой стороне она исчезает практически полностью.

Винилалюминиевый краситель на поверхности цинковых покрытий при испытаниях в прибрежном ветреном районе показал низкую стойкость в связи с агрессивным действием хлоридов. Такой вывод обоснован тем, что при испытаниях в промышленном районе, атмосфера которого отличается низкой концентрацией хлоридов, названная окраска на цинковых покрытиях успешно выполнила свои защитные функции.

4. Коррозия стали не развивалась даже в случаях механических повреждений алюминиевых покрытий и локального обнажения основного металла, что связано, как предполагают, с электрохимической защитой стали алюминиевым покрытием. В частности, некоторые образцы после нескольких лет выдержки в состоянии локальных механических повреждений алюминиевого покрытия показали лишь незначительную коррозию основного металла, на поверхности которого после удаления ржавчины выявлялись следы предварительной дробеструйной (или пескоструйной) обработки.

5. Защитное действие алюминиевого и цинкового покрытия не зависит от технологии предварительной обработки поверхности основного металла перед напылением, что указывает на отсутствие какой-либо надобности в подслое перед нанесением на изделие алюминия или цинка. В случае напыления больших площадей или при напылении покрытия толщиной более 0,15 мм для получения хороших результатов достаточно подвергнуть основной металл пескоструйной обработке крупным песком.

6. Хлорированный каучук оказался малоэффективным защитным средством как для алюминиевых, так и для цинковых покрытий. В частности, при испытаниях в прибрежном ветреном районе окраска хлорированным каучуком на поверхности цинкового покрытия исчезла уже в самый начальный период испытаний, что свидетельствует об отсутствии проникания красителя в поры покрытия. При испытаниях в г. Нью-Йорке на образцах с окраской покрытий хлорированным каучуком полностью исчезло цинковое покрытие и на 10% исчез расположенный под ним подслой, напыленный на основной металл.

Способы газопламенного и электродугового напыления имеют наиболее длительную историю, однако область их применения не охватывает всех материалов, пригодных для напыления. В частности, газопламенным способом можно напылять материалы, температура плавления которых ниже температуры газокислородного пламени. Дуговое напыление обеспечивает нагрев до самых высоких температур, однако его применение ограничено электропроводными материалами. Кроме того, дуговой способ непригоден для напыления порошковыми материалами. В последнее время разработаны новые способы напыления (детонационное, плазменное и электроимпульсное), применение которых позволяет проводить напыление практически любым твердым веществом.

Напыление используют как способ поверхностной обработки конструкционных материалов, деталей машин, инструмента и других изделий с целью повышения их износостойкости, жаростойкости, теплоизоляционных и электроизоляционных свойств, коррозионной стойкости и т. п.

Напыление применяют в двух основных областях: 1) напыление коррозионно-стойких покрытий на различные емкости в химической промышленности, детали судовых механизмов, элементы судовых конструкций и т. п.; 2) реставрация изношенных инструментов и деталей машин.

В последнее время в связи с бурным развитием техники значительно возросли производительность и быстрдействие машин и механизмов, что потребовало соответствующего повышения эксплуатационных показателей деталей и конструктивных элементов. Решение этой задачи в условиях экономии сырьевых ресурсов требует проведения мер повышения износостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости имеющихся промышленных материалов и увеличения за счет этого срока службы деталей машин. Повышение эксплуатационных показателей материалов во многом может быть достигнуто путем улучшения состояния и повышения свойств их поверхности.

Напылением сравнительно просто наносить покрытия на любом ограниченном участке поверхности изделия из самых разнообразных материалов, надежно защищать эти участки и получать желаемые свойства покрытия. Умелое использование преимуществ на-

пыления на стадии проектирования изделий открывает перспективу повышения интереса со стороны многих отраслей к технологии напыления как способу повышения экономичности конструкции и ее технических характеристик.

Применение технологии напыления требует правильного использования особенностей напыленных покрытий. При этом недостаточно знаний этих особенностей в их общем изложении, поскольку применение напыленного покрытия, свойства и состояние которого определяются сложнейшим переплетением многочисленных факторов, требует индивидуального подхода в каждом конкретном случае. При надлежащем выборе вида покрытия и способа его нанесения нередко получают непредвиденно высокие результаты.

Ниже перечислены наиболее распространенные области применения технологии напыления, используемой для защиты поверхностей деталей и узлов машин от абразивного, эрозионного, коррозионного и других видов воздействия рабочей среды.

1. Упрочнение деталей машин в общем машиностроении. Автомобильная промышленность: распределительные и коленчатые валы, валы водяных насосов, шкворни, разжимные кулаки тормозов, головки поршней, цилиндры, поршневые кольца, диски сцепления, выхлопные клапаны и т. п.

Авиационная промышленность: сопла ракетных двигателей, элементы реактивных двигателей, лопатки турбин, различные переходники, наконечники, листы для облицовки фюзеляжа и т. п.

Электротехническая промышленность: конденсаторы, отражательные поверхности антенн систем связи и т. п.

Цементная промышленность: лопасти вентиляторов, детали конвейеров, клапаны и седла клапанов, подшипники и т. п.

Химическая промышленность: клапаны и седла клапанов, валы и крыльчатки (рабочие колеса) насосов, корпуса насосов химических циркуляционных систем, плунжеры, цилиндры и кольца кислотоупорных насосов и т. п.

Угольная и металлургическая промышленность: лопасти дымососов, детали ковшей и черпаков, грохоты классификаторов, детали воздуходувок, матрицы, пуансоны и другие элементы штампов, пресс-форм и т. п.

Энергетическая промышленность: шнеки питателей для подачи угля, детали вентиляторов и дымососов для отвода отходящих газов, паровые клапаны, детали конвейеров и т. п.

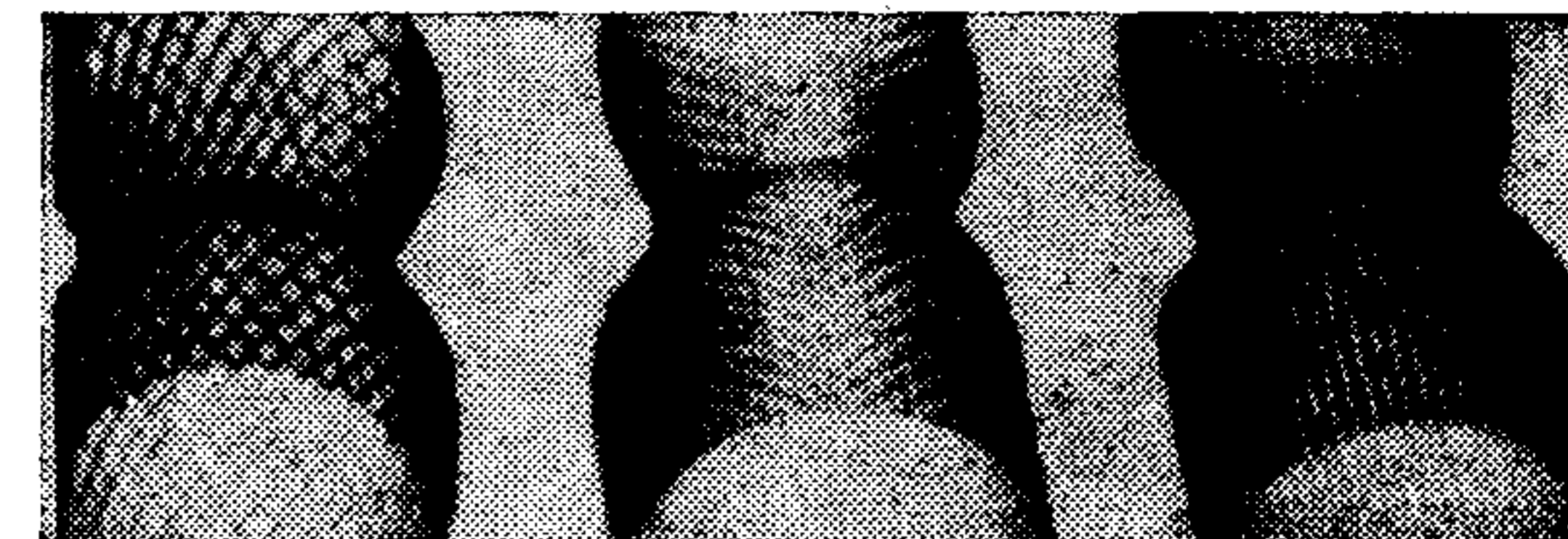
Изделия общего назначения: калибры (пробки, скобы), резьбовые калибры, оправки, детали шлифовальных станков, центры токарных станков, шпиндели и валы, шнеки экструзионных машин и т. п.

Прочие изделия: подшипники различных конструкций, коленчатые валы, ролики и валки, зубья шестерен и т. п.

2. Применение напыления в областях, требующих коррозионной стойкости покрытий и стойкости к окислению при повышенной температуре.

Цинковые покрытия в основном применяют для повышения стой-

Рис. 169. Металлические сетки для армирования покрытий, напыляемых на сопла реактивных двигателей



кости стальных изделий в пресной и морской воде, в воздушной атмосфере, при эксплуатации в материковых и прибрежных районах. Покрытия наносят на элементы стальных конструкций мостов, башен, шлюзов и судов, а также на резервуары для хранения воды, трубопроводы, вагонетки горношахтного оборудования, газовые емкости и резервуары, сантехнические узлы и детали судовых душевых, водоочистных сооружений, воздуходувок, насосов, стальных шасси, поручней и т. п.

Алюминиевые покрытия применяют для защиты от коррозии стальных изделий, эксплуатируемых в промышленных и прибрежных районах, в местах контактирования с морской водой, а также для защиты сталей от окисления при работе в условиях нормальной и повышенной температуры.

Покрытие наносят на резервуары для хранения воды, элементы стальных конструкций, работающих в атмосфере с высокой концентрацией сернистых соединений, емкости для хранения пищевых продуктов, камеры сгорания, дымоходы, корпуса судов и т. п.

Сопла реактивных двигателей. Напыление сопел осуществляют окисью алюминия или диоксидом циркония способом газопламенного напыления прутками [1]. При напылении сопел ракетных двигателей с целью упрочнения самого покрытия и повышения его

прочности сцепления с основой используют арматуру в виде сетки из проволоки коррозионно-стойкой стали. Эти сетки, форма которых показана на рис. 169, закрепляют на внутренней поверхности сопел методом пайки или сварки сопротивлением, а затем на них напыляют покрытия большой толщины из оксида алюминия или диоксида циркония.

На рис. 170 сопоставлены теплоизоляционные свойства различных защитных покрытий, напыленных на пластины из сплава N-155* газопламенным способом керамическими материалами. На рисунке показаны значения температуры на поверхности покрытия раз-

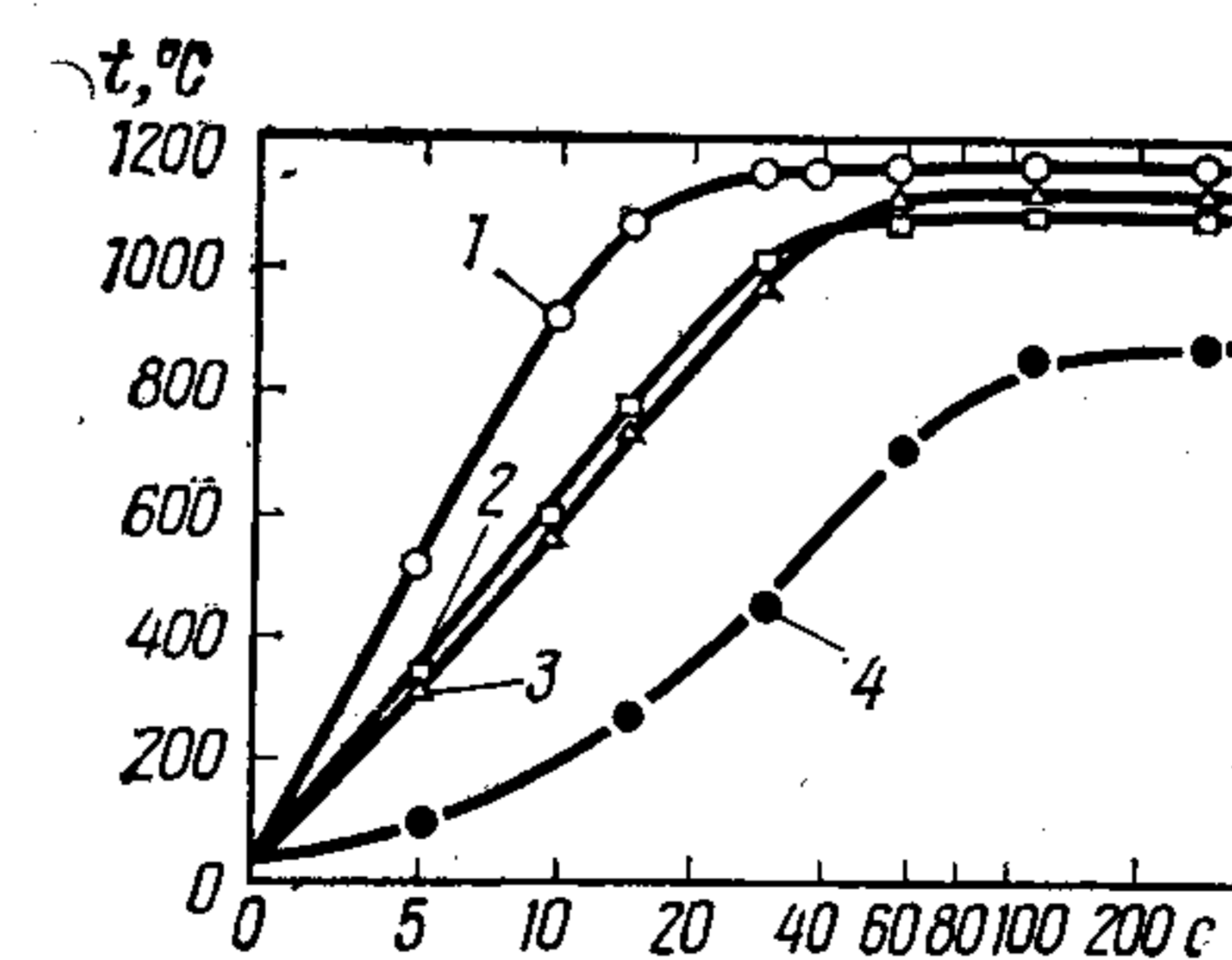


Рис. 170. Теплоизоляционные характеристики керамических покрытий:

1 — без покрытия; 2 — покрытие из диоксида циркония толщиной 0,89 мм; 3 — покрытие из оксида алюминия толщиной 0,89 мм; 4 — армированное покрытие толщиной 3,45 мм

* Сплав N-155 содержит 0,1% C; 1,5% Mn; 0,5% Si; 21,3% Cr; 20% Ni; 20% Co; 1% (Nb+Ta); 2,5% V; 3% Mo и 0,15% N₂.

личных образцов, подвергнутых нагреву в одинаковом режиме (1150°C) в течение 300 с. Через 30 с после начала нагрева температура образцов с покрытием из оксида алюминия или диоксида циркония была на 220°C, а при установившемся режиме — на 55°C ниже, чем для образца без покрытия. Через 40 с после начала нагрева температура образца с армированным металлической сеткой покрытием была на 720°C, а при установившемся режиме — на 280°C ниже, чем для образца без покрытия.

Эти данные подтверждают высокую эффективность напыленных керамических покрытий в части повышения теплоизоляционных свойств.

Для получения теплоизоляционных покрытий используют тугоплавкие материалы с низкой теплопроводностью, исключаяющей интенсивную передачу теплоты через покрытие к основному металлу. Этим требованиям удовлетворяют керамические покрытия. Для снижения температуры внутренних слоев покрытия необходимо увеличить его толщину. Теплоизоляционные свойства покрытия зависят также от его пористости, которая, будучи весьма благоприятной для теплоизоляции, вызывает снижение адгезии. Поэтому на практике используют пористые покрытия большой толщины, а для повышения его адгезии на основной металл напыляют тонкий и плотный подслой из сплава никеля, на который затем напыляют теплоизоляционное керамическое покрытие. При резком нагреве поверхности керамического покрытия в нем возникает большой температурный градиент (по сечению), обусловленный низкой удельной теплопроводностью покрытия. Связанные с этим температурным градиентом термические напряжения создают опасность разрушения покрытия. Кроме того, керамические покрытия большой толщины не обладают должной механической прочностью. Поэтому в случаях, когда из соображений повышения теплоизоляционных свойств необходимо напылять покрытие большой толщины, прибегают к использованию армированных покрытий, обладающих механической прочностью при большой толщине.

Типичными теплоизоляционными напыляемыми материалами являются оксид алюминия и диоксид циркония. Поскольку оксид алюминия обладает меньшей плотностью (3,99 г/см³), чем диоксид циркония (5,6 г/см³), при заданной массе покрытие из оксида алюминия может иметь большую толщину. Кроме того, оно превосходит покрытие из диоксида циркония по стойкости к эрозионному износу, что подчеркивает преимущество оксида алюминия в применении для сопел ракетных двигателей, поверхность которых работает в контакте с высокотемпературной газовой струей, содержащей частицы твердых веществ.

Детали авиационных двигателей. Одна из давних и серьезнейших проблем, связанных с изготовлением и реставрацией деталей авиационных реактивных двигателей, состоит в том, что многие из названных деталей подвержены износу в условиях сухого трения сопряженных поверхностей при ударно-динамической нагрузке. С целью повышения жаростойкости, стойкости к износу в

15.1. Основные напыляемые материалы, используемые для реставрации деталей реактивных двигателей

Обозначения*	Состав	Максимальная температура применения, °C	Толщина покрытия, мм	Назначение покрытий
PWA 13-01	88% WC, 12% Co	427	0,05—0,15	Повышение износостойкости
PWA 13-05	75% CrC, 25% сплава (80% Ni, 20% Cr)	815	0,05—0,15	То же
PWA 13-13	Чистый молибден	427	0,08—0,51	Наращивание (восстановление и увеличение размера)
PWA 13-18	56,5% Co, 25,5% Cr, 19,5% Ni, 7,5% W	982	0,08—0,51	Повышение износостойкости и наращивание (восстановление и увеличение размера)
PWA 13-21	80% Ni, 20% Al	871	0,03—0,38	Подслой (восстановление и увеличение размера) перед наращиванием
PWA 13-33	76% ZrO, 24% MgO	1094	0,08—0,51	Повышение жаростойкости
PWA 13-37	95% Ni, 5% Al	815	0,05—0,38	Подслой (восстановление и увеличение размера) перед наращиванием
PWA 13-41	35% сплава (95% Ni, 5% Al) и 65% сплава (ZrO—MgO)	1094	—	Повышение жаростойкости
PWA 13-42	69% Ni, 14% Cr, 8% Fe, 3,5% Al, 5,5% BN	815	—	Повышение стойкости к схватыванию и эрозионному износу
PWA 13-48	Co, Cr, Al, Y	982	0,05—0,1	Подслой
PWA 13-52	85% Ni, 15% C или 75% Ni, 25% C	480	—	Повышение стойкости к схватыванию и эрозионному износу
EMS 52432	60% сплава (12% Si, 88% Al), 40% полиэфира	425	—	То же

* Материалы серии PWA определены стандартом фирмы «Pratt Whitney Aircraft», а материал EMS 52432 — стандартом на материалы для научно-исследовательских работ в области самолетостроения.

условиях сухого трения и эрозионному износу детали авиационных двигателей подвергают плазменному напылению различными материалами. Напыление широко применяют и для реставрации деталей при капитальном ремонте двигателей [2]. Двигатель JT3D-3B (для самолета DC-8) прежде подвергали капитальному ремонту после 4000 ч работы, а в настоящее время продолжительность работы двигателя до капитального ремонта увеличена до 24 000 ч за счет продления срока службы его деталей после применения технологии напыления для их упрочнения [3].

В табл. 15.1 приведены данные фирмы «Pratt Whitney Aircraft», относящиеся к составу напыляемых материалов, температуре применения напыленных покрытий, их толщине и назначению применительно к плазменному напылению при реставрации деталей реактивных двигателей [2].

