

40.72  
5-38  
1019438

Г. Д. ЗАХАРЕНКО  
В. К. ШАМКО

ТЕРМИЧЕСКАЯ  
ОБРАБОТКА  
ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ  
ДЕТАЛЕЙ



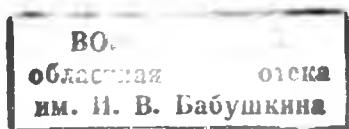
МИНСК  
«УРАДЖАЙ» 1984

Г. Д. ЗАХАРЕНКО

В. К. ШАМКО

ТЕРМИЧЕСКАЯ  
ОБРАБОТКА  
ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ  
ДЕТАЛЕЙ

1019438



МИНСК «УРАДЖАЙ» 1984

ББК 40.72  
3-38  
УДК 631.3.02:621.78

Рецензенты: *Ярошевич В. К.*, канд. техн. наук; *Жуков А. В.*, д-р техн. наук.

**Захаренко Г. Д., Шамко В. К.**  
3-38 Термическая обработка восстанавливаемых деталей. — Мн.: Ураджай, 1984. — 88 с., ил.  
20 к.

Излагаются теоретические основы термической и химико-термической обработки восстанавливаемых деталей сельскохозяйственных машин. Рассматриваются вопросы ее применения в технологических процессах восстановления деталей. Приводятся данные о специальном и универсальном термическом оборудовании для ремонтных предприятий. Описываются особенности механической обработки восстанавливаемых деталей. Для специалистов и рабочих термических участков ремонтного производства.

3802040400—058  
М305(05)—84—19—84

ББК 40.72

*Геннадий Дмитриевич Захаренко, Владимир Константинович Шамко*

#### ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Заяв. редакция: *И Липницкий* Редактор *А. М. Пентугова* Обложка художника *С. В. Стрельского*. Художественный редактор *Л. М. Рудаковская*. Технический редактор *М. М. Соколовская* Корректор *Н. А. Нелюбина*

ИБ № 1361

Сдано в набор 12.12.83. Подписано к печати 22.05.84. АТ 05673. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага тип. № 3 Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 4.62. Усл. кр. отт. 5,25. Уч.-изд. л. 4,89. Тираж 1600 экз. Заказ 3250. Цена 20 и

Издательство «Ураджай» Государственного комитета Белорусской ССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли 220600, Минск, проспект Машерова, 11.

Типография «Победа», г. Мелитечно. 222310, ул. В. Тавлая, 11.

# 1. ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

## 1.1. Кристаллическое строение и свойства металлов

Металлы — основной конструктивный материал в машиностроении. Это обусловлено рядом их характерных свойств: прочностью, пластичностью, хорошей тепло- и электропроводностью, т. е. теми свойствами, которые делают металлы технологически доступными современному производству.

Теория металлического состояния рассматривает металл как вещество, состоящее из положительно заряженных ионов, окруженных отрицательно заряженными частицами — электронами, слабо связанными с ядром. Эти электроны непрерывно перемещаются внутри металла и принадлежат не одному какому-то атому, а всей совокупности атомов. Легкое перемещение этих электронов внутри металла и малая их связь с атомами обуславливают наличие определенных металлических свойств (высокая электро- и теплопроводность).

Механическую прочность металлам обеспечивают ионы, которые в результате взаимодействия образуют пространственную кристаллическую решетку. Для металлов характерны три типа кристаллических решеток: кубическая гранцентрированная, кубическая объемно-центрированная и гексагональная плотноупакованная.

У многих металлов наблюдается полиморфизм — изменение типа кристаллической решетки с изменением температуры. Так, у железа имеются две основные полиморфные формы: кубическая объемно-центрированная и кубическая гранцентрированная. Изменение кристаллического строения одного и того же металла и температуры объясняется изменением энергетического состояния атомов и, соответственно, взаимодействия оболочек.

Несмотря на правильное расположение атомов в кристаллической решетке металла свойства ее в различных направлениях неодинаковы. Такое явление называют анизотропией. Объясняется это тем, что плотность заполнения атомами у кристаллической решетки в различных направлениях различна. Для того чтобы определить и четко обозначить это различие, введено понятие об атомах и кристаллографических плоскостях кристаллических решеток. Кристаллографической плоскостью называют прямую плоскость, проходящую через группу атомов кристалличе-

ской решетки. Естественно, в зависимости от положения в пространстве, таких плоскостей у кристаллической решетки может быть несколько.

Реальные кристаллы не имеют такого правильного, идеально регулярного расположения атомов в решетке, в них встречаются различные несовершенства — дефекты кристаллического строения. Характер и степень нарушения совершенства кристаллического строения в значительной мере определяют свойства металлов. Наиболее близки к совершенным кристаллам реальные единичные — монокристаллы. Но и их кристаллическое строение несовершенно — монокристалл состоит из так называемых субзерен. Субзерна в монокристалле разделены субграницами и ориентированы один относительно другого под углом от нескольких минут до нескольких градусов.

Металлическое тело состоит из большого количества кристаллов неправильной формы: кристаллитов или зерен. Такое его строение называется поликристаллическим. Зерна отличаются различной пространственной ориентацией кристаллической решетки, формой, величиной.

Все металлы можно разделить на черные и цветные. Черные металлы имеют темно-серый цвет, большую плотность (кроме щелочноземельных), высокую температуру плавления, относительно высокую твердость и во многих случаях обладают полиморфизмом. Наиболее типичным металлом этой группы является железо.

Цветные металлы чаще всего имеют характерную окраску: красную, желтую, белую. Обладают большой пластичностью, малой твердостью, относительно низкой температурой плавления, для них характерно отсутствие полиморфизма. Наиболее типичным металлом этой группы является медь.