В последнее время с целью уменьшения зазора между концами компрессионных лопаток и элементами корпуса компрессора или зазора между направляющими и рабочими лопатками турбины на эти детали напыляют плакированный порошок системы никель — графит. Напыление с целью уменьшения зазора используют как в турбинах, так и в компрессорах [4]. В турбинах напыление способствует повышению КПД двигателя, поскольку его уровень зависит от разности давления по обе стороны от кольцевой линии напыления. В компрессорах во время вращения ротора существует большая опасность задевания вращающихся частей о неподвижные элементы корпуса. Эта опасность связана с удлинением лопастей в радиальном направлении под влиянием центробежных сил, а также с осевыми смещениями самого диска ротора и расширением-сужением вращающихся и сопряженных с ними неподвижных частей,

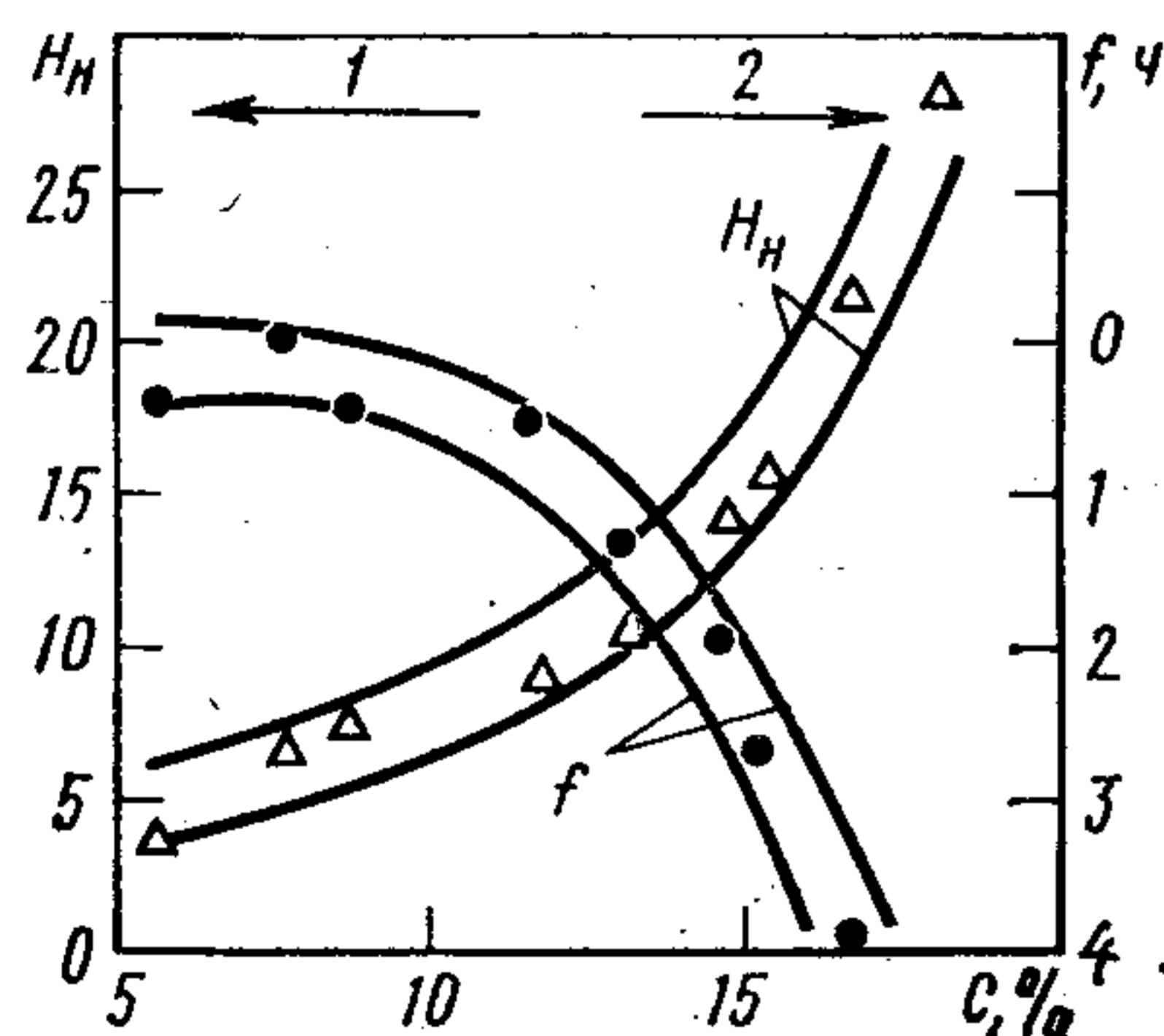


Рис. 171. Влияние содержания углерода в напыленном покрытии на сопротивление износу царапанием (твердость по Гюфману H_n) и эрозионному износу (f):

1 — покрытия, напыленные композиционным порошком с содержанием 85% Ni и 15% C; 2 — покрытия, напыленные композиционным порошком с содержанием 75% Ni и 25% C

работающих в разных температурных режимах. В случае напыления плакированным никель-графитовым порошком участка корпуса, где существует опасность задевания концами лопаток, это задевание не составляет опасности, поскольку концы лопаток легко снимают тонкий слой с поверхности мягкого напыленного покрытия, обеспечивая образование должного зазора. При этом достигают также повышения стойкости к эрозионному износу мелкими частицами твердого вещества, содержащимися в газовом потоке. На рис. 171 представлены данные, свидетельствующие о том, что увеличение содержания углерода в напыленном покрытии вызывает повышение сопротивления износу к царапанию, однако при этом возрастает интенсивность эрозионного износа.

В качестве напыляемого материала используют плакированный порошок с содержанием 85% Ni и 15% C или 75% Ni и 25% C.

На рис. 172 показана кольцевая камера сгорания с теплоизоляционным напыленным покрытием по наружной поверхности [5]. Это покрытие, как видно на рис. 173, состоит из трех слоев, включая нижний подслой, напыленный плакированным порошком системы никель — алюминий (5%) или никель — хром (20%), промежуточный керметный и поверхностный, нанесенный стабилизированным диоксидом циркония (общая толщина покрытия 0,38—0,51 мм). Такое трехслойное покрытие обладает большим преимуществом, однако при возникновении локальных разрушений покрытия происходит окисление нижнего металлического слоя, деградация которого сопровождается отслоением керамического и промежуточного керметного слоев. Кроме того, при необходимости удаления нижнего подслоя системы никель — алюминий, например при повторении операции напыления во время изготовления нового изделия или при реставрации изношенной детали, возникают значительные трудности, связанные с высокой прочностью сцепления этого слоя с основным металлом. В последнее время разработана композиция защитного слоя с плавным изменением состава покрытия при переходе от одного напыляемого материала к другому. Как видно на рис. 174, сначала на основной металл напыляют подслоя заданной толщины из сплава Co—Cr—Al—Y. В процессе напыления этого слоя к порошковому металлическому сплаву (Co—Cr—Al—Y) начинают понемногу добавлять

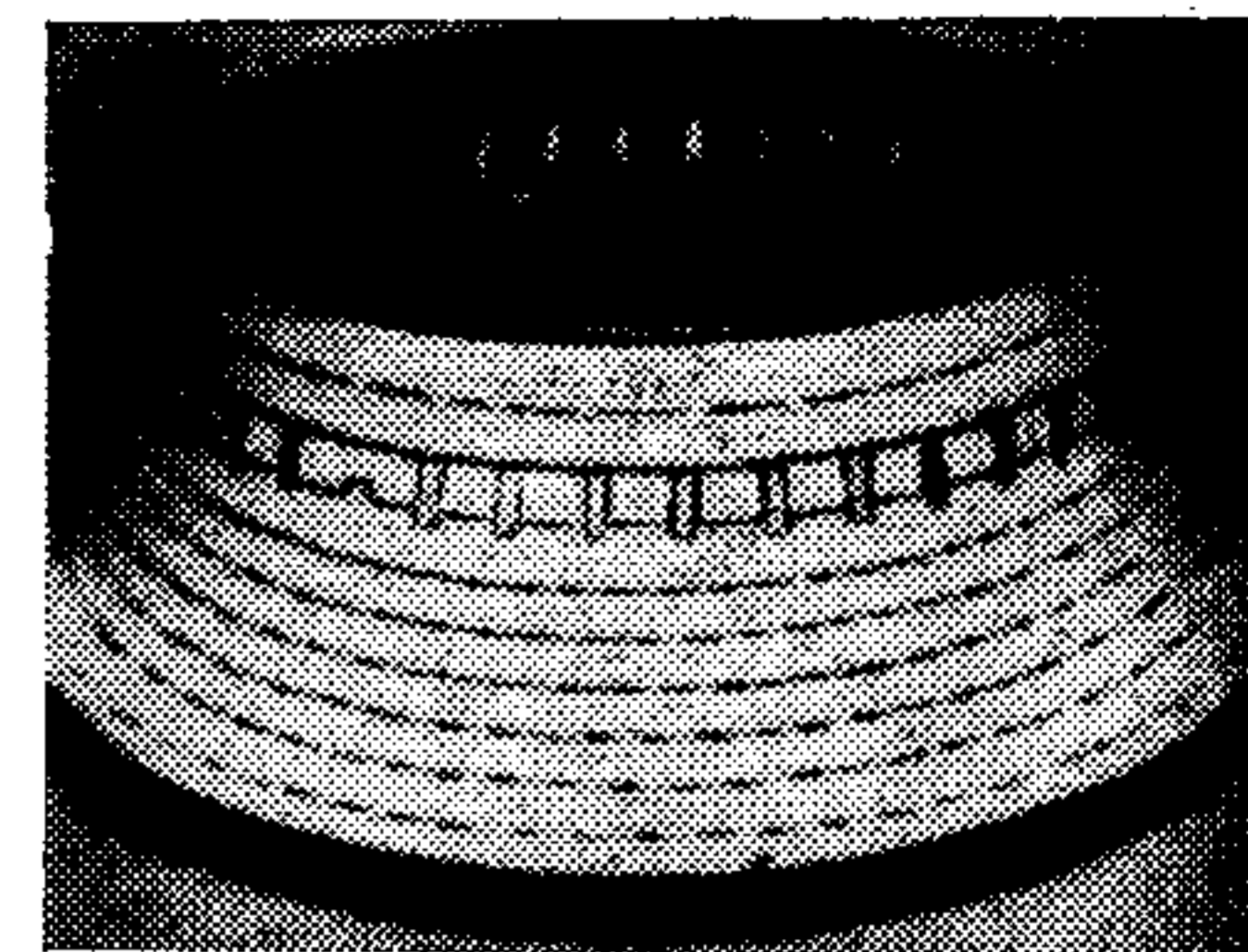


Рис. 172. Кольцевая камера сгорания

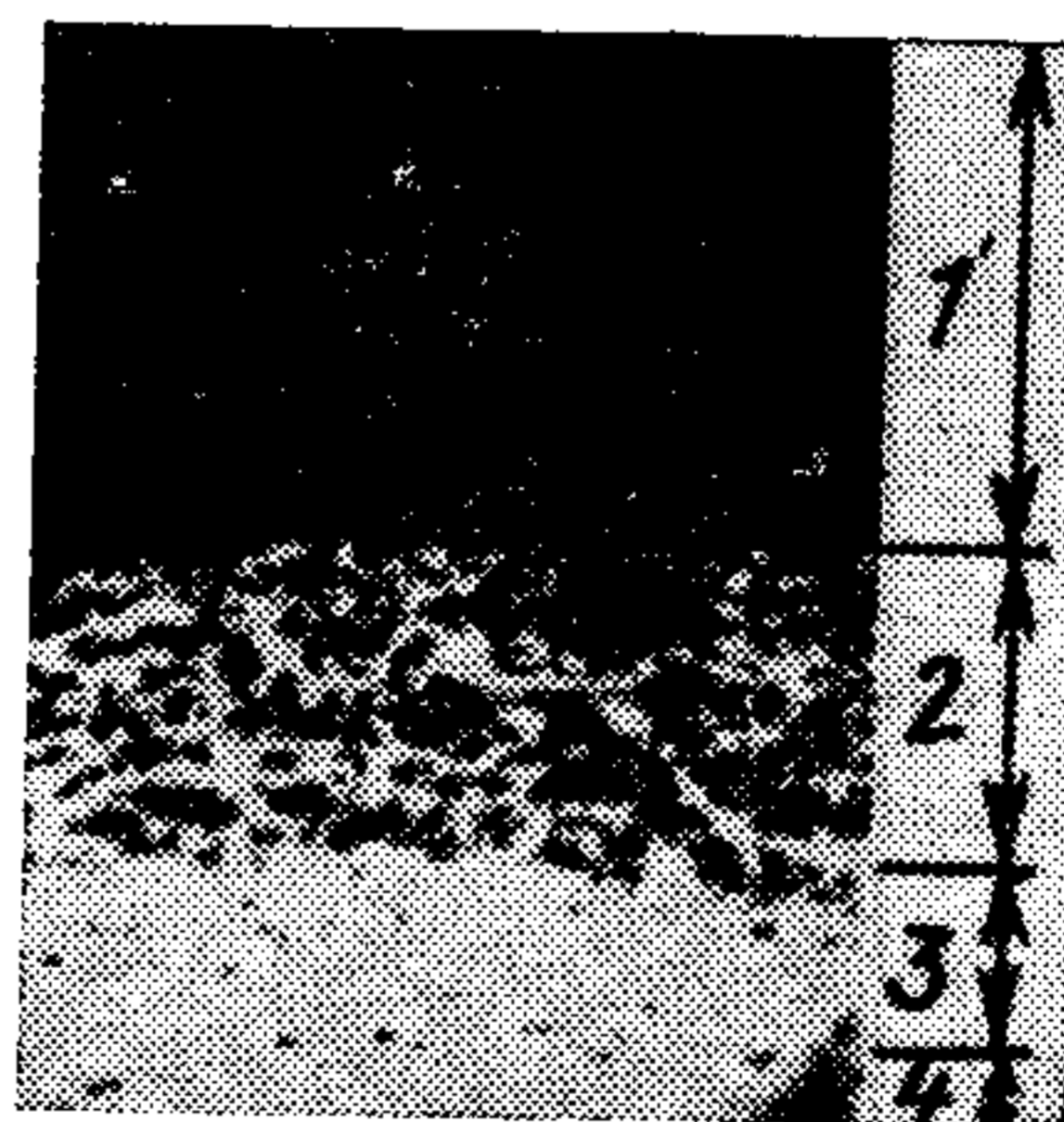


Рис. 173. Многослойное теплоизоляционное покрытие:

1 — керамический слой; 2 — керметный промежуточный слой; 3 — металлический подслоя; 4 — основной металл

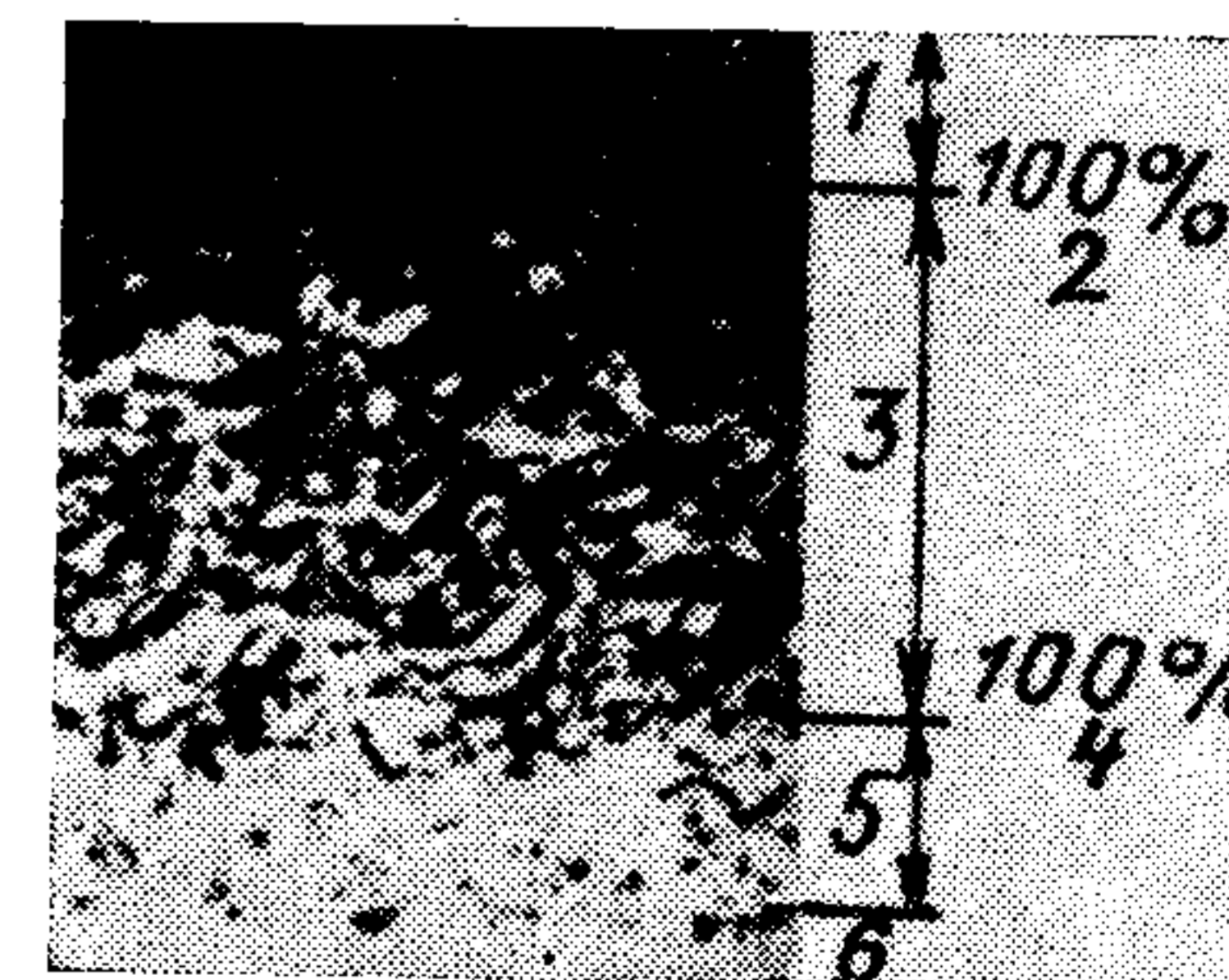


Рис. 174. Теплоизоляционное покрытие с плавным изменением состава напыляемого материала:

1 — керамический слой; 2 — 100% керамики; 3 — зона плавного перехода от керамики к металлу; 4 — 100% металла; 5 — металлический подслоя; 6 — основной металл

керамический порошок, доля которого, постепенно возрастая, достигает 100%, после чего некоторое время напыляют только керамическое покрытие (общая толщина 0,38—0,51 мм). Такое покрытие, пригодное для применения при более высокой температуре, обладает высокими эксплуатационными свойствами и легко удаляется при реставрации. Задача хорошего выполнения такого слоя требует большой точности регулирования подачи порошковых напыляемых материалов. Кроме того, необходимость равномерного нагрева (прогрева) порошков из разных материалов требует тщательного подбора порошков по размеру частиц и оптимального режима нанесения покрытия.

Для того чтобы при оценке качества напыленного слоя не проводить испытаний на серийных изделиях, изготавливают специальные образцы с покрытиями и испытывают их с применением стандартных методик: испытание на прочность сцепления методом выдавливания и испытание для определения прочности сцепления покрытия на отрыв с использованием клея (образцы того же типа, что и на рис. 146). Если в процессе испытаний образцов с покрытиями в них выявляются дефекты, то для их устранения проводят доработку режимов напыления, затем снова проводят нанесение покрытий на образцы и их повторные испытания. Этот цикл повторяют многократно до выработки оптимального режима нанесения покрытий. После отработки и освоения этого режима оператором напыление внедряют на производственной линии [6].

Для оценки качества напыленных покрытий проводят их микроструктурные исследования. Оценка качества осуществляется путем

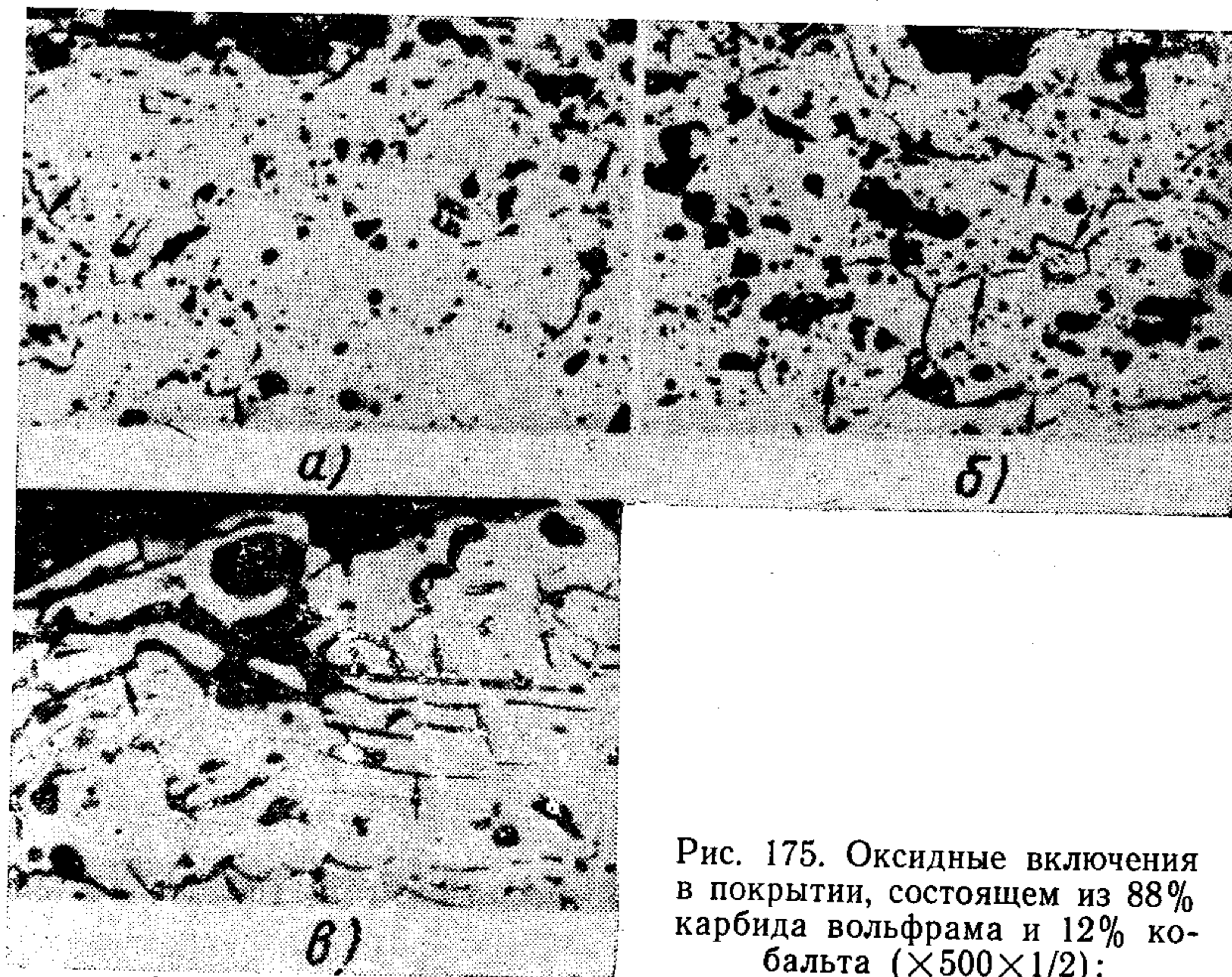


Рис. 175. Оксидные включения в покрытии, состоящем из 88% карбида вольфрама и 12% кобальта ($\times 500 \times 1/2$):

сравнения микроструктуры покрытия с эталонной структурой в поперечном сечении. Все покрытия с трещинами выбраковывают. На рис. 175 показаны примеры эталонных снимков (покрытия из 88% карбида вольфрама + 12% кобальта), по которым судят о качестве покрытий по количеству и форме оксидов. Оценка «хорошее» (а) означает, что покрытие можно считать вполне приемлемым по количеству и форме включений, оценка «посредственное» (б) относится к покрытию, которое по количеству и форме включений находится на допустимом пределе, а оценкой «непригодное» (в) отмечено покрытие, отличающееся чрезмерно высоким количеством оксидных включений и их неудовлетворительной формой. Подобные эталонные снимки подготовлены для всех видов напыляемых материалов.

По пористости пригодными считают покрытия с пористостью до 15% при отсутствии особо крупных пор. Покрытия с более высокой пористостью подлежат повторному напылению. Все покрытия, в структуре которых обнаруживают особо крупные поры, считают негодными и выбраковывают. На рис. 176 показаны эталонные снимки, по которым оценивают пористость покрытий, напыленных порошком с размером частиц 10 мкм. Эти снимки используют также для выявления в переходной зоне частиц плакированного порошка, не прореагировавших с основным металлом.

Измерению твердости подвергают только покрытия, напыленные износостойкими материалами, обладающими стойкостью к обычному (HV) и эрозионному (HR) износу.

Нельзя также пренебрегать опасностью растрескивания, отслоения и выкрашивания покрытия под влиянием переменных термических напряжений, связанных с циклами нагрев — охлаждение.

Нанесение покрытий в промышленных условиях начинают только после отработки оптимального режима напыления, обеспечивающего получение качественных покрытий, и достаточно полного освоения оператором данного процесса напыления в выбранном режиме.

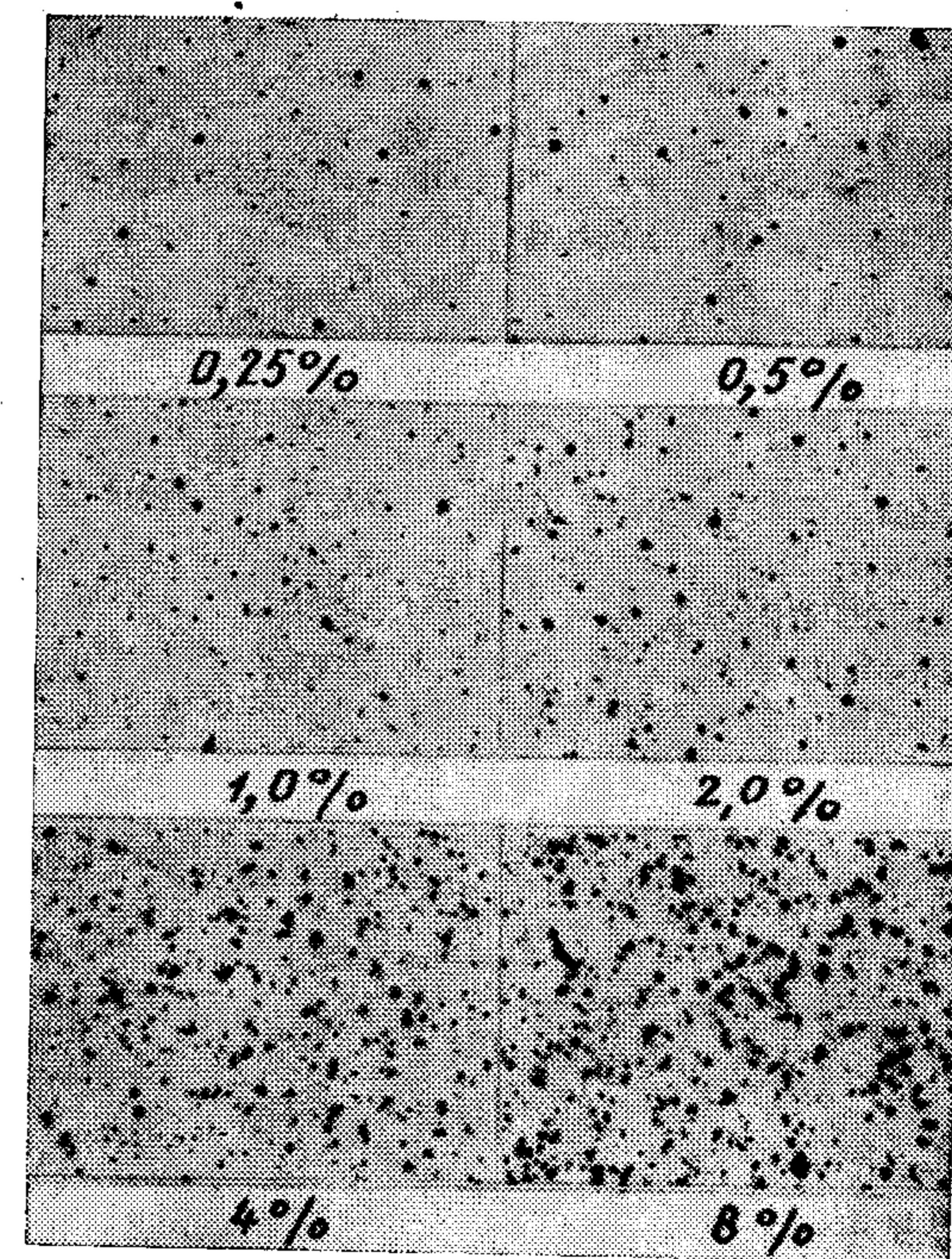


Рис. 176. Эталоны для оценки пористости покрытий, напыленных порошком с размером частиц 10 мкм ($\times 200 \times 1/2$)

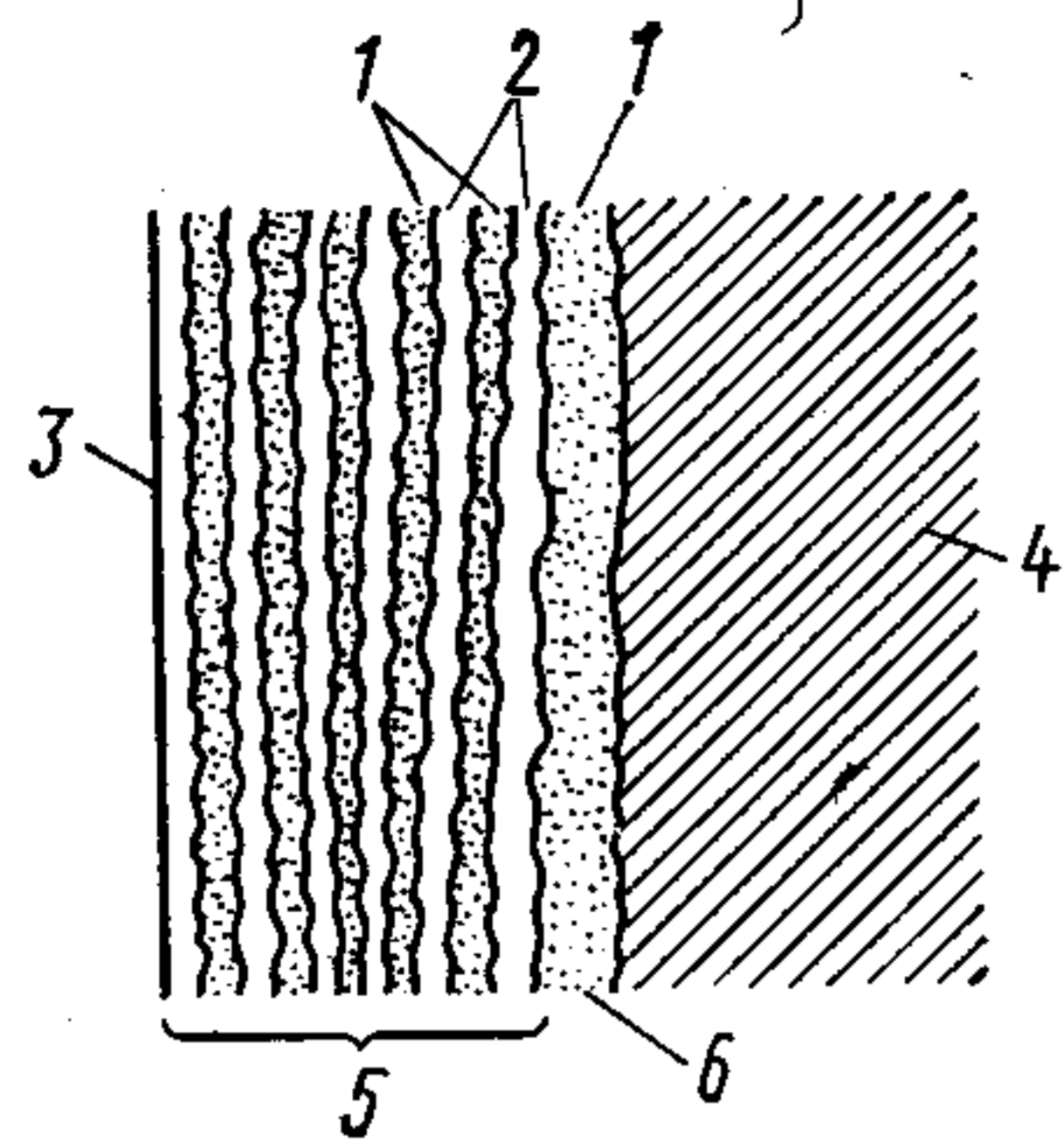


Рис. 177. Сечение цилиндра мотоциклетного двигателя:

1 — слой, напыленные молибденом либо его сплавом с вольфрамом или одним вольфрамом; 2 — слой, напыленные углеродистой сталью; 3 — зеркало цилиндра, подвергнутое чистой обработке шлифованием; 4 — основной металл — алюминий; 5 — многослойное напыленное покрытие композиционного состава; 6 — покрытие, нанесенное за один — три электроимпульсных цикла

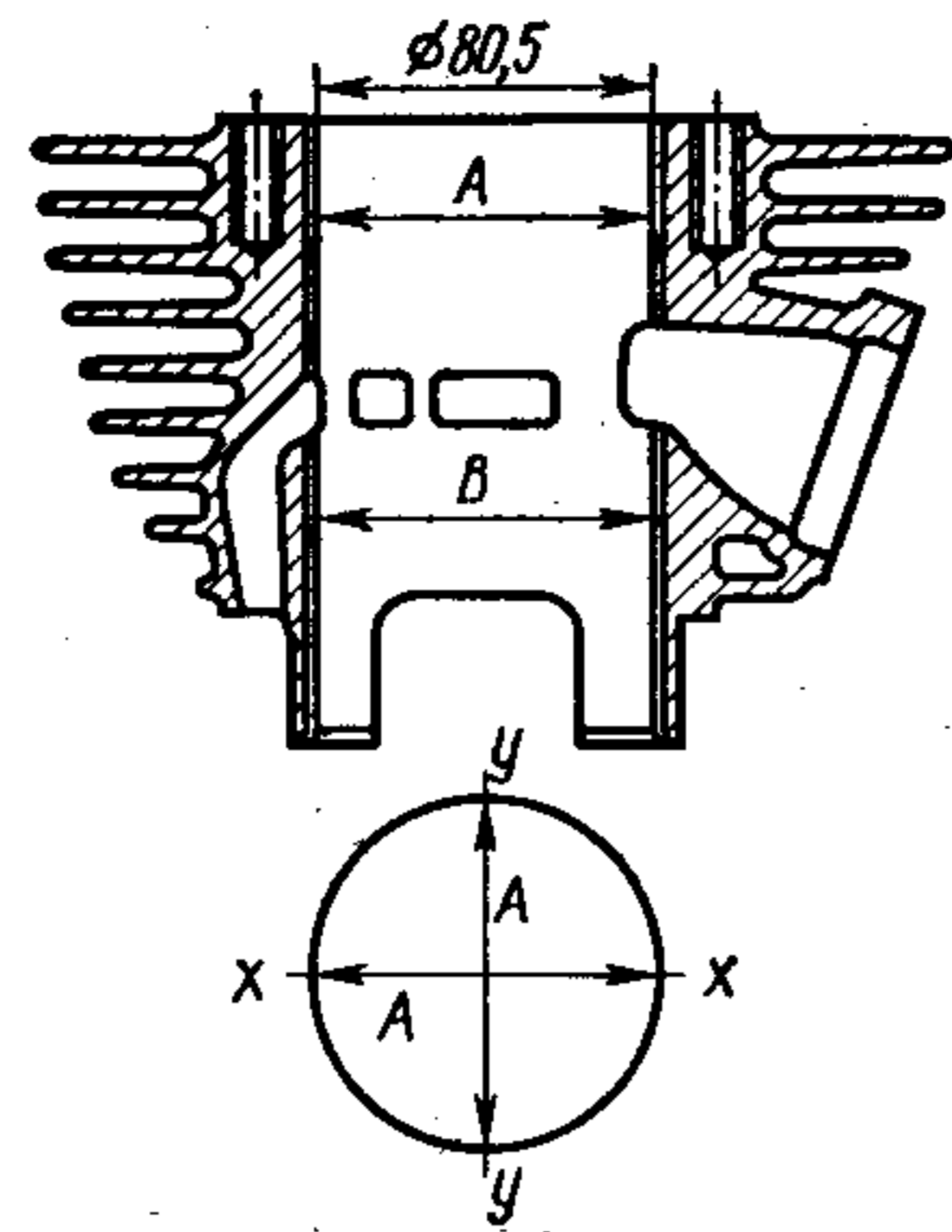


Рис. 178. Места измерения величины износа цилиндра, подвергнутого напылению

Мотоциклетные двигатели. На алюминиевые цилиндры мотоциклетных двигателей наносят многослойные покрытия (рис. 177), состоящие из чередующихся слоев, напыляемых электроимпульсным способом с использованием проволоки двух материалов, например проволоки из молибдена чистотой 98% и проволоки из углеродистой стали с содержанием 0,82% С. Это многослойное покрытие кроме высокой износостойкости обладает многими другими ценными свойствами [7].

Прочность сцепления первого молибденового слоя с основным металлом превышает 49 МПа. Эта прочность сцепления придает всему покрытию стойкость к термическому влиянию и механическую прочность. Поочередное напыление молибденом и углеродистой сталью придает структуре покрытия смешанный характер, а свойства покрытия сочетают в себе особенности, присущие двум напыляемым металлам. Должная пористость покрытия составляет основу высоких антифрикционных свойств, связанных с удержанием смазочного материала в порах.

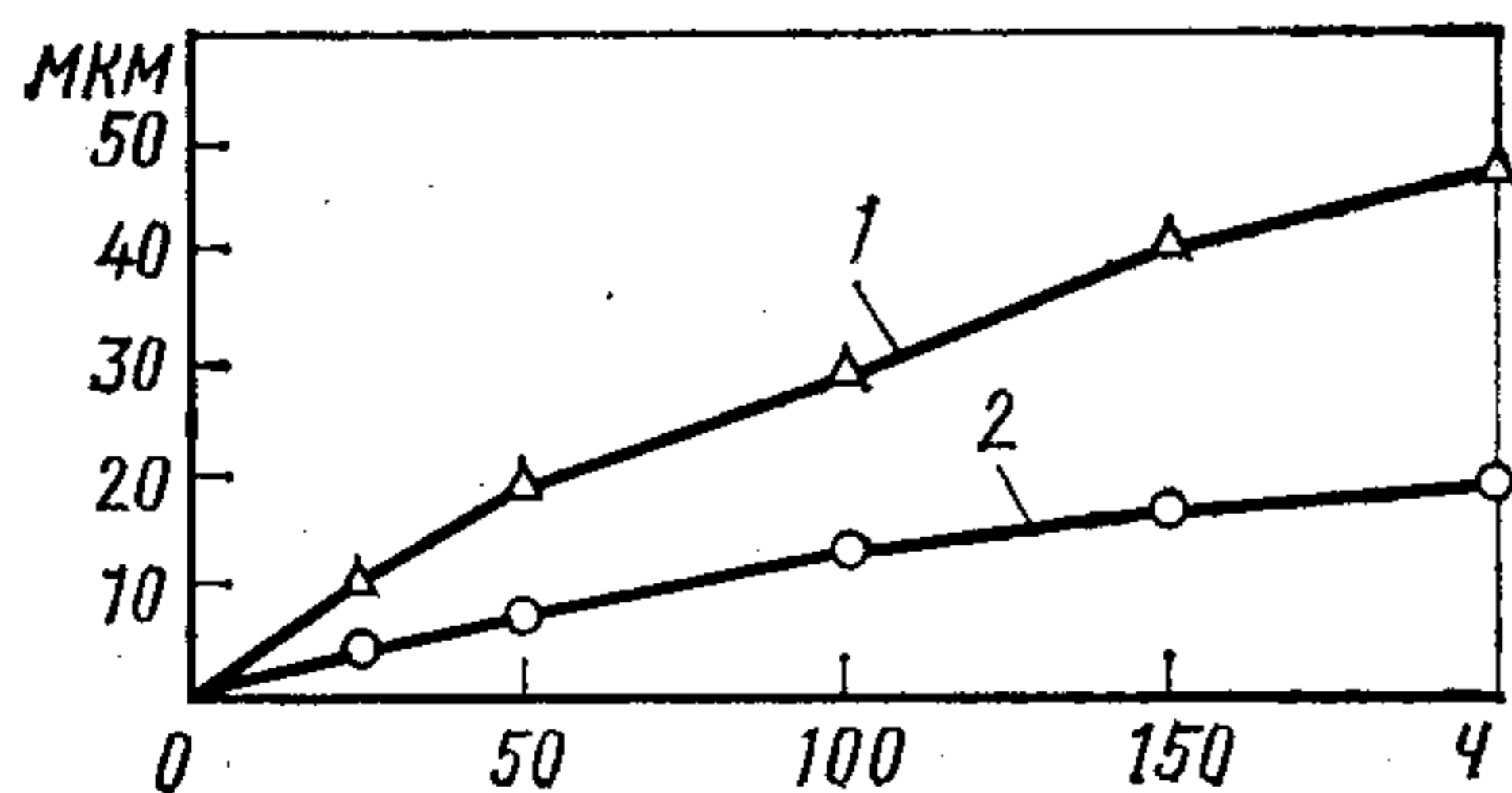
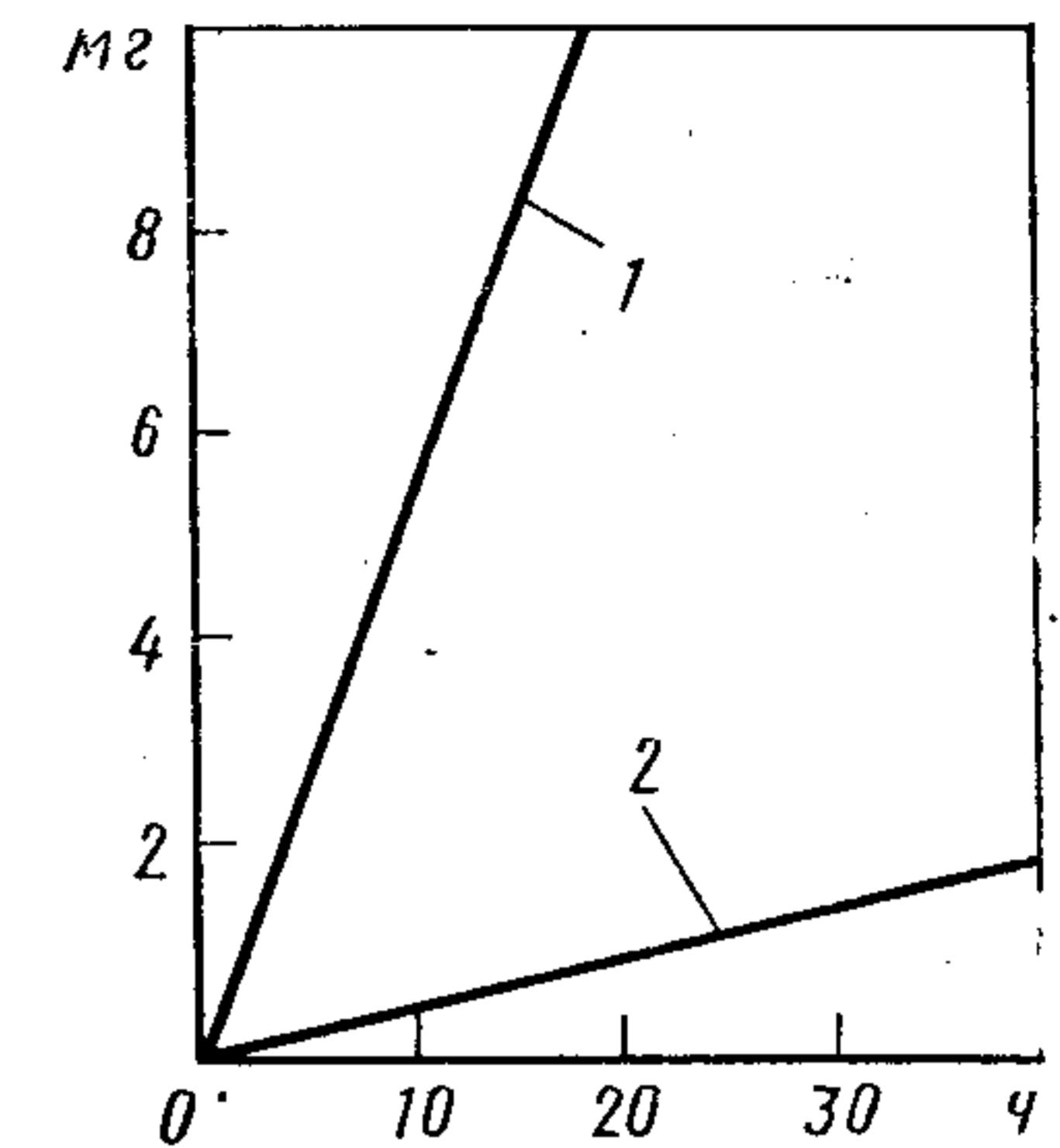