Черные металлы можно подразделить следующим образом:

Железные металлы (ферромагнетики) — железо, кобальт, никель и близкий к ним по свойствам марганец. Кобальт, никель и марганец часто применяют как добавки к сплавам железа, а также в качестве основы для соответствующих сплавов, похожих по своим свойствам на высоколегированные стали.

Тугоплавкие металлы, температура плавления которых выше, чем железа. Применяют как добавки к легированным сталям, а также в качестве основы для соответствующих сплавов.

Урановые металлы — актиниды, имеющие преимущест-

вешное применение в сплавах для атомной энергетики.

Редкоземельные металлы — лантан, церий, неодим, празеодим и др., объединяемые под названием лантаноидов, и сходные с ними по свойствам иттрий и скандий. Эти металлы обладают весьма близкими химическими свойствами, но довольно различными физическими (температура плавления и др.). Их применяют как присадки к сплавам других элементов. В природных условиях встречаются вместе и вследствие трудностей разделения на отдельные элементы для присадки обычно применяют «смешанный сплав», так называемый мишметалл, содержащий 40...45 % Ce и 45...50 % всех других редкоземельных элементов. К таким смешанным сплавам относят ферроцерий (сплав церрия и железа), дидим (сплав неодима и празеодима преимущественно) и др.

Щелочноземельные металлы в свободном металлическом состоянии не применяются, за исключением специальных случаев.

Цветные металлы подразделяют на следующие группы:

Легкие металлы — бериллий, магний, алюминий, обладающие малой плотностью.

Благородные металлы — серебро, золото, металлы платиновой группы (платина, палладий, иридий, родий, осмий, рутений). К ним может быть отнесена и «полублагородная» медь. Обладают высокой устойчивостью против коррозии.

Легкоплавкие металлы — цинк, кадмий, ртуть, олово, свинец, висмут, таллий, сурьма и элементы с ослабленными металлическими свойствами — галлий, германий.

При конструировании и изготовлении машин и механизмов важно, чтобы материал детали выдерживал все виды механических и эксплуатационных нагрузок.

Основные механические свойства, получаемые при испытании: прочность, упругость, твердость, хрупкость, вязкость, изнашиваемость, выносливость, ползучесть и др. Прочность — свойство материала сопротивляться разрушению от действия напряжений. Упругость — способность материала восстанавливать свою первоначальную форму после прекращения действия нагрузок. Свойство материала сопротивляться проникновению в него другого тела, не получающего остаточной деформации, называется твердостью. Когда материал разрушается без заметного поглощения механической энергии в необратимой форме (без заметной пластической деформации), материал характеризуют как хрупкий. Вязкость — свойство материала по-

глощать в заметных количествах, не разрушаясь, механическую энергию в необратимой форме. Способность материала подвергаться поверхностному разрушению или повреждению под действием внешнего трения — это изнашиваемость. Выносливость — свойство материала выдерживать, не разрушаясь, большое число повторно-переменных напряжений. Постепенное разрушение материала при большом числе повторно-переменных напряжений называется усталостью. Способность материала медленно и непрерывно деформироваться при постоянном напряжении и повышенной температуре называется ползучестью.

Прочность характеризуется величиной отношения силы, прилагаемой для разрушения образца, к величине площади его поперечного сечения. Величина прочности выражается в паскалях (Па). В практике для обозначения прочности металлов пользуются единицей в миллион раз больше 1 Па — мегапаскалем (МПа). Эта величина практически в 10 раз меньше применяемой ранее величины кгс/мм<sup>2</sup> (1 кгс/мм<sup>2</sup> = 10 МПа).

Наиболее употребляемые показатели прочности — предел текучести и временное сопротивление. Пределом текучести  $\sigma_t$  (физический) является наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки. У некоторых материалов нет выраженной площадки текучести. В этом случае применяют условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  — напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2%. Временное сопротивление  $\sigma_b$  — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца.

Характеристикой пластичности материала служат величины относительного удлинения образца после разрыва  $\delta$  (отношение увеличения длины образца после разрыва к его первоначальной длине) и относительного сужения  $\psi$  (отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади его поперечного сечения). Обе эти величины выражаются в процентах.

Между твердостью данного материала и его прочностью существует определенная зависимость (табл. 1).

При сварке и наплавке различных металлов особую роль в прочности их соединения играет подбор пар материалов. Значительное место здесь занимает сопоставление кристаллического строения металлов. Лучшие условия для совмещения атомов и установления общности кристаллического строения соединяемых металлов будут в том случае, если у их кристаллических решеток близкие пара-

# 1. Соотношение между числами твердости и пределами прочности сталей

Твердость по Бринеллю, HB	Твердость по Роквеллу, HRC	Предел прочности стали $\sigma_{\text{в}}$ , МПа			
		углеродистой	хромистой	хромоникелевой	хромомолибденовой
688	65	2480		2340	2270
670	64	2410		2280	2210
659	63	2370		2240	2180
643	62	2310		2180	2120
627	61	2260	2180	2130	2070
611	60	2200	2130	2070	2020
597	59	2140	2080	2020	1970
582	58	2080	2030	1970	1920
569	57	2050	2000	1940	1880
547	55	1960	1910	1850	1800
510	52	1830	1780	1730	1680
485	50	1750	1700	1650	1600
461	48	1650	1620	1560	1520
441	46	1590	1540	1500	1450
420	44	1510	1470	1430	1380
393	42	1410	1370	1340	1300
378	40	1360	1320	1280	1250
354	38	1280	1240	1210	1170
333	36	1200	1170	1130	1100
313	34	1120	1090	1060	1030
298	32	1070	1040	1020	980
282	30	1020	980	960	930
269	28	980	940	920	890
255	26	920	890	860	840
241	24	870	840	820	800
229	22	820	800	780	760
217	20	780	760	740	720
207	18	740	720	700	680
200	—	720	700	680	660
190	—	680	670	650	630
180	—	650	630	610	590
170	—	610	590	580	560
160	—	580	560	540	520
150	—	540	520	510	500
140	—	500	490	480	470
130	—	470	450	440	430
120	—	430	420	410	400
110	—	400	390	380	370
102	—	370	360	350	340

метры и размеры атомов. Тип решетки, ее параметры и межатомные расстояния близки друг другу у никеля, меди и серебра, а при температуре выше полиморфного превращения — и у железа.