Рис. 179. Изменение среднего износа (мкм) цилиндра от продолжительности работы двигателя (по результатам испытаний пробега на мотоцикле):

1 — цилиндр с чугунной гильзой; 2 — алюминиевый цилиндр с защитным напыленным покрытием

Рис. 180. Зависимость износостойкости (мг) поршневых колец с хромовым покрытием, нанесенным плазменным напылением и электролитическим способом (работа в обычном эксплуатационном режиме):

1 — поршневое кольцо с хромовым покрытием, нанесенным электролитическим способом; 2 — поршневое кольцо с хромовым покрытием, нанесенным плазменным методом



На рис. 178 отмечены места измерения величины износа подвергнутого напылению цилиндра мотоциклетного двигателя. На рис. 179 показано соотношение между продолжительностью работы двигателя и средней величиной износа в точках А, В в направлениях x, y (рис. 178) по результатам испытаний на реальном мотоцикле. Износ цилиндра с напыленным покрытием в 2—3 раза меньше, чем цилиндра, снабженного чугунной гильзой. Технология напыления позволяет уменьшить массу цилиндра, а при достаточно высокой адгезии к основному металлу покрытие предотвращает заклинивание поршня за счет хорошего отвода теплоты от стенки цилиндра. Применение цилиндров с напыленными покрытиями не только делает устойчивой работу двигателя на малых оборотах, но и обеспечивает повышение его эффективной мощности на средних и высоких оборотах.

Износостойкость поршневых колец повышают иногда путем плазменного напыления хромом [8] поскольку известно, что хромовое покрытие, которое прежде наносили электролитическим способом, дает заметное повышение износостойкости. На рис. 180 показаны сопоставительные данные по износостойкости нанесенных двумя способами хромовых покрытий при работе в обычном эксплуатационном режиме. Износ поршневых колец с напыленным покрытием примерно в 10 раз меньше, чем для колец с покрытием, нанесенным электролитическим способом. Большое число поршневых колец перед напылением собирают на приспособлении таким образом, что-

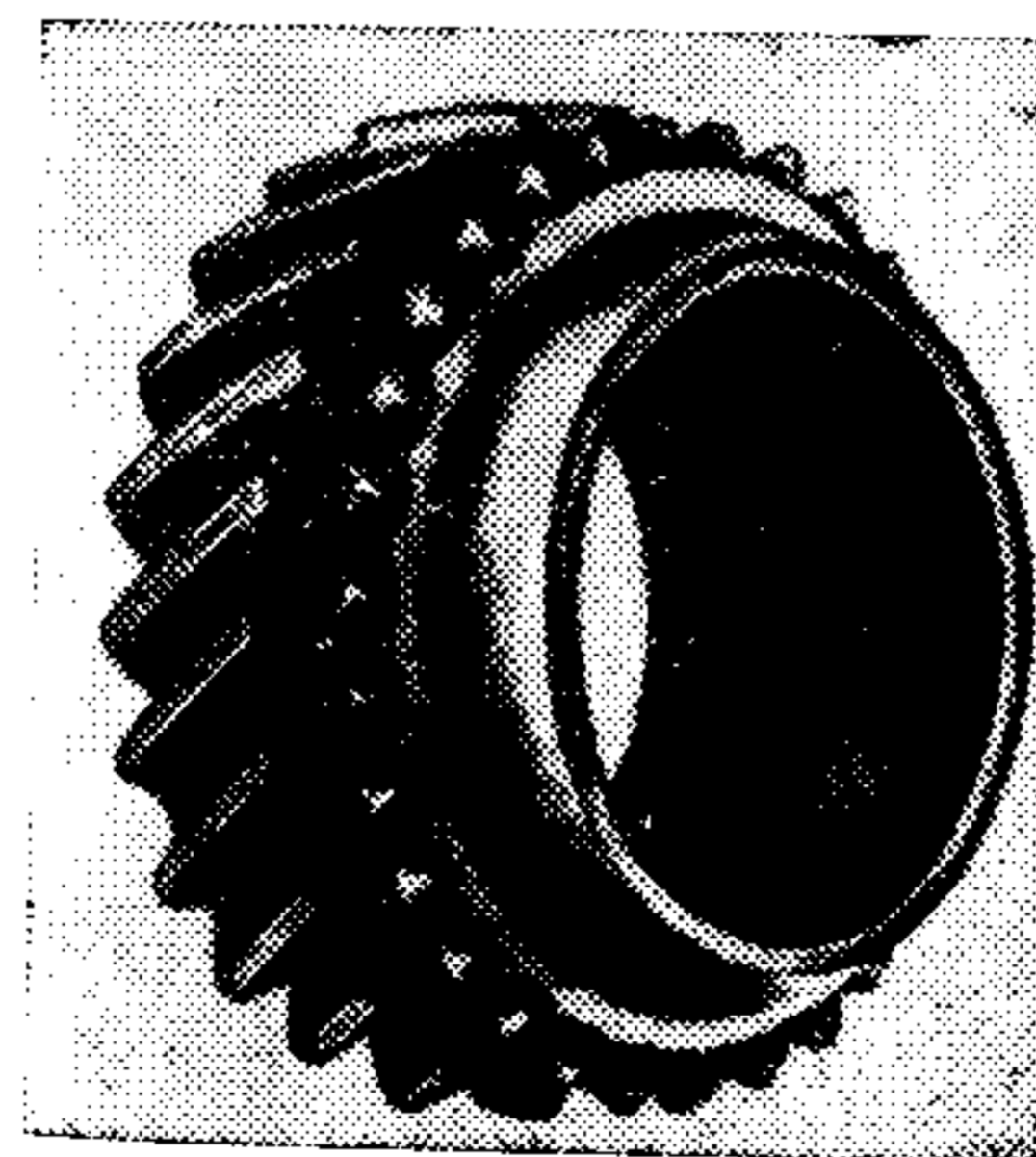


Рис. 181. Зубчатый синхронизатор автомобильной коробки передач

бы открытой оставалась только их боковая цилиндрическая поверхность. Это приспособление устанавливают затем на специальный станок и осуществляют плазменное напыление в условиях вращения приспособления и осевого перемещения горелки. После напыления кольца подвергают чистой механической обработке.

Зубчатые синхронизаторы автомобильных передач. На синхронизирующий конус зубчатого синхронизатора (рис. 181), изготовляемого в условиях массового производства на автомобильных заводах, напыляют молибденовое покрытие толщиной 0,25—0,33 мм [9]. Прежде в синхронизатор корб-

ки передач запрессовывалась бронзовая кольцеобразная втулка, которая обладала достаточной износостойкостью. Однако после 1960 г. в связи с внедрением в автомобильной промышленности двигателей с горизонтальным расположением цилиндров значительно сузились возможности проектирования синхронизаторов для высокооборотных двигателей, поэтому прямая передача усилия от двигателя на ведущие колеса составила серьезную проблему из-за чрезмерно быстрого износа бронзовой втулки: эта втулка выходила из строя из-за большого износа через 3200—4800 км пробега. Проблема была решена напылением молибденового покрытия на синхронизирующий конус. Высокая износостойкость этого покрытия обеспечена за счет ряда показателей, включая хорошее сцепление молибдена с основным металлом, высокую твердость частиц напыленного материала и самосмазывающиеся свойства, связанные с пропиткой пористого покрытия смазочным материалом.

К настоящему времени изготовлено свыше 40 млн. зубчатых синхронизаторов с молибденовым напыленным покрытием (среднемесячная производительность 60 тыс. шт.). До сих пор не было зарегистрировано ни одного случая выхода из строя этих деталей в новом исполнении.

Гидротурбины. Направляющие лопатки, колеса турбин и впускные клапана [10] изготавливают обычно из чугуна и литой хромистой стали с содержанием 13% Cr. В последние годы в связи с увеличением размеров и мощности гидроэнергетических установок турбины работают в условиях большого гидростатического напора, что ускоряет абразивный износ деталей содержащимися в воде частицами грунта. Это обстоятельство усугубляется частотой пиковых пусков (в часы пик) оборудования и сопровождается кавитационной эрозией и коррозией лопастей турбин под влиянием речной воды.

Указанные виды износа развиваются только на ограниченных участках деталей, соответствующая обработка которых на стадии изготовления является эффективным средством значительного увеличения срока службы всего оборудования. Преимущества напыления предполагают его использование для этой цели.

Кавитационная эрозия, связанная с выкрашиванием частиц из напыленного покрытия, может стать причиной серьезного износа напыленных покрытий. В состоянии после напыления покрытие обладает меньшей стойкостью к кавитационному износу, нежели ма-

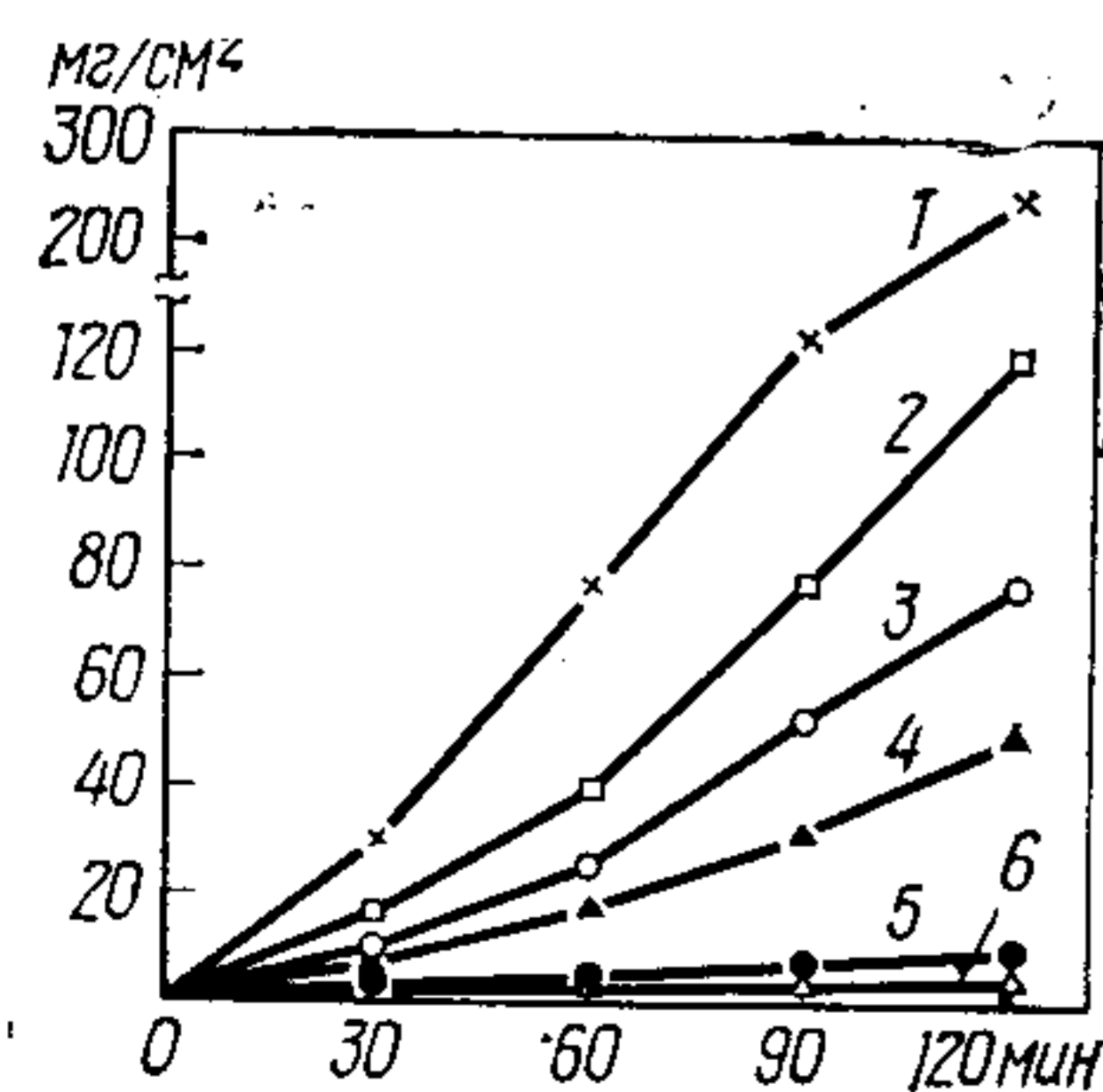
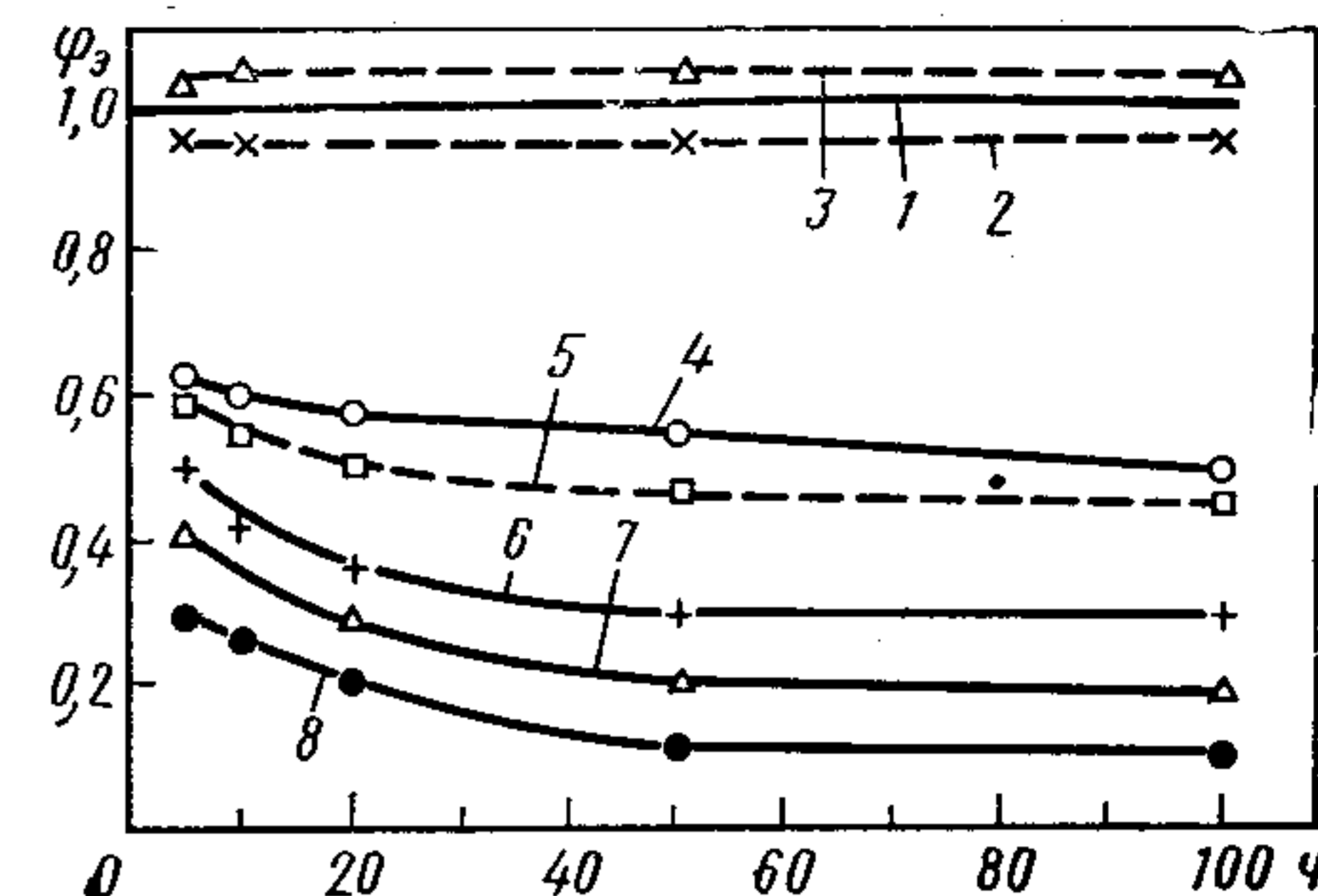


Рис. 182. Кавитационный износ ($\text{мг}/\text{см}^2$) для покрытий, напыленных самофлюсующимися сплавами с последующим оплавлением (амплитуда колебаний при испытаниях 120 мкм):

1 — углеродистая сталь SC46 без покрытия; 2 — литая хромистая сталь с содержанием 13% Cr без покрытия; 3 — покрытие из самофлюсующегося сплава на основе никеля; 4 — литая коррозионно-стойкая сталь типа 18-8 без покрытия; 5 — покрытие из самофлюсующегося сплава на хромоникелевой основе; 6 — покрытие из самофлюсующегося сплава на основе кобальта

Рис. 183. Зависимость относительной эрозионной стойкости ($\varphi_3 = \text{стойкость образца} / \text{стойкость литой коррозионно-стойкой стали типа 18-8}$) защитных покрытий из различных материалов в среде воды с содержанием 3 об. % песка:



1 — литая коррозионно-стойкая сталь типа 18-8; 2 — коррозионно-стойкая сталь SUS403 (покрытие, напыленное проволокой); 3 — коррозионно-стойкая сталь SUS304 (покрытие, напыленное проволокой); 4 — покрытие из самофлюсующегося сплава на основе никеля; 5 — то же, на основе кобальта (плазменное напыление); 6 — то же, на основе никеля с содержанием 30% Mo; 7 — то же, на основе кобальта; 8 — то же, на хромоникелевой основе

териал покрытия в литом состоянии, однако после уплотнительной обработки (например, оплавления), особенно в случае напыления самофлюсующимися сплавами, стойкость покрытия к кавитации резко возрастает по сравнению с соответствующим свойством литой хромистой и литой коррозионно-стойкой (типа 18-8) сталей. На рис. 182 показаны результаты испытаний на стойкость различных материалов с покрытием и без покрытия к кавитационному износу. Испытание осуществляли магнитострикционным способом при частоте колебаний 6,5 кГц.

На рис. 183 показаны значения относительного эрозионного износа (отношение износа образца к износу литой коррозионно-стойкой стали типа 18-8) для ряда напыленных покрытий по результатам лабораторных испытаний, которые заключались во вращении образцов с окружной скоростью 7 м/с в среде воды, содержащей 3% по объему силикатного песка фракции № 5. На рис. 183 показаны данные по стойкости к той разновидности эрозионного износа, которая сочетает абразивное действие твердых угловатых частиц с коррозией покрытия под влиянием воды. Ослабление сцепления между частицами внутри покрытия облегчает их выбивание при ударах содержащихся в воде абразивных частиц. Покрытия из самофлюсующихся сплавов после оплавления обладают исключительно высокой стойкостью к рассматриваемому эрозионному износу. В табл. 15.2 приведены данные по применению покрытий для упрочнения различных элементов гидроэнергетического оборудования. Особого внимания заслуживает применение напыленных покрытий для упрочнения направляющих подшипников и опорных колец. На рис. 184 показано место напыления лопатки рабочего колеса турбины.