Кроме указанных свойств в подборе свариваемых и наплавляемых материалов важными являются технологические факторы ведения процессов сварки и наплавки, а



также конструктивные особенности самой детали, поэтому окончательно вопрос о подборе свариваемости пар решается рядом испытаний. Эти испытания делятся на следующие виды: определение стойкости против образования горячих трещин (в материале шва или в наплавке); определение стойкости металла околошовной зоны против образования холодных трещин; оценка стойкости основного металла, металла околошовной зоны и шва, а также всего сварного соединения против перехода в хрупкое состояние; проверка эксплуатационных характеристик металла шва, околошовной зоны и сварного соединения в целом.

## 1.2. Кристаллизация

Любое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом. В чистых металлах при определенных температурах происходит изменение агрегатного состояния: твердое сменяется жидким при температуре плавления, жидкое переходит в газообразное при температуре кипения. Температуры перехода зависят от давления, но при постоянном давлении они вполне определены.

Температура плавления — важная характеристика свойств металла. Она колеблется для различных металлов в весьма широких пределах — от 234,1 К для ртути — самого легкоплавкого металла, находящегося при комнатной температуре в жидком состоянии, до 3683 К для самого тугоплавкого металла — вольфрама.

В природе все самопроизвольно протекающие превращения обусловлены тем, что новое состояние в новых условиях является энергетически более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии.

На практике кристаллизация протекает только тогда, когда жидкость охлаждена ниже определенной температуры, которая называется фактической температурой кристаллизации. Охлаждение жидкости ниже этой температуры называется переохлаждением. Непосредственно процесс охлаждения в начальной стадии сопровождается плавным понижением температуры жидкости. При достижении температуры кристаллизации дальнейшее падение температуры прекращается до момента полной кристаллизации раствора из-за выделения скрытой ее теплоты.

Процесс кристаллизации начинается с зарождения мельчайших частиц кристаллов — зародышей или центров кристаллизации — и заканчивается ростом кристаллов из

этих центров. По мере развития процесса кристаллизации в нем участвует все большее и большее число кристаллов. Поэтому процесс вначале ускоряется, пока в какой-то момент взаимное столкновение растущих кристаллов не станет заметно препятствовать их росту, который замедляется, тем более что и жидкости, в которой образуются новые кристаллы, становится все меньше.

В процессе кристаллизации, пока кристалл окружен жидкостью, он часто имеет правильную форму, но при столкновении и срастании кристаллов их правильная форма нарушается, внешняя форма оказывается зависимой от условий соприкосновения растущих кристаллов. Вот почему кристаллы металла, зерна (кристаллиты) не имеют правильной формы. Размер образовавшихся кристаллов зависит от соотношения величин скорости кристаллизации и числа центров кристаллизации при ее температуре к степени переохлаждения. При большой скорости кристаллизации и малом числе ее центров образуются немногочисленные кристаллы; при малых скоростях и большом числе центров кристаллизации (большое переохлаждение) большое число мелких кристаллов. Если удается очень сильно переохладить жидкость, то она сохранится непревращенной. В настоящее время удалось добиться переохлаждения жидкого металла без кристаллизации, что позволило получить материал с новыми уникальными свойствами. Такое состояние является аморфным и характеризуется отсутствием определенной температуры плавления и правильного расположения атомов в виде определенной кристаллической решетки.

Вторичная кристаллизация (перекристаллизация) в твердом состоянии изменяет картину кристаллического строения — возникают и растут новые зерна, появляются их новые границы. Перекристаллизация может происходить при различных, вплоть до очень больших, степенях переохлаждения. Поэтому вторичная кристаллизация может быть диффузионной — связанной с перемещением атомов (малые степени переохлаждения) и бездиффузионной (большие степени переохлаждения).

Полиморфные превращения как при нагреве, так и при охлаждении имеют большое значение и оказываются очень важным фактором влияния на кристаллическую структуру, зернистость и свойства металлов и сплавов.

При перекристаллизации зародыши новых зерен возникают, как правило, на границах старых; число и скорость их роста зависят от скорости нагрева и величины перена-

грева, скорости охлаждения и переохлаждения. Это позволяет влиять на размеры зерен в металлах и сплавах.

Кристаллизация в сварочной ванне отличается от кристаллизации слитка в изложнице спецификой ее образования и охлаждения. Средняя температура в сварочной ванне при дуговых методах сварки стали составляет 1870... 2100 К. Наиболее высокая температура в ванне под дугой доходит примерно до 2600 К, однако продолжительность этой температуры крайне мала, поэтому полного растворения тугоплавких примесей не происходит. К началу кристаллизации в ванне из-за большого перегрева практически отсутствуют естественные центры кристаллизации. Затравками и центрами кристаллизации служат те многочисленные тугоплавкие включения, попавшие в ванну из электродного покрытия или флюса, соединений вольфрама, молибдена, титана, алюминия и др., а также не успевших раствориться карбидов. Наличие в ванне многочисленных включений, т. е. центров несопроизвольной кристаллизации, приводит к измельчению зерна при затвердевании.

Одновременно при сварке и наплавке жидкий металл в ванне соприкасается с оплавленными зернами основного металла, которые служат зародышевой основой для кристаллизации металла в сварочной ванне. На оплавленной поверхности зародышами кристаллизации могут стать также не успевшие раствориться и расплавиться карбиды тугоплавких элементов и неметаллические включения. Поэтому рост столбчатых кристаллов в жидкой сварочной ванне представляет собой пример кристаллизации на искусственных зародышах. Они растут от кромок и имеют вид дендритов разной величины.

При многослойной наплавке кристаллы каждого предыдущего слоя становятся основой для кристаллизации последующих слоев. Однако скорость охлаждения каждого из слоев обычно больше скорости охлаждения ванны при однослойной наплавке металла такой же толщины, поэтому кристаллическое строение отдельных слоев и шва в целом оказывается более мелким и плотным, с менее выраженной ликвацией примесей по зонам. Говоря о ликвации примесей, необходимо упомянуть еще об одном явлении — прерывности процесса кристаллизации и ликвации примесей по слоям кристаллизации. Было замечено, что рост кристаллов идет непрерывно с периодическими остановками. Явление это связывается с остановками процесса кристаллизации, вызванными тепловым эффектом (выделение

теплоты) при переходе из жидкого состояния в твердое и другими обстоятельствами. При таком прерывистом росте слоев кристаллизации сначала застывает наиболее чистый металл, а к концу слоя — металл с повышенным содержанием примесей.

Переход сплавов из жидкого состояния в твердое связан с возможностью образования кристаллизационных трещин, которые обнаруживаются как на отливках из различных металлов, так и на наплавке. Трещины в изделиях являются одним из наиболее опасных видов дефектов, их природе и методам борьбы с ними уделяется большое внимание.

Образование трещин вызвано двумя группами причин. Одна связана с предрасположенностью металла к образованию этого дефекта и характером кристаллизации, а другая — с возникновением в процессе кристаллизации и остывания напряжений и деформаций, способных разрушить металл на определенных ее стадиях.

Механизм образования трещин при кристаллизации сводится к следующему. При охлаждении жидкого сплава по достижении им температуры начала кристаллизации (ликвидуса с определенным переохлаждением) из него начинают выпадать кристаллы твердой фазы. По мере дальнейшего охлаждения объем, занимаемый кристаллитами, увеличивается, кристаллиты соединяются в каркас, заполненный оставшейся жидкостью. Как только образовался сплошной каркас, появилась опасность его разрушения возникающими при охлаждении усилиями усадки. Эта опасность разрушения усугубляется тем, что каркас твердого металла в условиях кристаллизации оказывается малопластичным, не способным деформироваться под действием усадочных сил.

Таким образом, температура возможного появления первых надрывов (трещин) при кристаллизации лежит несколько ниже температуры ликвидуса. Ее часто называют верхним интервалом эффективной температуры кристаллизации. Нижний интервал эффективной температуры кристаллизации ограничен линией температуры конца кристаллизации, т. е. солидуса, поскольку кристаллизация вообще заканчивается при этой температуре. Нижняя граница интервала хрупкости находится несколько ниже солидуса, поскольку горячие трещины могут образовываться в полностью закристаллизованном металле, который при высоких температурах остается малопластичным.

Горячие трещины являются межкристаллитными, раз-

рушение проходит по границам первичных зерен, ему способствует скопление в участках, затвердевающих последними, большого количества примесей. Степень такой межзеренной ликвационной неоднородности тем больше, чем медленнее охлаждается сплав. Ликвационная межзеренная неоднородность развивается в условиях кристаллизации в сварочной ванне. Степень такой неоднородности для различных случаев сварки и наплавки может меняться, поскольку она зависит от ряда технологических факторов: продолжительности пребывания металла шва в интервале температур кристаллизации; расстояний, на которые могут переместиться атомы разных элементов в твердой и жидкой фазах при соответствующих температурах, их взаимовлияния на скорости диффузии и пр.

Чем шире интервал температур кристаллизации сплавов и интервал концентраций, в котором происходит переход сплава из жидкого состояния в твердое, тем больше склонность сплава к образованию кристаллизационных трещин.

Горячие трещины могут быть не только кристаллизационные, они могут возникать межкристаллитно и несколько ниже температуры кристаллизации (низкое сопротивление разрушению приграничных участков, обогащенных примесями и имеющих повышенную концентрацию несовершенств), поэтому существуют явления, способные повлиять на склонность или сопротивляемость образованию таких трещин. Поскольку эти трещины, так же как и кристаллизационные, связаны со степенью ликвационной неоднородности, на склонность к их образованию должны также влиять обогащение границ зерен примесями и повышенная концентрация несовершенств кристаллического строения. Однако роль плотности несовершенств в приграничных участках зерен зависит от процессов, происходящих при температурах ниже солидуса.

Некоторого перераспределения ликвационных примесей можно добиться при подогреве наплавляемой детали до температуры порядка 700 К с последующим медленным охлаждением, что позволяет избежать трещин при наплавке. Благоприятное влияние на уменьшение образования горячих трещин оказывает процесс наплавки с последующей термической обработкой, при которой происходят аллотропические превращения с образованием новых зерен.

Образование различных по кристаллическому строению вторичных фаз с разными свойствами и удельным объемом

связано с протеканием диффузионных и сдвиговых процессов, а следовательно, с перемещением и перераспределением дислокаций в объеме металла, претерпевающего вторичную кристаллизацию. При этом границы первичных кристаллитов хотя и обогащены примесями, но сосредоточение несовершенств на них уже уменьшается.

Вторичная кристаллизация, связанная с полиморфным превращением, — благоприятный фактор для повышения стойкости против горячих трещин. Поэтому компоненты, имеющие полиморфное превращение и дающие диаграмму состояния с перекристаллизацией в твердом состоянии, способствуют повышению стойкости против образования горячих трещин. Положительное влияние таких компонентов тем больше, чем ближе температура начала полиморфного превращения к температуре солидуса.