Детали насосов. Втулка, соединяющая насос, работающий в воде, с электродвигателем по наружной поверхности в результате контакта с уплотнением подвергается интенсивному износу и коррозии. На рис. 185 показано место нанесения покрытия на втулку [11]. Для напыления применяют самофлюсующиеся хромоникелевые сплавы, которые наносили газопламенным способом с толщиной покрытия приблизительно 1 мм. После напыления и сплавления шлифованием доводили толщину покрытия до 0,6 мм. Покрытие имело твердость

15.2. Применение металлических напыленных покрытий для упрочнения элементов гидроэнергетического оборудования

Элементы оборудования, подвергаемые напылению	Напыляемые материалы	Назначение напыляемых покрытий
Направляющие лопатки: валы лопатки	Коррозионно-стойкая сталь (13% Cr) Сочетание этой стали с карбидом вольфрама	Повышение коррозионной стойкости и износостойкости Повышение стойкости к абразивному и кавитационному износу
Направляющие подшипники	Алюминиевая бронза	Получение подшипников с мягкой рабочей поверхностью
Облицовка крышки турбины, контактирующей с водой	Коррозионно-стойкая сталь (13% Cr)	Повышение коррозионной стойкости
Направляющие подшипники	Баббит	Получение подшипников с мягкой рабочей поверхностью
Опорное кольцо	Алюминиевая бронза	Получение упорного подшипника с мягкой рабочей поверхностью
Колесо турбины: лопатки бандаж	Коррозионно-стойкая сталь (13% Cr) Самофлюсующийся хромоникелевый сплав	Повышение стойкости к коррозионному и кавитационному износам Повышение стойкости к абразивному износу
Спицы и сопла гидротурбины	Коррозионно-стойкая сталь (13% Cr) и самофлюсующийся хромоникелевый сплав	Повышение стойкости к коррозионному, кавитационному и абразивному износам
Лопатки насоса турбины с наклонным валом	Самофлюсующийся сплав на основе никеля с содержанием 30% Mo	Повышение стойкости к кавитационному износу

HRC 60. По старой технологии втулку изготавливали из углеродистой стали S45C, ее поверхность подвергали закалке ТВЧ, а затем на закаленный слой электролитическим способом наносили твердое хромовое покрытие. Практика показала, что напыленное покрытие из самофлюсующегося сплава в 8—10 раз превосходит по сроку служ-

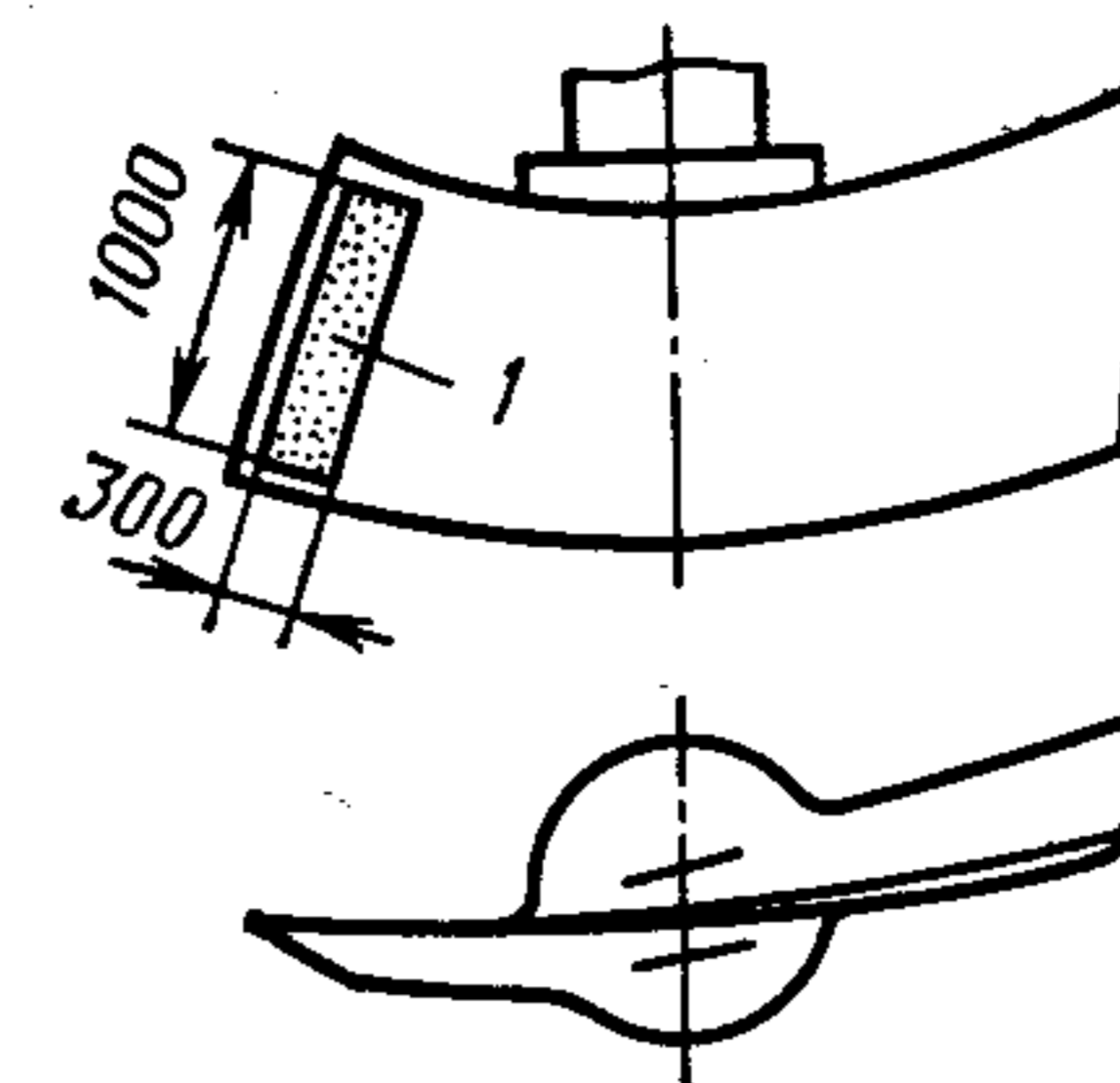


Рис. 184. Место напыления на лопатки рабочего колеса гидротурбины:

1 — напыленное покрытие

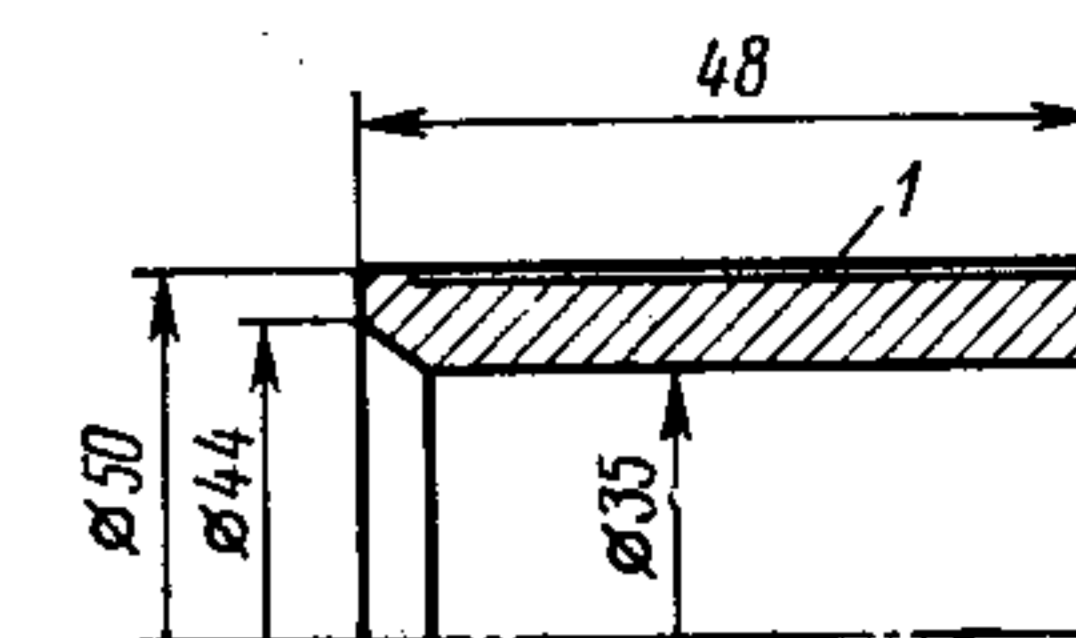


Рис. 185. Напыление покрытия на втулку погружного насоса:

1 — напыленное покрытие

бы хромированное покрытие, нанесенное электролитическим способом. Это приносит большие экономические преимущества, даже с учетом более высокой стоимости напыления, по сравнению с электролитическим хромированием. Существенное преимущество напыления связано также с возможностью получения покрытия большой толщины, значительно превышающей толщину покрытия при хромировании. Самофлюсующиеся сплавы для защиты от износа и коррозии напыляли и на другие детали, такие, как плунжеры и оси погружных насосов.

В высоконапорных насосах для перекачки дренажной воды с примесью мелкого грунта раньше использовали упрочненные уплотнения, срок службы которых не превышал 2000 ч. Между тем уплотнения, нанесенные детонационным способом карбидом вольфрама, после 20 тыс. ч работы находились в хорошем состоянии и оказались пригодными для дальнейшего применения. Заменить пришлось только сопрягаемую на этом участке графитовую деталь. Этот пример ярко демонстрирует эффективность напыления для повышения стойкости к эрозионному износу [12].

Покрытие самофлюсующимся никелевым сплавом колмоной № 6 (толщина 0,75 мм), подвергнутое после напыления оплавлению при 1040°C в течение 5 мин, увеличивает срок службы маслораспределительных пластин до 1700 ч, против 100 ч для чугунных пластин без упрочняющего покрытия [13].

Втулки из чистого титана (рис. 186) подвергают плазменному напылению оксидом алюминия, достигая благоприятного сочетания химической стабильности и высоких механических свойств основного металла с износостойкостью и химической стабильностью покрытия из оксида алюминия [14].

Калибры. На поверхности цилиндрических, кольцевых, резьбовых и других калибров наносят покрытие плазменным или де-

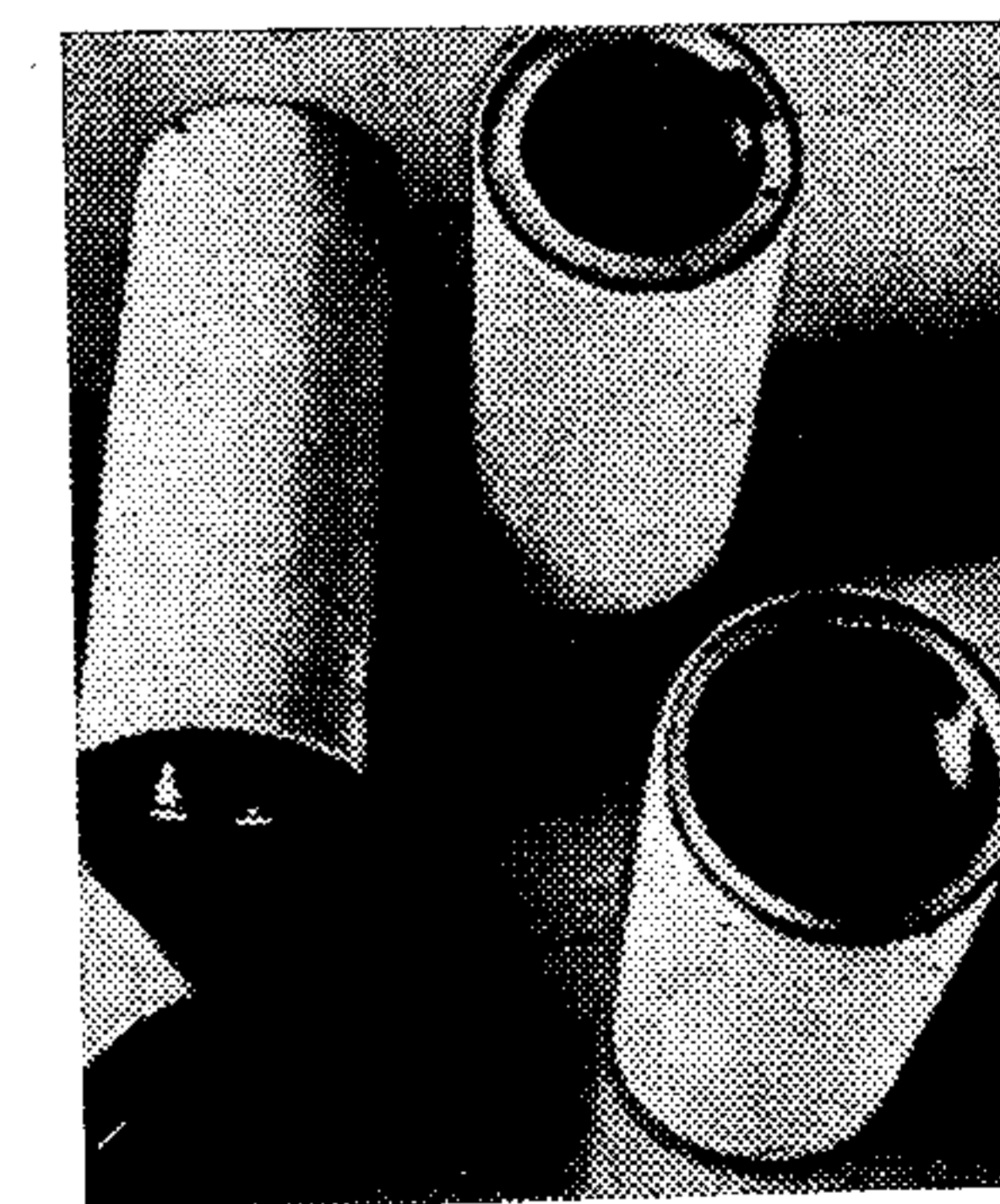


Рис. 186. Кислотостойкие втулки насосов

тонационным способом карбидом вольфрама с последующей чистой обработкой [15]. По сравнению с калибрами, изготовленными целиком из карбида вольфрама, напыленные изделия значительно легче и менее хрупкие. Калибры подвергают также напылению самофлюсующимися хромоникелевыми сплавами с добавлением карбида вольфрама (50%). После напыления такие покрытия подвергают оплавлению при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$ [16].

Кроме повышения износостойкости, напыление покрытий на поверхности калибров позволяет изготавливать калибры из материала, аналогичного материалу измеряемой детали. В этом случае у калибра и детали будут одинаковые коэффициенты линейного расширения, что позволит избежать температурных поправок при проведении измерений и исключить необходимость термостатирования измеряемой детали.

Другое преимущество калибров с напыленным покрытием — их сравнительно низкая стоимость. На рис. 187 приведены результаты испытаний на износ для калибров-пробок, изготовленных тремя разными способами [17].

Матрицы для горячего прессования тугоплавких металлов. Прессование через матрицу молибдена, ниобия, вольфрама и их сплавов — сравнительно новый метод обработки, основной проблемой которого является стойкость матриц. Матрица из инструментальной стали без покрытия за одно прессование при температуре 1320°C изнашивается до такой степени, что ее уже невозможно починить. Низкая стойкость инструмента для прессования тугоплавких металлов — не единственная проблема. При прессовании на участке контактирования изделия с матрицей при высоких температуре и давлении на поверхности изделия образуется слой материала (сплав между металлом изделия и матрицы), отличающийся от остального металла изделия по составу и свойствам, что приводит к изменению качества поверхности прессуемого изделия. Это создает дополнительные технологические трудности при его последующей обработке. Кроме того, в процессе прессования происходит непрерывное повреждение матрицы, в результате чего значительно изменяется диаметр и форма поперечного сечения прессуемого изделия по длине.

В связи с этим конические матрицы (90°) из штамповой стали твердостью $HRC\ 40\text{—}44$ упрочняли путем напыления на их поверх-

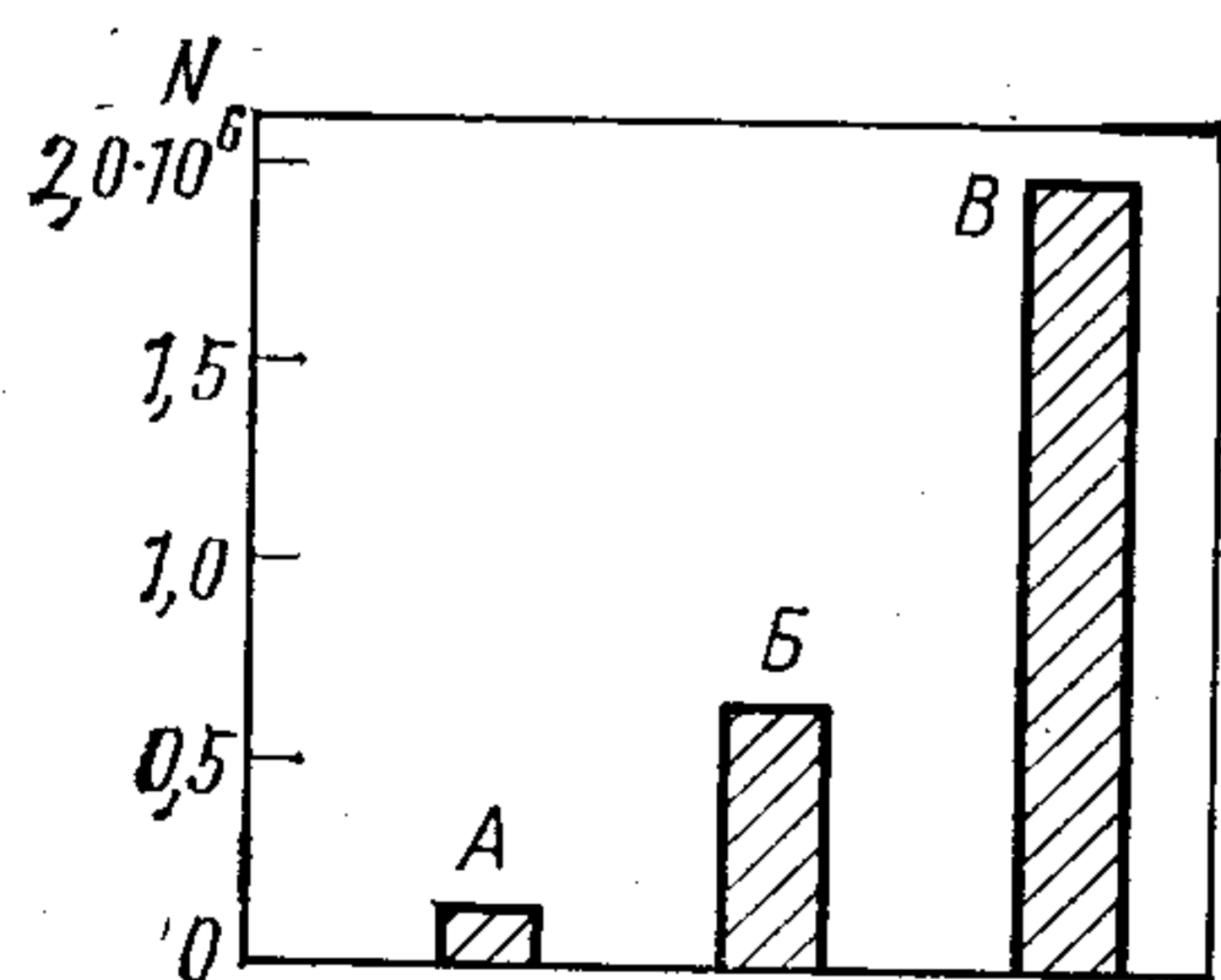


Рис. 187. Износостойкость (число циклов N до износа на 2,5 мкм) калибров-пробок, изготовленных тремя способами:

А — закаленные калибры из быстрорежущей стали; Б — калибры, изготовленные из карбида вольфрама методами порошковой металлургии; В — калибры, упрочненные напылением

ность оксида алюминия или диоксида циркония с образованием покрытия толщиной 0,5—1 мм. Матрицы с покрытием из оксида алюминия показали хорошие результаты при температурах до 1650°C , но при температуре выше 1760°C они интенсивно изнашивались и быстро выходили из строя. Матрицы с покрытием из диоксида циркония успешно работали при температурах до 2370°C . Применение керамических покрытий требует снижения давления прессования. В настоящее время используют матрицы с покрытием из диоксида циркония. Срок их службы в 5—10 раз превышает срок службы аналогичных инструментов без покрытия [18].

Перед напылением поверхность матриц обрабатывают для придания ей шероховатости, в частности путем нарезания концентрических канавок глубиной 0,25—0,38 мм с шагом ~ 1 мм.

Для восстановления поврежденных из-за износа матриц применяют как газопламенный, так и плазменный метод нанесения керамических покрытий.

Пуансоны, направляющие ролики. Для штамповки фланцев, устанавливаемых в узлах осей колес заднего моста автомобиля, используют пуансоны, срок службы которых не превышал 200—300 штамповок. Для изготовления пуансона, причина быстрого износа которого была связана со схватыванием обрабатываемого металла изделия с поверхностью пуансона, опробовали различные способы упрочнения и материалы (инструментальная сталь, различные карбиды, хромирование и т. п.), однако существенного увеличения срока службы достичь не удалось. Между тем за счет напыления молибденом срок службы пуансонов был увеличен до 30 000—40 000 штамповок [19].

На коническую поверхность направляющих роликов, используемых в прокатном оборудовании для переворачивания стальных слябов, напыляют самофлюсующийся никелевый сплав колмоной № 6 толщиной ~ 1 мм. После напыления покрытие оплавляют [20].

Покрытия из никелевых самофлюсующихся сплавов наносят также на тяговые шайбы волочильных машин и фланцы транспортерных роликов [20]. Оплавление покрытий на этих изделиях осуществляют путем равномерного нагрева в печах.

Регистрирующие головки ЭВМ. Алюминиевый корпус головок ЭВМ подвергают плазменному напылению оксидом алюминия с добавлением диоксида титана [21]. После нанесения покрытия толщиной $\sim 0,5$ мм (рис. 188) производят сначала шлифование поверхности головки алмазным кругом до шероховатости

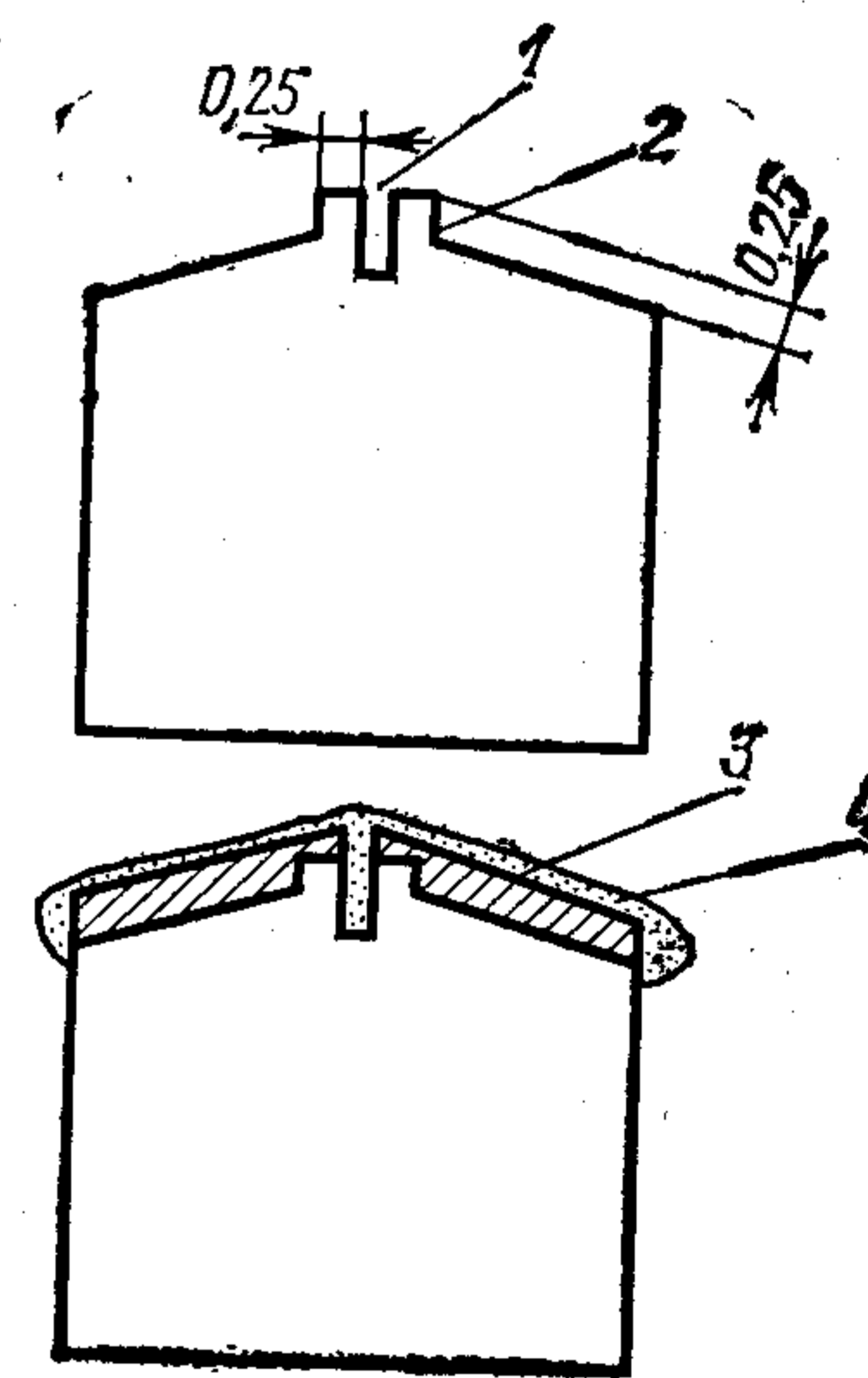


Рис. 188. Регистрирующая головка ЭВМ:

1 — зазор; 2 — подрез глубиной 0,25 мм (разделка под напыление); 3 — поверхность после чистовой обработки; 4 — напыленное покрытие толщиной 0,5 мм

0,15 мкм (среднее квадратичное значение), а затем посредством притирки шероховатость покрытия доводят до 0,05 мкм. После окончательной чистовой обработки толщина напыленного покрытия составляет 0,25 мм.

Поверхность головки ЭВМ работает в контакте с магнитной лентой, скользящей по ней со скоростью 2,5—6,5 м/с. Износ головки увеличивается из-за неравномерности скольжения ленты, резких остановок и рывков при возобновлении движения. Поэтому участок контактирования поверхности головки с лентой следует упрочнять немагнитным покрытием, обладающим высокой твердостью. Задача повышения эксплуатационных характеристик регистрирующей головки требует уменьшения зазора между ней и лентой, а это может быть достигнуто путем применения тонкого износостойкого покрытия.

Срок службы алюминиевых головок обычно не превышает 2000 ч, однако благодаря упрочнению напылением он увеличен до 20 тыс. ч. При этом достигнуто уменьшение образования продуктов износа головки, которые неблагоприятно влияли на качество воспроизведения выходных сигналов. Только за счет этого срок службы головки увеличился в 2 раза.

Электроды озонаторов. При изготовлении стеклянных электродов озонаторов на внутреннюю поверхность стеклянной трубки длиной 1200 и диаметром 60 мм наносят проводящий слой, для чего используют газопламенное напыление алюминия [14]. При пропускании через электродное покрытие постоянного тока напряжением 10 000 В получают озон, используемый для очистки воды. Преимущество озонной очистки связано с отсутствием запаха, характерного для воды после хлорной очистки. На рис. 189 показана часть стеклянного электрода озонатора.

Кухонные приборы. Напыление используют для упрочнения кухонных плиток (рис. 190), изготавливаемых по 50—60 тыс. шт. в месяц [22]. Эти плитки выполнены в виде сковороды с нагревательным элементом, смонтированным под дном. Сковороды изготавливают из алюминиевого листа или получают их способом литья под давлением. Поверхность сковороды сначала подвергают напылению, а затем наносят на него покрытие из фторопласта (тефлона).

Отсутствие пригорания продуктов, коррозионная стойкость и из-

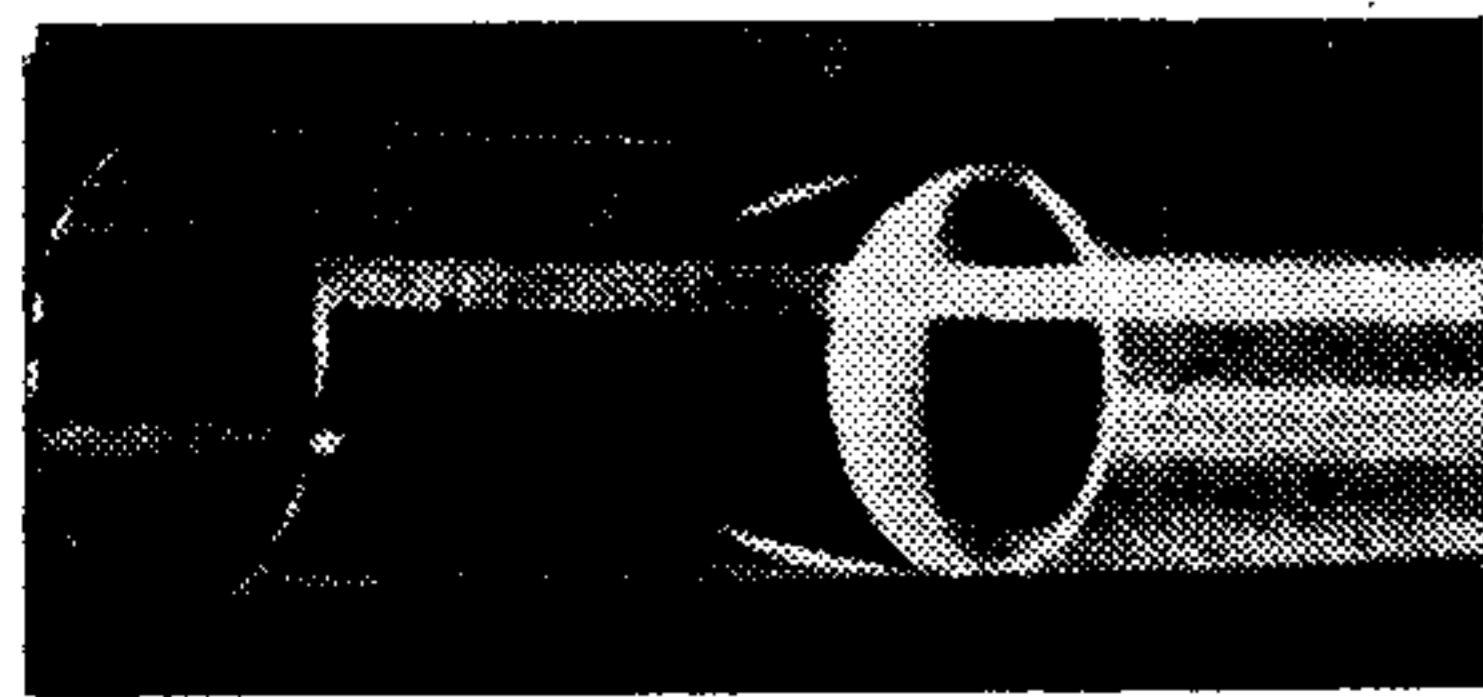


Рис. 189. Электрод озонатора

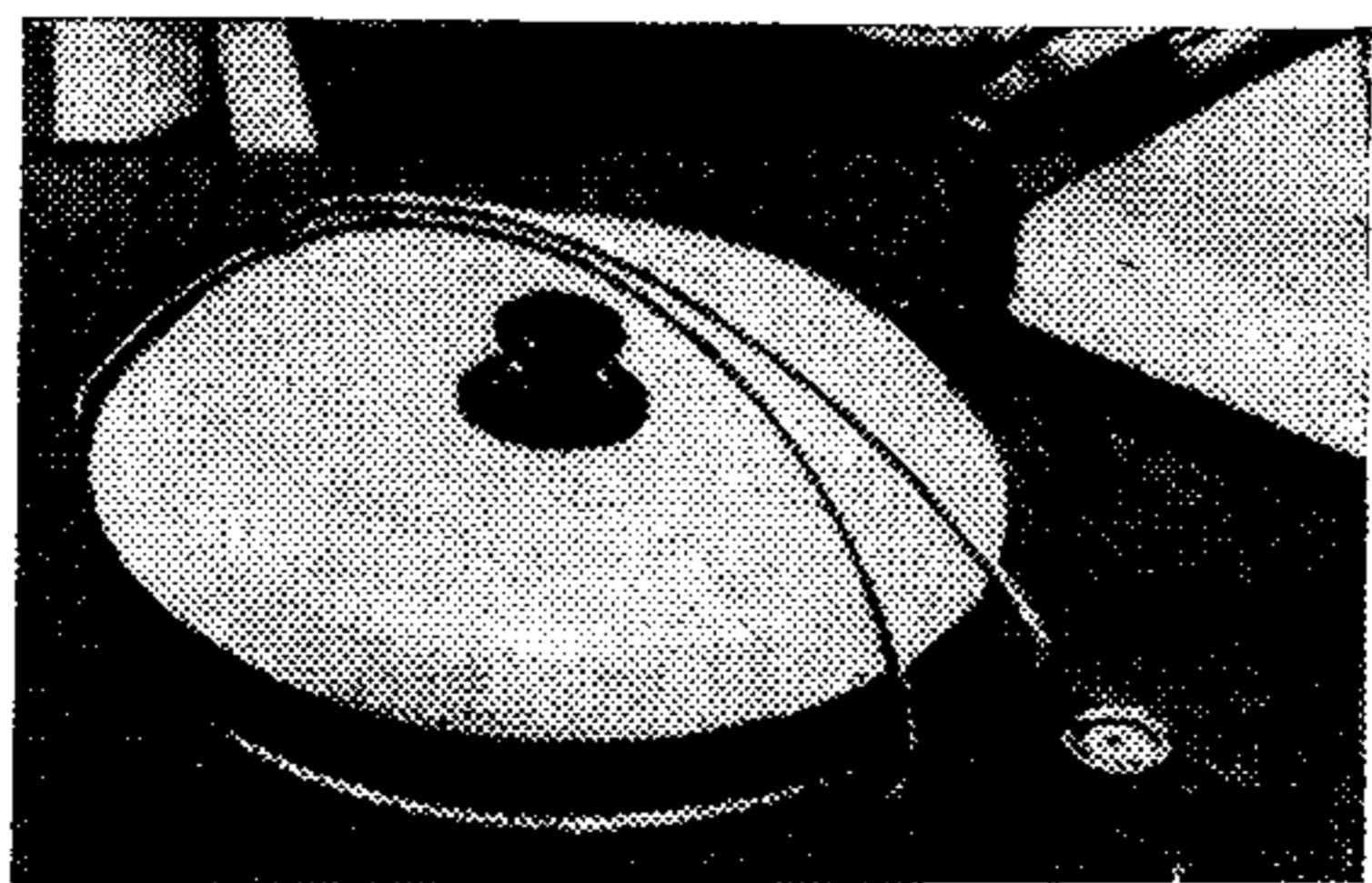


Рис. 190. Кухонная плитка

носостойкость — эти основные требования, предъявляемые к кухонным приборам, полностью удовлетворяются за счет напыления на них оксида алюминия с последующим нанесением полимерного покрытия.

Предварительная обработка поверхности изделия перед напылением включает обезжиривание при 400°C и пескоструйную обработку корундом. В качестве подслоя под напыление полимера используют дешевый серый глинозем, обладающий многими ценными свойствами, включая коррозионную стойкость, износостойкость и жаростойкость.

Зубные протезы. Зубные протезы при хорошем внешнем виде должны обладать высокой твердостью и износостойкостью. На рис. 191 показана зубная коронка, изготовленная из сплава никеля с хромом и кобальтом*, снабженная фарфоровым покрытием, нанесенным горячим способом [23].

Фарфор отличается высокой адгезией к сплаву благородного металла с добавлением олова или индия, однако фарфоровое покрытие чрезмерно дорого. При изготовлении зубных протезов рекомендуется использовать дешевый основной металл. Сплав никеля с хромом и кобальтом удовлетворяет этому требованию, однако при горячем нанесении фарфора непосредственно на этот сплав покрытие не имеет должной прочности сцепления. Поэтому на основной металл этого сплава сначала наносят плазменным напылением подслоя из порошка оксида алюминия или диоксида циркония. Эти покрытия, обладающие хорошей смачиваемостью жидким фарфором, обеспечивают высокую прочность сцепления фарфорового покрытия.

На рис. 192 приведены данные по прочности протезов передних и коренных зубов, изготовленных описанным способом, по сравне-

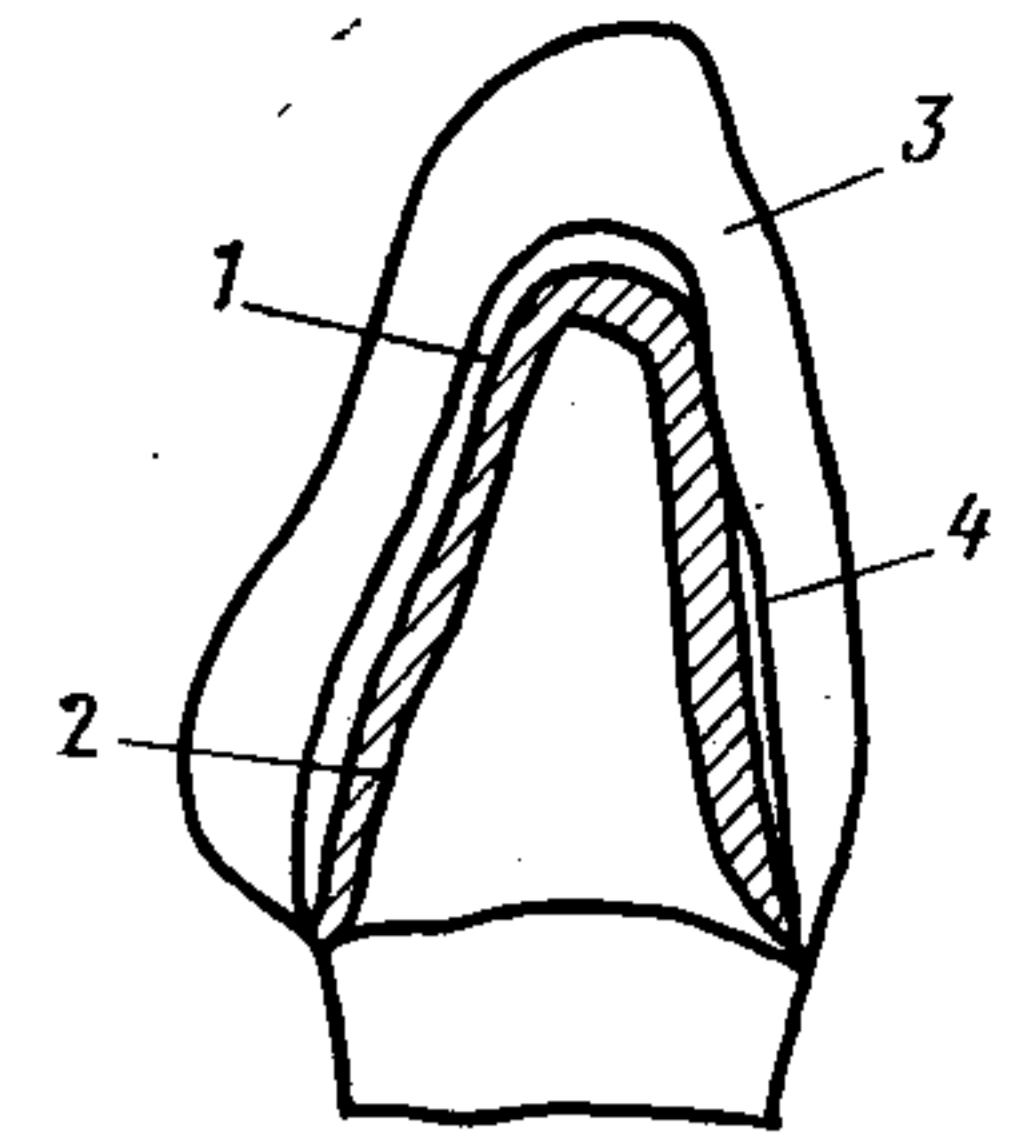
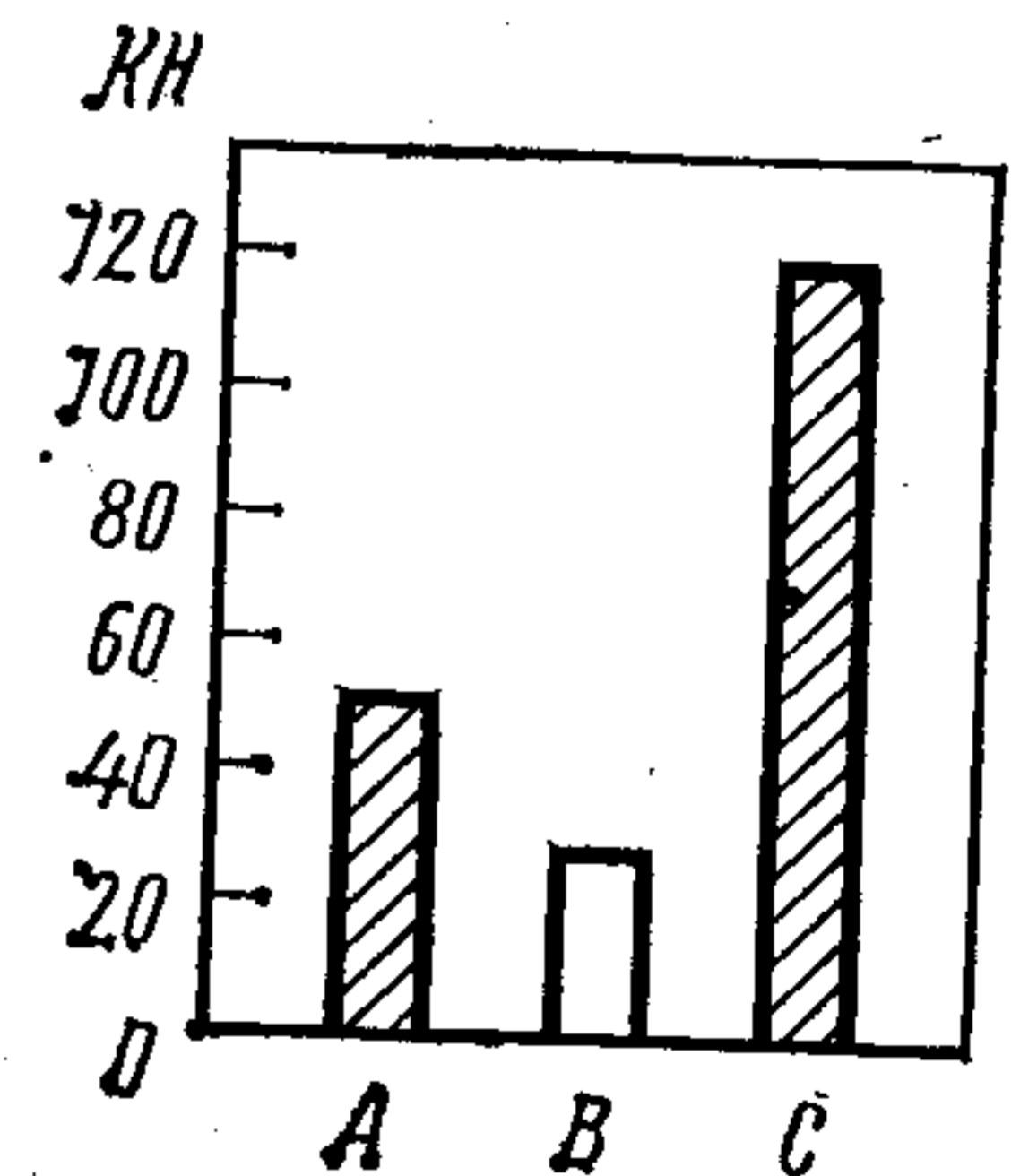


Рис. 191. Зубной протез, изготовленный с применением технологии напыления:

1 — покрытие из алюминид никеля; 2 — сплав никеля с хромом и кобальтом; 3 — фарфор; 4 — покрытие из оксида алюминия или диоксида циркония

Рис. 192. Прочность (кН) различных зубных протезов с фарфоровым покрытием:

А — протез коренного зуба, изготовленный из сплава никеля с хромом и кобальтом с последующим напылением оксида алюминия и нанесением фарфорового покрытия; В — протез переднего зуба, изготовленный из сплава благородных металлов с последующим нанесением фарфорового покрытия; С — протез переднего зуба, изготовленный из сплава никеля с хромом и кобальтом с последующим напылением оксидом алюминия и нанесением фарфорового покрытия



* Сплав содержит 1% Ni, 30% Cr, 60% Co, 5% Mo и 40% остальных компонентов; после высокочастотного плавления отливки получают центробежным литьем.