Образование химических соединений при кристаллизации отрицательно влияет на склонность к образованию кристаллизационных и горячих трещин главным образом потому, что эти соединения хрупки и малопластичны, и не влияет, когда химическое соединение не является свободной фазой, а находится в виде твердого раствора. Это очень важно учитывать при выборе материалов для наплавки. У высокоуглеродистых проволок с содержанием углерода выше 0,5 % склонность к образованию трещин велика даже при применении предварительного подогрева перед наплавкой. Наличие в наплавочном материале специальных легирующих элементов позволяет повысить порог содержания углерода без увеличения склонности наплавки к образованию трещин.

### 1.3. Стрoение сплавов

Стрoение металлического сплава более сложное, чем чистого металла, и зависит главным образом от того, в какие взаимодействия вступают его компоненты.

Вещества, образующие сплав, в твердом состоянии не имеют химического взаимодействия между собой. Стрoение сплава является механической смесью отдельных частиц, зерен обоих компонентов.

Механические свойства смеси изменяются по линейному закону аддитивно, т. е. пропорционально (объемному или весовому) сложению свойств отдельных компонентов.

Вещества, вступающие в химическое взаимодействие, образуют химические соединения с кристаллической решеткой и упорядоченным расположением в ней атомов

компонентов. Такое соединение характеризуется определенной температурой плавления, скачкообразным изменением свойств при различном химическом составе, так называемой сингулярностью. Если химическое соединение образуется только металлическими элементами, то в узлах решеток располагаются положительно заряженные ионы, удерживаемые электронным газом, и возникает металлическая связь. Такая связь не является жесткой, поэтому при определенных условиях количество какого-либо элемента может быть большим или меньшим. Образование химических соединений из металлических атомов не подчиняется закону валентности.

При образовании химического соединения металла с неметаллом возникает ионная связь. В результате взаимодействия элементов в этом случае атом, металла отдает электроны (валентные) и становится положительным ионом, а атом металлоида принимает электроны на свою внешнюю оболочку и становится отрицательным ионом. В решетке химического соединения такого типа элементы удерживаются электростатическим притяжением. В этих соединениях связь жесткая, химический состав постоянный, и не может быть ни избытка, ни недостатка в атомах какого-либо из элементов.

В жидком состоянии большинство металлических сплавов, применяемых в технике, представляют собой однородные жидкости (жидкие растворы). При переходе в твердое состояние сохраняется их однородность и растворимость. Твердая фаза, образующаяся в результате кристаллизации такого сплава, называется твердым раствором.

Химический или спектральный анализ в твердых растворах показывает наличие двух элементов или более, тогда как, по данным металлографического анализа, такой сплав, как и чистый металл, имеет однородные зерна. Рентгеновский анализ обнаруживает в твердом растворе, как и у чистого металла, только один тип решетки.

В отличие от механической смеси твердый раствор является однофазным, состоит из одного вида кристаллов, имеет одну кристаллическую решетку; в отличие от химического соединения твердый раствор существует в определенном соотношении компонентов.

Строение твердых растворов на основе одного из компонентов сплава таково, что в решетку основного металла-растворителя входят атомы растворенного вещества, где возможно образование растворов замещения, т. е. частичной замены в кристаллической решетке атомов раствори-

теля атомами растворяемого компонента или образование растворов внедрения, при котором растворяемый элемент располагается в кристаллической решетке между атомами растворителя.

При образовании растворов внедрения и замещения атомы растворенного компонента распределяются в решетке растворителя беспорядочно. В твердых растворах замещения параметры решетки изменяются в зависимости от разности атомных диаметров растворенного элемента и растворителя. Если атом растворенного элемента больше атома растворителя, то элементарная ячейка решетки увеличивается, если меньше, то сокращается. При образовании твердых растворов внедрения параметры решетки увеличиваются, так как размеры атомов (вернее, ионов) растворенного элемента больше размеров тех межатомных промежутков, в которых они располагаются, так что атомы решетки растворителя несколько раздвигаются.

Твердые растворы замещения могут быть ограниченные и неограниченные. Неограниченное растворение компонентов друг в друге возможно, если оба металла имеют одинаковую кристаллическую структуру, т. е. являются изоморфными.

Если у двух металлов с одинаковыми кристаллическими решетками сильно различаются атомные радиусы, то образование твердых растворов между этими металлами сильно искажает кристаллическую решетку, что приводит к накоплению в ней упругой энергии. Когда это искажение достигает определенной величины, кристаллическая решетка становится неустойчивой и наступает предел растворимости.

Сплавление металлов, принадлежащих к далеко расположенным друг от друга группам периодической системы и имеющих различную физическую природу, приводит к образованию химических соединений, а не твердых растворов. Способность к образованию твердых растворов присуща не только чистым элементам, но и химическим соединениям. В этих случаях сохраняется решетка химического соединения, но избыточное количество атомов получается путем их замены в соединении.

Образование твердых растворов на базе химических соединений может сопровождаться не только заменой одних атомов в узлах кристаллической решетки другими, но и тем, что отдельные узлы оказываются пустыми, образуются растворы вычитания.



## 1.4. Диаграмма состояния

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение устойчивого состояния сплава при данных внешних условиях, обладающих минимумом внешней энергии и отражающих равновесные условия существования сплава. В связи с тем что превращения без переохлаждения или перенагрева происходить не могут, то диаграмма состояния представляет собой теоретический предельный случай.

Диаграмму состояния системы из двух компонентов обычно представляют в виде системы координат «температура — концентрация» одного из компонентов. Каждая точка на этой диаграмме показывает состояние сплава данной концентрации при соответствующей температуре. Каждая вертикаль соответствует изменению температуры определенного сплава. Изменение фазового состояния сплава отмечается на диаграмме точкой. Линии, соединяющие точки аналогичных превращений, разграничивают на диаграмме их области фазовых состояний. Вид диаграммы состояния зависит от того, растворимы ли оба компонента в твердом и жидком состоянии, образуют ли они химические соединения.

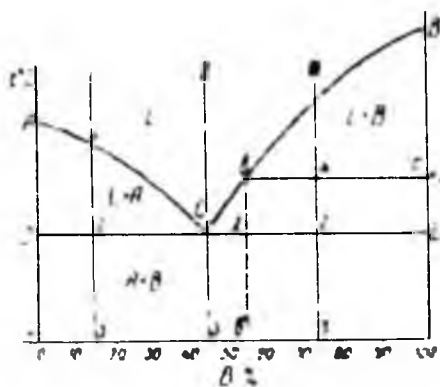


Рис. 1. Диаграмма состояния I рода с неограниченной растворимостью в жидком состоянии.

Существует четыре основных типа диаграмм состояния. Диаграмме I рода (рис. 1) соответствует неограниченное взаимное растворение в жидком состоянии и нерастворимость в твердом. Неограниченное взаимное растворение компонентов в жидком и твердом состоянии, без образования химических соединений дает диаграмму II рода (рис. 2). Если компоненты не образуют химического соединения и ограничено растворимы в твердом состоянии, то им соответствует диаграмма III (рис. 3). Диаграмма IV рода характе-

ризует состояние сплавов, образующих химическое соединение (рис. 4).

На вид диаграмм I...IV родов накладываются различные особенности свойств компонентов. В диаграммах, где компонентами являются железо, олово, кобальт, марганец, титан, цирконий и некоторые другие элементы, вторичная кристаллизация наблюдается за счет аллотропных (полиморфных) превращений этих компонентов, что усложняет вид диаграмм. В таких сплавах превращение может протекать аналогично кристаллизации эвтектики, но не из жидкости, а из твердого раствора. Такое превращение называется эвтектоидным, а смесь полученных кристаллов — эвтектоидом.

При наплавке и сварке важно учитывать тип диаграмм наплавляемого и основного материалов. Так, образование эвтектики из этих материалов дает постепенное изменение свойств зоны сплавления, что благоприятнее для работоспособности соединения, чем скачкообразное, имеющее место при образовании в сплавах химических соединений.

Рассмотрим механизм образования постепенного изменения фазового состава зоны соединения при наплавке и сварке на примере сварки плавлением двух материалов, имеющих диаграмму I рода. В жидкой сварочной ванне

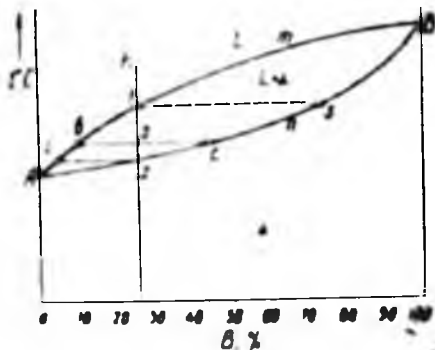


Рис. 2. Диаграмма состояния II рода с неограниченным взаимным растворением в твердом и жидком состоянии.

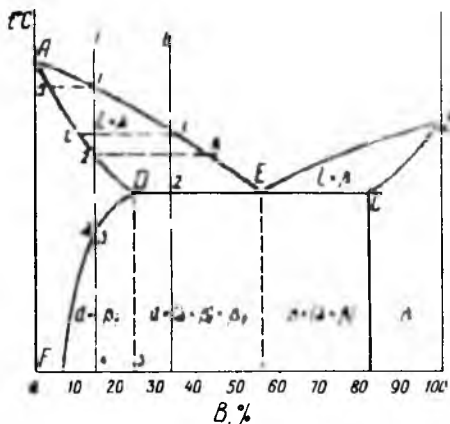


Рис. 3. Диаграмма состояния III рода с эвтектикой.

1019438

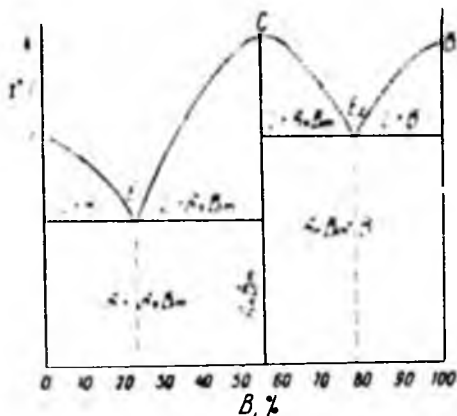


Рис. 4. Диаграмма состояния IV рода с устойчивым химическим соединением.

находится равномерный твердый раствор компонентов (металлов) *A* и *B*, однако непрерывное контактирование жидкого раствора на одной кромке с компонентом *A* вблизи нее делает расплав обогащенным компонентом *A* и у другой кромки — компонентом *B*. Поэтому кристаллизация металла у кромок соответствует сечениям I у кромки *A* и III у кромки *B* (рис. 1). При охлаждении сплава III до температуры ликвидуса начнется выпадение кристаллов металла *B*, продолжающееся до температуры солидуса. При этой температуре (точка 2) остаток жидкого расплава закристаллизуется в равномерную механическую смесь кристаллов *A* и *B* (эвтектику), имеющую состав, соответствующий проекции точки *C* на ось концентраций. Аналогично произойдет кристаллизация сплавов у кромки металла *A* с той разницей, что первыми начнут выпадать кристаллы чистого металла *A*.