Рис. 193. Изготовление зубного протеза с применением технологии напыления:

а — зубной протез в состоянии после отливки из сплава никель-хром-кобальт способом литья в оболочковые формы; *б* — зубной протез в состоянии после напыления оксида алюминия; *в* — зубной протез после нанесения фарфорового покрытия

нию с протезами передних зубов, изготовленных из сплава благородных металлов с фарфоровым покрытием. Протезы, изготовленные по новой технологии с использованием напыления, по прочности заметно превосходят протезы из сплава благородных металлов.

На рис. 193, *а* показан зубной протез с коронками, отлитыми в оболочковые формы, в состоянии готовности к напылению. На рис. 193, *б* те же коронки показаны в состоянии после напыления оксида алюминия, а на рис. 193, *в* — в состоянии после нанесения фарфорового покрытия и установки протеза во рту клиента. После двухлетнего применения такие протезы сохраняют хороший внешний вид и функции.

Металлоконструкции. Напыление металлоконструкций осуществляют преимущественно для защиты от коррозии. Наиболее широкое применение имеют алюминиевые и цинковые покрытия, обеспечивающие электрохимическую защиту основного металла. Длительные испытания образцов с алюминиевыми и цинковыми покрытиями подтвердили их высокие защитные свойства при длительной работе в различных агрессивных средах.

Наиболее простым и эффективным средством защиты стальных конструкций от коррозии является окраска, для повышения защитных свойств которой разработаны разнообразные красители. Вместе с тем окраска отличается краткосрочностью защитного действия, длительное сохранение которого требует периодического обновления. Увеличения длительности защитного действия окраски нередко достигают путем нанесения красителей на шероховатую поверхность пористых напыленных покрытий.

В частности, элементы конструкции мостика перед парадным входом императорского дворца (г. Токио) с целью защиты от кор-

розии были подвергнуты обработке, включающей напыление и окраску. На заводе эти элементы подвергали напылению цинком (толщина покрытия 0,1 мм), грунтовке (расход грунтовки 80—100 г/м²) и окраске красителем на основе плумбата кальция (140—160 г/м²). После монтажа был нанесен еще один слой того же красителя (140—160 г/м²) и два слоя фталатного масляного красителя (110—130 г/м²) [24].

Формование напылением. Напыление материала на поверхность оправки требуемой формы с последующим снятием с нее слоя покрытия обеспечивает получение готовых изделий, находящихся применение в различных областях техники.

Для защиты от пыли и влаги радиолокационная антенна самолета закрывается обтекателем, который должен иметь достаточную прочность, коррозионную стойкость, радиопрозрачность в микроволновом диапазоне* и быть жаростойким. Наиболее подходящим материалом для обтекателя радиолокационной антенны является оксид алюминия.

Согласно прежней технологии, обтекатели изготавливали прессованием из шликера на основе оксида алюминия с последующей сушкой и обжигом полученной формы или же на поверхность стальной формы наносили мокрый глинозем, просушивали и производили затем гидростатическое прессование в гибкой пресс-форме с последующим спеканием. Однако при изготовлении обтекателей по такой технологии значительная часть обтекателей растрескивалась при спекании из-за значительной усадки материала, составляющей 20 или 8% в зависимости от технологии изготовления спекаемой заготовки.

В последнее время обтекатели радиолокационных антенн изготавливают с использованием технологии газопламенного напыления прутковых материалов из оксида алюминия [25]. На поверхность вращающейся алюминиевой оправки после легкой обдувки корундом газопламенным напылением наносят слой поваренной соли. Поверхность покрытия из поваренной соли шлифуют мелкозернистой наждачной бумагой, доведя толщину покрытия до 1 мм, а затем на него наносят покрытие из оксида алюминия толщиной 3,8 мм. Растворение струей воды слоя поваренной соли между поверхностью оправки и покрытием из оксида алюминия обеспечивает снятие этого покрытия, имеющего форму обтекателя радиолокационной антенны. Чтобы обтекатель был газонепроницаемым, его обжигают при

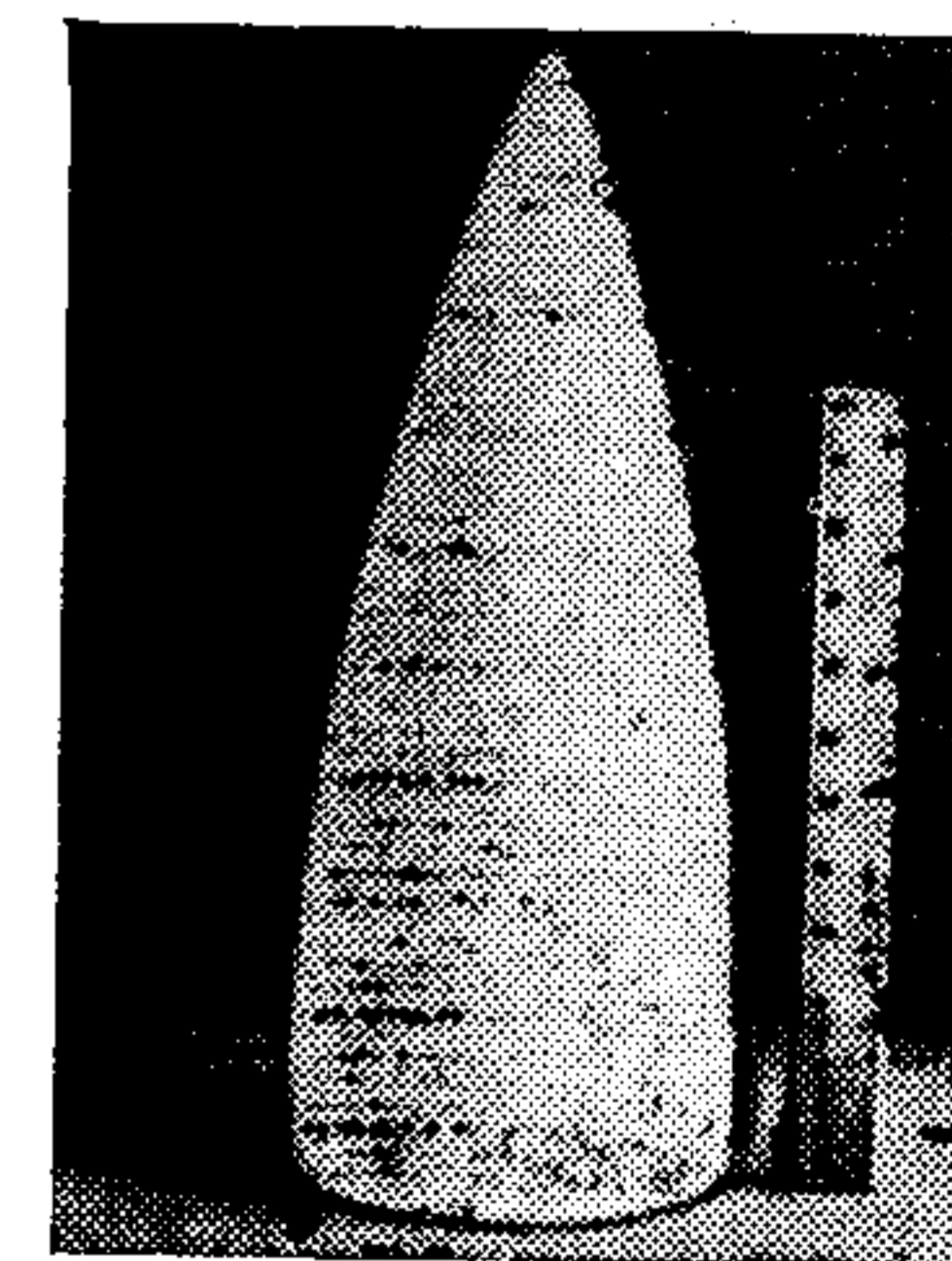


Рис. 194. Обтекатель радиолокационной антенны, изготовленный по технологии формования напылением

* К числу этих характеристик относятся потери энергии при отражении и поглощении, минимальное отклонение от заданной ориентации и изоляционные свойства, необходимые для пропускания УКВ.



Рис. 195. Тигли и трубки, изготовленные из диоксида циркония способом формования напылением

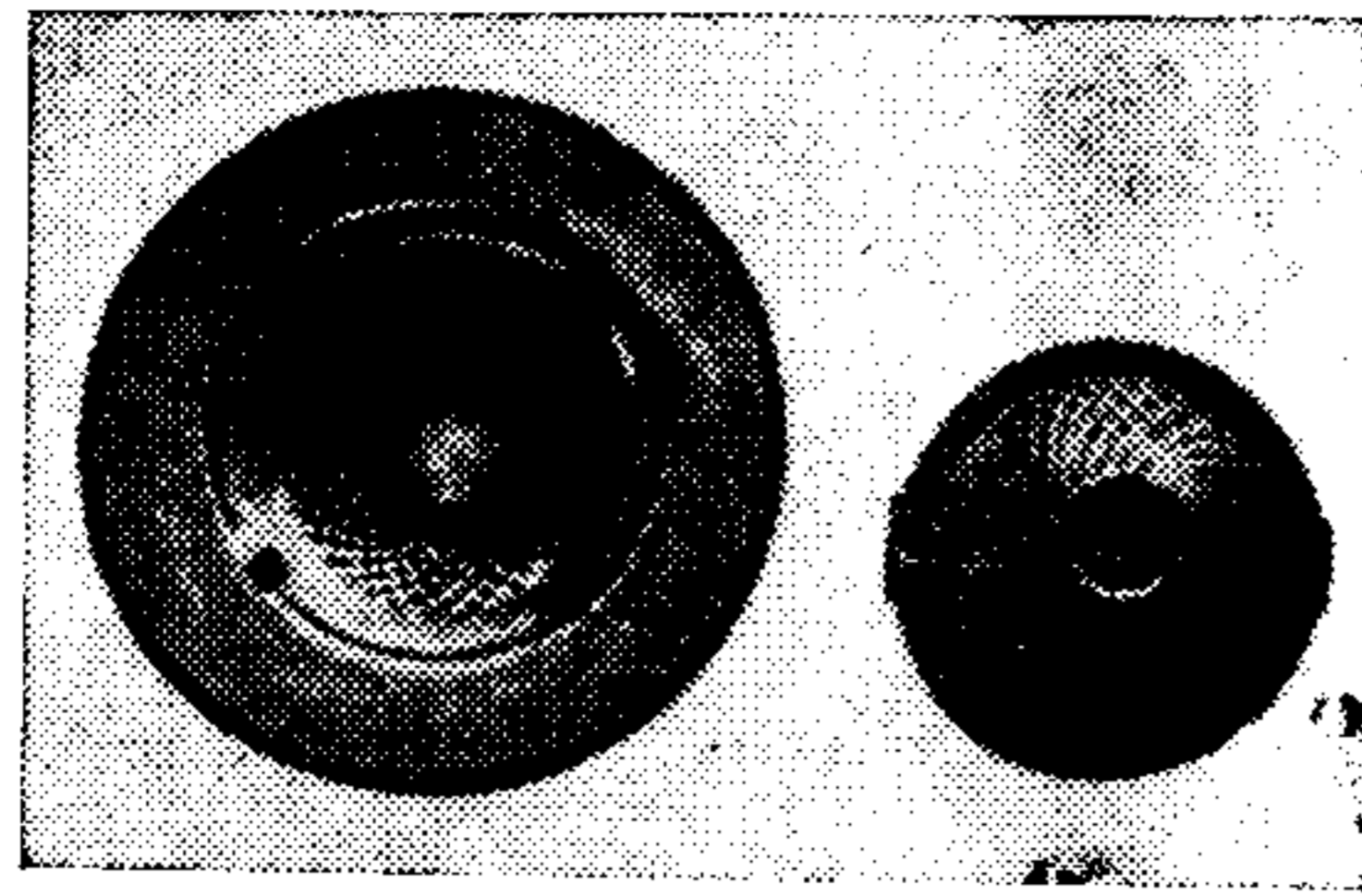


Рис. 196. Электрод для электроэрозионной обработки (справа), изготовленный по металлической форме-оправке (слева)

температуре 1770°C (рис. 194). Усадка при обжиге составляет 3,7%.

Формование напылением используют не только для изготовления таких специальных деталей, как обтекатели радиолокационных антенн, но и для самых разнообразных изделий, имеющих форму тонких керамических оболочек, которые должны быть плотными и обладать небольшой усадкой в процессе обжига. Естественно, что в ряде случаев можно использовать оболочки сразу после напыления, не подвергая их обжигу.

На рис. 195 показаны тигли, трубки и другие изделия, изготовленные формованием способом плазменного напыления из диоксида циркония [26].

В производстве штампов и пресс-форм широко используют электроэрозионную (искровую) обработку, основная проблема которой связана с точностью изготовления электродов и их стоимостью. В последнее время для изготовления электродов применяют технологию формования напылением [22].

При изготовлении электродов формованием используют металлическую форму — оправку, традиционно изготовленную механической обработкой и ручной доводкой. На поверхность металлической формы напыляют слой покрытия толщиной 5—10 мм, извлечение которого позволяет получить желаемый электрод. Плотное прилегание напыляемого слоя формируемого электрода к поверхности формы, определяющей его геометрию, предъявляет высокие требования к качеству и точности изготовления этой формы. На рис. 196 показан электрод, изготовленный формованием покрытия по металлической форме-оправке.

1

1. Редакционная коллегия по составлению справочной литературы по электрическим способам обработки. Справочник по электрическим способам обработки. 1969. «Никкан когё симбунся».
2. Японское общество металлургов и Японский институт черных металлов. Справочник по черным металлам. 1967. «Марудзэн».
3. Японский институт технологии поверхностей обработки металлов. Справочник по технологии поверхностной обработки. 1963. «Никкан когё симбунся».
4. Хасуи А. Техника напыления. 1969. «Екэндо».

2

1. Справочник по новым способам сварки. 1967, с. 165. «Никкан когё симбунся».
2. W. J., 45 (1966) No. 8, 50.
3. Мурамото Т. Доклад на совещании комитета по технологии сварки Японского института сварки. 1965, — сентябрь, с. 2.

3

1. Бакши О. А., Белоусов Е. Ф., Клековкин Г. П., Соловский В. М., Сумина Т. В. Welding Production, 7(1960) No. 3, 30—33.
2. Ниси Т., Кимура К. Есэцу гаккайси. 1968, т. 37, № 12, с. 1310—1325.
3. Фрумин И. И., Аснис А. Е., Гутман Л. М., Ксенджик Г. В., Лапченко В. А., Лейначук Е. И., Морозовская Е. В., Походня И. К., Субботовский В. П., Хо-мушко Ф. А. Welding and allied process in manitenance and repair work. «Elsevier Publishing Company», (1961) 70.
4. Имаи Ю., Сайто Т. Тэцу то хаганэ, 1960, т. 46, № 6, с. 665—673.
5. H. S. Avery: W. J., 31 (1952) No. 2, 116—145.
6. Фирма «Кобэ сэйкосё». Сварочные электроды. 1959, с. 397.
7. Сайто Т., Нисидзава Т. Нихон киндзоку гаккай кайхо. 1963, т. 2, № 10, с. 564—571.
8. Японское общество металлургов. Справочник по металлам (издание 2-е). 1961, с. 1282. «Марудзэн».
9. Комитет по сварочным электродам Японского института сварки. Эталонные снимки сварных швов, полученных дуговой сваркой с помощью электродов. 1967, с. 133. «Сампо сюппан».
10. Подкомитет по наплавке Японского института сварки. Есэцу гидзюцу. 1978, т. 26, № 1, с. 84—93.
11. Справочник по коррозионно-стойким сталям (под редакцией Нагата-ни К.). 1973, с. 34. «Никкан когё симбунся».
12. Кована М. Нихон киндзоку гаккай кайхо. 1973, т. 12, № 8, с. 533—545.
13. Кицука Е. Киндзоку дзайрё. 1975, т. 15, № 8, с. 72—80.

1. H. S. George: W. J., 11 (1932) No. 7, 22—28.
2. H. Echman: W. J., 20 (1941) No. 3, 180—185.
3. Китани С. Киндзоку. 1974, т. 44, № 1, с. 48—52.
4. H. Zentner: W. and M. Fab., 44 (1976) No. 4, 208—216.
5. F. Neff, P. Scherl, K. Winter, H. Ornig: Zeit. für Schweiss (1974) No. 5, 109—120.
6. R. Killing, F. Potthoff, H. Sivka: D. V. S. Beriche (1976) No. 41, 9—16.
7. E. C. Garrabrant, R. S. Zuchowski: W. J., 48 (1969) No. 5, 385—388, 391—395.
8. W. G. Essers, G. Jelmorini, G. W. Tichelear: Metal Const. & B. W. J., 4 (1972) No. 12, 439—445 S.

1. Кихара Х., Судзуки Х., Каная Б. Киндзоку дзайрё гидзюцу кэнкю обун хококу, 1959, т. 1, с. 39—64.
2. Справочник по сварке (3-е издание под редакцией Кихара Х.), 1970, с. 524. «Сампо сьуппан».
3. F. J. Wilkinson, C. L. M. Cottrell, H. V. Huxley: B. W. J., 5 (1958) No. 12, 557—562.
4. Ниси Т., Кавадзура Я., Кимура К. Материалы комитета по технологии сварки Японского института сварки. 1958 — май, с. 37.
5. Мацуда Ф. Киндзоку. 1974, т. 44, № 6, с. 24—30.
6. A. A. Smith: Welding in the World, 8 (1970) No. 1, 28—34.
7. Андо С., Утида А., Кимата Н. Есэцу гаккайси. 1969, т. 38, № 10, с. 1106—1115.
8. Японское научно-техническое общество по электростали. Справочник по специальным сталям. 1969. 17—7. «Рикогакуся».
9. Сугияма Н., Санко М. Есюцу гидзюцу. 1973, т. 21, № 7, с. 21—27.
10. Мияно К. Киндзоку дзайрё. 1973, т. 13, № 12, с. 48—57.
11. Утики Т., Кумэ Р., Кацуми Н. Исикавадзима — Харима гихо. 1972, т. 12, № 4, с. 378—385.
12. Межзеренная коррозия коррозионно-стойкой стали (перевод Ю. Д. Рези-ко). 1973. «Ниссо цусинся».

1. Судзуки Т., Кувахара М., Мураи Х. ИВ., II-456-68 (1968) 1.
2. D. C. Smith: W. J., 38 (1959) No. 9, 337—392 S.
3. Сайто Т., Цубои Д., Тэрадзима К. Материалы комитета сварочной металлургии Японского института сварки. 1971 — февраль, с. 1.
4. Оцубо Ц. Есэцукай. 1954, т. 6, № 9, с. 598—606.
5. «Steel mill roll reclamation» (2-е издание) Stody Co., Technical Report, 19.
6. Удзиэ А., Сато А., Нагаока Т. Мицубиси дзюко гихо. 1967, т. 4, № 1, с. 49—56.