При сварке плавлением микроструктура и фазовое состояние металла будут постепенно переходить от кристаллов одного металла с малым количеством эвтектики к кристаллам другого также с малым ее количеством. Между этими зонами количество эвтектики постепенно увеличивается, и где-то в промежуточных участках должна быть чисто эвтектическая зона. Поскольку в участках сварного шва, примыкающих к кромкам каждого из свариваемых металлов, кристаллизуется металл с подавляющим количеством его кристаллов, обеспечиваются хорошие условия для сплавления основного металла и металла шва, а постепенное (не скачкообразное) изменение структуры и фазового состояния в пределах металла шва обеспечивают плавный переход свойств одного металла к свойствам другого.

При данном типе диаграммы хорошее сплавление ме-

галла шва с основными свариваемыми металлами обуславливается тем, что на кромках каждого из них надстраиваются из расплава зерна того же металла, что соответствует атомно-кристаллическому строению и созданию надлежащей связи. Такое соединение имеет положительное значение в обеспечении механических свойств восстанавливаемых деталей.

Образование химической неоднородности в таком сварном соединении неизбежно в связи с разной химической природой металлов *A* и *B*. Разница в составе соседних участков (градиент химической неоднородности) тем больше, чем больше величина концентрационного интервала между эвтектической точкой *C* и чистыми металлами (отрезки *CD* и *CE*).

Для металлов, образующих эвтектические смеси, но имеющих взаимную ограниченную растворимость, механизм образования сварного соединения заметно изменяется (рис. 3). При сварке плавлением в сварочной ванне из жидкого расплава на кромках свариваемых металлов кристаллизуются не чистые металлы, а твердые растворы на их основе. На кромке свариваемого металла *A* будут кристаллизоваться кристаллы твердого раствора  $\alpha$ , а на кромках металла *B* — кристаллы раствора  $\beta$ .

По мере удаления от кромок появляется и увеличивается количество эвтектики ( $\alpha + \beta$ ) вплоть до чисто эвтектической зоны где-то в промежуточной области. Однако на стороне кристаллов  $\alpha$  могут встречаться отдельные зерна  $\alpha$ -раствора с выделениями вторичной фазы  $\beta_{II}$ . Такие кристаллы в определенных условиях обладают повышенными хрупкостью и твердостью. Эти условия — быстрое охлаждение и старение или быстрое охлаждение и небольшой нагрев, облегчающий выделение вторичной фазы. Для металлов с рассматриваемым типом диаграммы состояния характерно также появление диффузионных зон на границе соединения. Образование таких диффузионных зон связано с тем, что в металл *A* в соответствии с наличием определенной растворимости проникает (диффундирует) некоторое количество атомов *B* либо из раствора  $\alpha$  при сварке плавлением, либо непосредственно из металла *B* при сварке давлением в твердом состоянии. Точно так же в металл *B* будет диффундировать некоторое количество атомов *A*. Одновременно может происходить и перемещение других атомов в обратном направлении. Наличие таких зон взаимодиффузии улучшает связь в сварном соединении, так как изменение свойств при этом более плавное.

Выше уже упоминалось о диффузии при формировании зоны сплавления двух разнородных материалов. Рассмотрим ее подробнее не только в процессе образования зоны сплавления, но и в процессе термической обработки.

Диффузия в металлах и сплавах — это элементарные процессы перемещения атомов кристаллического вещества на расстояние больше параметра кристаллической решетки. Наиболее вероятный механизм диффузии связан с перемещением атомов по незанятым узловым положениям (вакансиям) или по междуузлиям. Суммирование таких элементарных процессов перемещения определяет массоперенос. Основным параметр диффузии — скорость переноса массы перемещающегося элемента (перемещение данного элемента через единицу площади сечения за единицу времени). Если массоперенос направленный и приводит к местным изменениям концентрации перемещающихся атомов элемента, растворенного в растворителе, процесс называют гетеродиффузией, если имеет место перемещение атомов металла основного компонента без изменения концентрации — процесс называют самодиффузией.

Фазовые и структурные превращения при нагреве и охлаждении, получение того или иного структурного состояния металла связаны с протеканием диффузионных процессов. Даже образование при закалке мартенсита, считающегося бездиффузионным превращением, зависит от однородности твердого раствора перед закалкой, определяемого диффузией растворенных элементов.

Положительное влияние на процессы диффузии оказывают различные виды наплавки и сварки. При сплавлении они влияют на степень химической и механической неоднородности металла шва и сварного соединения. Особенно большое значение процессы гетеродиффузии (многокомпонентной диффузии) имеют для формирования сварных соединений разнородных сталей и металлов, так как обычные закономерности диффузионного процесса осложняются специфическими условиями диффузии — реакционной и диффузией, вызванной влиянием состава на изменение термодинамической активности растворенного и диффундирующего веществ.

Для состояния и свойств наплавки и сварных соединений, прежде всего сталей, имеет значение диффузионное перемещение углерода, водорода, серы, фосфора, железа, марганца, хрома, молибдена, ванадия, алюминия и некоторых других элементов. Диффузия этих элементов определяет степень химической и механической неоднородно-

сти зоны сплавления, протекание процессов рекристаллизации, изменение свойств при термообработке и т. п.

Наибольшей подвижностью обладают атомы серы, что создает предпосылки для устранения при нагреве ликвиции по сере. Наиболее трудно устраняется химическая неоднородность по хрому и вольфраму. Диффузия углерода и легирующих элементов в  $\alpha$  и  $\gamma$ -Fe идет с различной скоростью. В  $\alpha$ -Fe энергия активации диффузии меньше, а скорость диффузии больше.