1. Эгава К. Дзюнкацу. 1974, т. 19, № 12, с. 897—904.
2. Огоэ М., Сада Т., Мидзуно М. Нихон кикай гаккай ромбунсю. 1955, т. 21, № 107 (часть 1), с. 555—561.
3. Накаяма Х., Янагитати Х. Есэцукай. 1964, т. 16, № 4, с. 200—206.
4. Мияно К., Эндо Е., Ямада К. Тэцу то хаганэ. 1961, т. 47, № 3, с. 431—433.
5. Миёси Э., Адзуми И., Като С., Омори Я., Накагава К. Тэцу то хаганэ. т. 51, № 13, с. 2322—2327.

6. Мацумура М. Босёку гидзюцу. 1977, т. 26, № 9, с. 527—537.
7. Хидэюки Т. Дзайрё. 1969, т. 18, № 185, с. 198—204.
8. Ковака М. Нихон киндзоку гаккай кайхо, 1973, т. 12, № 8, с. 533—545.
9. Ковака М., Фудзикава Х., Кобаяси К. Карёку гэнсирёку хацудэн. 1977, т. 28, № 5, с. 443—449.
10. Ватанабэ Т., Сайда Т., Сугивара Т., Иноуэ С., Каваути М., Есэцу гаккайси. 1976, т. 45, № 3, с. 186—195.
11. Кондо Т. Босёку гидзюцу. 1977, т. 26, № 1, с. 31—41.
12. Араи К. Босёку гидзюцу. 1977, т. 26, № 7, с. 389—400.

1. Сунамото Д., Эндо Т., Симояма Н., Такэути Ю. Мицубиси дзюко гихо. 1975, т. 12, № 4, с. 455—462.
2. Дайтё К. Есэцу гаккайси. 1967, т. 36, № 1, с. 9—28.
3. Дайтё К. Есэцу гаккайси. 1967, т. 36, № 2, с. 100—115.
4. Мисава М. Есэцу гидзюцу. 1971, т. 40, № 10, с. 978—988.
5. Араи Т. Сагёсэн. 1965, № 38, с. 78—92.
6. Японское общество по литой стали. Японское общество по стальным поковкам. Проблемы применения стальных отливок и поковок. 1972, с. 86.
7. Тамура Х., Като Н., Екои С., Исии Ю. Есэцу гаккайси. 1974, т. 43, № 9, с. 794—804.
8. Сугияма Н., Танака О. Сэкию гаккайси. 1972, т. 15, № 11, с. 900—908.
9. Отдел технологии сварки сосудов высокого давления атомных реакторов Японского института сварки. Исикавадзима — Харима гихо. 1972, т. 12, № 3, с. 269—277.
10. Материалы третьего завода в Ёкогама фирмы «Исикавадзима — Харима дзюко».
11. Го С. Есэцу гидзюцу. 1973, т. 21, № 7, с. 35—40.
12. Тория Ё. Киндзоку дзайрё. 1967, т. 7, № 3, с. 65—72.

1. W. E. Ballard: «Metal Spraying and the Flame Deposition of Ceramics and plastics», Griffin (London) (1963).

1. Сугияма М. Цветные металлы. 1963. «Коронася».
2. Японский институт напыления. Справочник по напылению. 1964. «Никкан когё симбунся».
3. M. A. Clegg, V. Silins, D. J. I. Evans: 7th Int. Metal Spray, Conference, 1 (1973) 62.
4. Оиси Х., Сасаки С., Охара М. Есэцу гаккайси. 1976, т. 45, № 8, с. 604.
5. Симануки Е., Кидо Т., Кунитани Я. Пиротехника Кампбелла. 1963. «Коронася».
6. Есики Б. Огнеупорные материалы. 1962. «Гиходо».

1. Хасуи А., Китахара С., Фукусима Т. Киндзоку дзайрё кэнкюсё вэнкю хококу. 1967, т. 10, № 1, с. 53.
2. W. E. Ballard: «Metal Spraying and the Flame Deposition of Ceramics and Plastics», Griffin (London) (1963).
3. A. G. Doyle, J. W. Lambert: B. W. J., (1963) No. 9, p. 450 s. M. A. Teter: Material & Methods, (1956) No. 2, 100.
4. N. J. Allnat: «Metal Spraying by the Electric Arc Seminar Handbook», 1973 (Weld. Inst.) p. xii.

5. E. Kretzschmar: «Metal, Ceramic-und Plastspritzen», VEB Verlag Technik Berlin (1969).
6. H. D. Steffens: B. W. J., (1966) No. 10, p. 594.
7. A. V. Cambel: «Plasma Physics and Magneto-fluidmechanics», McGraw-Hill (1963).
8. E. V. Condon, Odishaw: «Handbook of Physics», McGraw-Hill (1958).
9. Хасуи А., Китахара С., Фукусима Т. Киндзоку дзайрё кэнкюсё кэнкю хо-коку. 1965, т. 8, № 3, с. 203.
10. H. S. Inggam, A. G. Fabel: W. J., 53 (1975) No. 2, 101 s.
11. Сухара Д., Китадзима К., Фукуда С. Есэцу гаккайси. 1976, т. 45, № 8, с. 610.

12

1. A. Hasui, S. Kitahara and T. Fukushima: Trans. NRIM, 12 (1970) No. 1, 9.
2. W. E. Ballard: «Metal Spraying and the Deposition of Ceramics and Plastics» Griffin (London) (1963).
3. Хасуи А., Китахара С., Фукусима Т. Киндзоку дзайрё кэнкюсё кэнкю хо-коку. 1967, т. 10, № 1, с. 53.
4. D. G. Moore, W. D. Hayes, A. W. Crigler: WADC Technical Report 59—658, Part I (1959).
5. E. Kretzschmar: «Metall, Keramik-ung Prastspritzen», VEB Verlag Technik, Berlin (1969).
6. A. G. Doyle, J. W. Lambert: B. W. J., (1963) No. 9, S. 450.
7. A. Matting, H. D. Steffens: Metall, 17 (1963) No. 9, 905 S.
8. F. N. Longo, H. Florant: 8th Int. Thermal Spray. Conference, Rep. of Papers (1976) 319.
9. Сухара Д., Китадзима К., Фукуда С. Есэцу гаккайси. 1976, т. 45, № 8, с. 610.
10. J. E. Cline, R. T. Thurston, J. Wulff: W. J., 29 (1950), No. 7, S. 320.
11. D. R. Mash, N. F. Weare, D. L. Walker: Jour. of Metals, July (1961) 473.
12. Китахара С., Хасуи А. Рефераты по докладам на осеннем конгрессе Японского общества сварщиков. 1973, с. 476.
13. R. L. Nelson, J. L. Woodhead, T. K. Scott, L. L. Wassell, A. G. Cross: 7th Int. Metal Spray, Conference, 1 (1973) 96.
14. O. Knotek, E. Lugscheider, H. R. Eschnauer: 7th Int. Metal Spray. Conference, 1 (1973) 72.
15. V. Williams, H. Hermann: 8th Int. Thermal Spray. Conference (1976) Rep. of Papers, 236.
16. Красниченко Л. В. Metal Industry, 94 (1959) 461.
17. G. V. Bobrov, V. I. Privenzentsev: Weld. Production (1967), No. 6, 15.
18. Японский институт сварки. Справочник по напылению. 1964. «Никкан когё симбунся».
19. Хасуи А., Китахара С., Хагивара С. Киндзоку дзайрё кэнкюсё кэнкю хо-коку. 1966, т. 9, № 2, с. 167.
20. Эндо. Рикогаку кэнкю хококу. 1969, т. 7, № 1, с. 111.
21. W. E. Ballard: Proc. of Phys. Soc., 57—320 (Part 2) (1945) 67.
22. Хасуи А., Китахара С., Хигасимаса Х. Киндзоку дзайрё кэнкюсё кэнкю хококу. 1964, т. 7, № 4, с. 319.
23. H. D. Steffens: B. W. J., (1966) No. 10, 597 S.
24. A. Matting: B. W. J., (1966) No. 9, 526 S.
25. R. T. Allsop, T. J. Pitt, J. V. Hardy: Metallurgia, (1961) No. 3, 125.
26. Китахара С., Хацуи А. Есэцу гаккайси. 1973, т. 42, № 2, с. 91.

27. D. A. Gerdeman, N. L. Hecht: «Arc Plasma Technology in Materials Science», Springer-Verlag (1972).
28. C. F. G. Baxter, H. Reiter: 8th Int. Thermal Spray. Conference (1976), Rep. of Papers, 271.
29. P. L. Burnett, G. A. Jensen: A. S. D. — NASA Refractory Composites W. G. Meeting, June (1962).
30. Китахара С., Сэкинэ И. Есэцу гаккайси. 1972, т. 41, № 8, с. 925.
31. Такэи Т., Нагасака Х. Нанесение покрытий способом напыления. 1964. «Никкан когё симбунся».
32. H. Reininger: Metall, 14 (1960) No. 2, 115 S.
33. N. Bredz, H. Schwartzbart: W. J., 40 (1961) No. 3, 123 S.
34. V. Navara: Schweisstechnik, 13 (1963) No. 9, 421 S.
35. N. Klein: Schweißen und Schneiden, 16 (1964) No. 10, 472.
36. Симатани А., Тоёда С., Эндо М. Нихон ёся кёкайси. 1970, т. 7, № 3, с. 412.
37. G. R. Bell: Weld. and Metal Fab., Oct (1962), 398.

13

1. Японский институт напыления. Справочник по напылению. 1964. «Никкан когё симбунся».
2. Британский стандарт BS 4495 (1969), Recommendations for the flame spraying of ceramic and cermet coatings (перевод Мима Е).
3. Мино И. Нихон киндзоку гаккайси. 1959, т. 23, с. 503.
4. JIS H 8302 — 1977.
5. JIS H 8301—1977, JIS H 8300—1971.
6. ASM: Metals Handbook, Vol. II (1964).
7. См. Японский промышленный стандарт K5581, K5582.
8. Иса С. Киндзоку дзайрё: 1965, т. 5, № 5, с. 39.
9. Японский промышленный стандарт Z8303 — 1976.
10. AWS: «Recommended Practices for Fused Thermal Sprayed Deposits» (перевод Тагая М. и Моримото С.). 1974 — 24 октября. C2, с. 15—75.
11. AWS: «Plasma Spraying» C2. 12—70 (1970).
12. B. Burgoin: 8th Int. Thermal Spray, Conference (1976) Rep. of Papers, 137.
13. Кога М. Киндзоку дзайрё. 1977, т. 17, № 8, с. 26.
14. AWS: «Flame Spraying of Ceramics» AWS C2. 13—70 (1970).

14

1. ASTM Designation: C 633 69 «Standard Method for Adhesion or Cohesive Strength of Flame-Sprayed Coatings».
2. H. D. Steffens: B. W. J., (1966) No. 10, 597.
3. Кобаяси Н., Хондо Е. Киндзоку дзайрё. 1977, т. 17, № 8, с. 22.
4. Хасуи А., Китахара С., Хагивара С. Киндзоку дзайрё кэнкюсё кэнкю хо-коку. 1966, т. 9, № 2, с. 167.
5. S. Wolosin, S. Cohen: 8th Int. Thermal Spray. Conference (1976) Rep. of Papers, 45.
6. F. N. Longo, H. Florant: 8th Int. Thermal Spray. Conference, Rep. of Papers, 319.
7. H. S. Ingham, A. P. Shepard: Metallizing Handbook, Vol. 1, (1958) METCO.
8. W. E. Ballard: «Metal Spraying and the Deposition of Ceramics and Plastics», Griffin (London) (1963).
9. Pratt & Whitney Aircraft: Overhaul Standard Practices Manual, 70—46—4, Nov. 1/74.

10. Мима Е., Кадзи К., Каван С. Нихон ёся кёкайси. 1970, т. 6, № 2, с. 311.
11. ASME Handbook: «Metals Engineering Design» Part 2, McGraw-Hill (1965).
12. ASM: Metals Handbook Vol. 2 (1964).
13. Ито С. Износ и поверхностное упрочнение. 1959. «Сампо сьуппан».
14. F. N. Longo: 8th Int. Thermal Spray. Conference (1976) Rep. of Papers, 342.
15. Хасуи А., Китахара С. Киндзоку дзайрё кэнкюсё кэнкю хококу. 1964, т. 7, № 2, с. 117.
16. H. D. Steffens, M. Dittrich: Schweißen und Schneiden, 15 (1963) No 3, S. 97.
17. R. T. Allsop, T. J. Pitt and J. V. Hardy: Metallurgia, March (1961) 125.
18. Хасуи А., Китахара С., Хигасимаса Х. Киндзоку дзайрё кэнкюсё кэнкю хококу. 1964, т. 7, № 4, с. 319.
19. Хасуи А., Китахара С., Хагивара С. Киндзоку дзайрё кэнкюсё кэнкю хококу. 1966, т. 9, № 2, с. 167.
20. Красниченко Л. В., Metal Industry, 94 (1959) N. 6, 461.
21. Хасуи А., Китахара С. Есэцу гаккайси. 1967, т. 15, № 5, с. 50.
22. Утида С. Нихон кикай гаккайси. 1964, т. 67, № 548, с. 1353.
23. W. L. Aves: Metal Progress, March (1959) 90.
24. Нагасака Х. Киндзоку дзайрё. 1977, т. 17, № 8, с. 13.
25. Окада М., Арата Е. Плазма и ее применение в технике. 1966. «Никкан когё симбунся».
26. Хасуи А., Китахара С. Неопубликованная работа.
27. T. Vasilos, G. Haggis: Am. Ceramic Soc. Bulletin, 41 (1962) No. 1, 14.
28. Симануки Е., Кидо Т., Кунитани Я. Пиротехника Камбелла. 1963. «Коронася».
29. J. L. Bliton, H. L. Rechter: Am. Ceramic Soc. Bulletin, 40 (1961) No. 11, 683.
30. T. L. Mackay, A. N. Muller: Am. Ceramic Soc. Bulletin, 46 (1967) No. 9, 833.
31. Materials in Design Engineering. Mid-Oct. (1966) 432.
32. E. Kretzschmar: «Metall-, Keramik- und Plastspritzen», Veb Verlag Technik Berlin (1969).
33. D. W. Luke: B. W. J., (1966) No. 2, 81.
34. Y. S. Pirogov, R. W. Brown, A. L. Friedberg: Am. Ceramic Soc. Bulletin, 45 (1966) No. 12, 1071.
35. Таки Г. Киндзоку дзайрё. 1965, т. 5, № 5, с. 16.
36. Нагасака Х., Утида С., Сэкимото О. Нихон ёся кёкайси. 1974, т. 10, № 2, с. 1.
37. AWS: «Corrosion Tests of Flame-Sprayed Coated Steel», 19 Year Report AWS C2. 14—74.
38. Такэи Т., Нагасака Х. Нанесение покрытий способом напыления. 1964. «Никкан когё симбунся».
39. Мияса А., Моримото С., Икэда Я., Ки Т., Симатани К., Тагая М. Нихон ёся кёкайси. 1970, т. 7, № 2, с. 396.

1. A. V. Levy: Metal Progress, March (1959) 86.
2. Кога М. Киндзоку дзайрё. 1977, т. 17, № 8, с. 26.
3. A. Tresk: 8th Int. Thermal Spray. Conference (1976) Rep. of Papers, 1.
4. M. A. Clegg, V. Silins and D. J. I. Evans: 7th Int. Metal Spray. Conference (1973) Vol. 1, 62.

5. C. R. Wilkins, F. J. Wallace and P. H. Zajchowski: 8th Int. Thermal Spray Conference (1976) Rep. of Papers, 10.
6. Pratt & Whitney Aircraft: Overhaul Standard Practice Manual, 70-46-4, Nov. 1/74.
7. Фукунага С., Ито Х., Ибуки К., Мацумото Х. Нихон ёся кёкайси. 1974, т. 11, № 2, с. 193.
8. E. J. Robbins, A. J. Walton: «Surface Coating for Saving in Engineering Seminar Handbook», (1974) The W. I., 23.
9. J. A. Sheppard: 8th Int. Thermal Spray. Conference (1976) Rep. of Papers, 187.
10. Асахи Н., Тамamura Т., Дои М., Ямагава Т., Иноуэ Х. Киндзоку дзайрё. 1977, т. 17, № 8, с. 31.
11. Японский институт напыления. Справочник по напылению. 1964. «Никкан когё симбунся».
12. A. G. Doyle, J. W. Lambert: B. W. J., (1963) No. 9, 459.
13. G. R. Bell: 8th Int. Thermal Spray. Conference (1976) Rep. of Papers, 396.
14. H. Kayser: 8th Int. Thermal Spray. Conference (1976) Rep. of Papers, 176.
15. C. G. Nessler, J. R. Palermo: Materials in Design Engineering, June (1962). 109.
16. Product Engineering. 12 (1966) No. 9, 81.
17. A. G. Doyle, J. W. Lambert: B. W. J., (1963) No. 9, 450.
18. I. Permutter, De Pierre: Metal Progress, Nov. (1963) 90; M. Donovan: B. W. J., (1966) No. 8, 490.
19. H. W. Schultze, R. P. Freeman and J. Z. Briggs: Materials in Design Engineering, Jan. (1959) 81.
20. G. R. Bell: 8th Int. Thermal Spray. Conference (1976) Rep. of Papers, 396.
21. METCO Application Bulletin 740515.
22. Мицуда С., Мицуда Т. Киндзоку дзайрё. 1977, т. 17, № 8, с. 47.
23. M. Ito, S. Takahashi: 8th Int. Thermal Spray. Conference (1976) Rep. of Papers, 464.
24. Сэкимото О., Исикава К. Есэцу гидзюцу. 1976, т. 24, № 6, с. 67.
25. N. N. Ault, L. H. Milligan: Am. Ceramic Soc. Bulletin. 38 (1959) No. 11, 661.
26. R. L. Nelson et al: 7th Int. Metal Spray. Conference (1973) Vol. 1, 96.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Способы поверхностной обработки	7
Глава 2. Общая характеристика техники наплавки	13
Глава 3. Наплавочные материалы	17
3.1. Материалы для износостойкой наплавки	19
3.2. Коррозионно-стойкие наплавочные материалы	34
Глава 4. Способы наплавки	42
4.1. Газовая наплавка	43
4.2. Дуговая наплавка покрытыми электродами	45
4.3. Дуговая наплавка под флюсом	45
4.4. Наплавка открытой дугой	48
4.5. Наплавка в среде углекислого газа	49
4.6. Наплавка в среде защитного (инертного) газа	50
4.7. Прочие способы наплавки	51
Глава 5. Теоретические основы наплавки	54
5.1. Основной металл и наплавочные материалы	54
5.2. Роль среды при наплавке	60
5.3. Погонная энергия и скорость охлаждения	62
5.4. Термообработка после наплавки	63
Глава 6. Практика наплавки	69
6.1. Подготовка к наплавке	69
6.2. Наплавка	72
6.3. Последующая обработка изделий и контроль качества наплавки	77
6.4. Дефекты наплавки и меры их предотвращения	81
Глава 7. Свойства наплавленного металла и его испытания	83
7.1. Износостойкая наплавка	83
7.2. Коррозионно-стойкая наплавка	91
Глава 8. Применение наплавки	102
Глава 9. Общая характеристика технологии напыления	121
Глава 10. Напыляемые материалы	125
10.1. Напыляемые материалы в виде гроволоки	125
10.2. Прутковые напыляемые материалы	128
10.3. Порошковые напыляемые материалы	128
10.4. Керамика	133

Глава 11. Технология напыления	136
11.1. Газопламенное напыление	136
11.2. Детонационное напыление	139
11.3. Дуговая металлизация	140
11.4. Плазменное напыление	142
11.5. Электроимпульсное нанесение покрытий	145
Глава 12. Теория напыления	147
12.1. Скорость и температура частиц напыляемого материала	148
12.2. Столкновение частиц с поверхностью детали и формирование покрытия	153
12.3. Прочность сцепления покрытия с основным материалом и сцепление между частицами в покрытии	157
12.4. Термообработка после нанесения покрытий	165
Глава 13. Практика напыления	170
13.1. Подготовка к напылению	170
13.2. Напыление	173
13.3. Последующая обработка	175
13.4. Чистовая обработка покрытий	178
13.5. Дефекты и меры их предотвращения	179
Глава 14. Свойства напыленных покрытий и их испытания	181
14.1. Испытания на прочность сцепления	181
14.2. Прочность при растяжении напыленных материалов покрытий	189
14.3. Износостойкость и фрикционные свойства напыленных покрытий	190
14.4. Жаростойкие и теплоизоляционные характеристики покрытий	195
14.5. Электрические свойства покрытий	201
14.6. Коррозионная стойкость покрытий	204
Глава 15. Применение напыления	209
Список литературы	231

А. ХАСУИ, О. МОРИГАКИ
НАПЛАВКА И НАПЫЛЕНИЕ

Редактор Т. Е. Черешнева
Художественный редактор Е. А. Ильин
Переплет художника О. В. Кашаева
Технический редактор Е. П. Смирнова
Корректоры А. П. Озерова, Л. Е. Сонюшкина

ИБ № 4263

Сдано в набор 25.06.85. Подписано в печать 19.09.85. Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская
№ 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 15,0. Усл. кр.-отт. 1
Уч.-изд. л. 16,23. Тираж 14 000 экз. Заказ 1623. Цена 1 р. 40 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение»,
107076, Москва, Стромьинский пер., 4.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.