Повышенная скорость диффузии в  $\alpha$ -Fe создает предпосылки для активного протекания процессов при температурах нагрева ниже  $A_1$ , что может иметь место при эксплуатации сварных соединений теплоэнергетического оборудования, а также при термообработке сварных соединений в режиме высокого отпуска.

Для сварных соединений и наплавки важно, что по границам зерен диффузионные процессы идут активнее, чем по телу зерна. Это связано с большей плотностью несовершенств кристаллического строения по границам зерен. Сосредоточение за счет этого различного рода примесей и, прежде всего, углерода, водорода и серы определяет возможность значительного изменения свойств этих зон и их поведения при деформации и разрушении. Состояние границ зерен для сварных соединений имеет большее значение, чем для свариваемого металла в связи с наличием крупных литых кристаллитов в металле шва и выросшего зерна в околошовной зоне.

Поскольку процесс диффузии связан с энергетическими характеристиками взаимодействия диффундирующего атома с решеткой растворителя, большое влияние на процесс оказывает температура и состояние решетки растворителя (наличие в ней однородных атомов — атомов легирующих элементов). Таким образом, скорость диффузии какого-либо элемента в легированной стали зависит от характера и степени ее легирования. Имеет значение и концентрация атомов диффундирующего элемента.

В связи с тем что для увеличения твердости наплавленного слоя в настоящее время большое распространение получило легирование наплавленного слоя углеродом, рассмотрим процесс диффузии в такой системе более подробно. Процесс диффузии углерода в таких соединениях зависит от легирования как наплавленного материала, так и материала основы. Легирующие элементы по-разному влияют на изменение активности углерода для различных фаз стали. Неоднозначное влияние при неправильном под-

При легировании наплавки может привести к тому, что на границе сплавления образуется скачок концентрации углерода, сопровождающийся сильным искажением кристаллической решетки в этой зоне.

Диффузия водорода в железе велика в связи с тем, что он имеет наименьший атомный размер и способен быстрее всех других элементов проникать и перемещаться в его кристаллической решетке.

## 1.5. Диаграмма состояния железо-углерод

Железо и сплавы на его основе являются основным конструкционным материалом. Технически чистое железо содержит не более 0,2 % примесей и производится в мартеновских печах. Более чистое железо, содержащее не более 0,1 % примесей, получают прямым восстановлением или зонной многократной переплавкой. Температура плавления железа 1812 К ( $\pm 5$ ). В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях —  $\alpha$ -объемно-центрированной кубической (о. к. ц.) и  $\gamma$ -гранецентрированной кубической (г. к. ц.).

Железо с углеродом образуют раствор внедрения. Растворимость углерода в железе зависит от того, в какой кристаллической форме существует железо. Растворимость углерода в  $\alpha$ -железе ничтожно мала (менее 0,02 %) и в сто раз больше (до 2 %) в  $\gamma$ -железе. Растворимость углерода в  $\alpha$ -железе обусловлена тем, что в реальной решетке железа имеются дефекты, особенно многочисленные по границам зерен.

Твердый раствор углерода и других элементов в  $\alpha$ -железе называется ферритом, а в  $\gamma$ -железе — аустенитом.

Феррит представляет собой мягкую пластичную фазу, магнитную при температуре ниже 1041 К. Твердость 80 ÷ 100 НВ.

Аустенит немагнитен. Кристаллическая решетка г. к. ц. Твердость 170 ÷ 200 НВ. Кроме этих твердых растворов в сплаве железа с углеродом может быть цементит, свободный графит, перлит, сорбит, троостит, бейнит, мартенсит и ледебурит.

Цементит — это химическое соединение углерода с железом (карбид железа). Так как растворимость углерода в  $\alpha$ -железе мала, то при нормальных температурах в большинстве случаев в структуру стали входят высокоуглеродистые фазы в виде цементита или другого карбида. Массовая доля углерода в цементите 6,67 %. Он магнитен

при температуре ниже 490 К и имеет сложную ромбическую кристаллическую решетку. Твердость до 700 НВ.

Графит является одной из разновидностей чистого углерода с гексагональной кристаллической решеткой.

Перлит — механическая смесь частиц цементита и феррита, образующегося при распаде аустенита. Имеет форму или чередующихся пластинок феррита и цементита (пластинчатый) или зерен цементита в ферритовой матрице (зернистый). Твердость порядка  $160 \div 200$  НВ. Магнитен.

Сорбит — механическая смесь феррита и цементита, отличающаяся от перлита более тонким строением (высокой дисперсностью). Магнитен. Образуется в процессе ускоренного охлаждения при распаде аустенита в интервале температур 873...973 К (сорбит закалки) или при отпуске мартенсита (сорбит отпуска). Твердость  $270 \div 320$  НВ.

Троостит — механическая смесь феррита и цементита, отличающаяся от сорбита еще более высокой степенью дисперсности. Образуется в процессе ускоренного охлаждения при распаде аустенита в интервале температур 673...873 К (троостит закалки), а также при отпуске мартенсита (троостит отпуска). Твердость  $330 \div 450$  НВ. Магнитен.

Бейнит — механическая смесь пересыщенного углеродом  $\alpha$ -раствора и карбидов. Образуется в результате распада аустенита в условиях интенсивного переохлаждения, обычно при верхней температуре в зоне промежуточных превращений, а нижний бейнит образуется при температурах, близких к мартенситным превращениям (Мн). Магнитен. Твердость  $400 \div 500$  НВ.

Мартенсит — пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе, образующийся из аустенита в результате бездиффузного превращения (перестройки кристаллической решетки  $\gamma$  железа без изменения массовой доли углерода при температуре ниже  $M_n$  (473...523 К). Кристаллическая решетка о. к. ц. Микроструктура игольчатого типа со взаимной ориентацией игл 60 градусов. Твердость 500—700 НВ. Магнитен.

Ледебурит — механическая смесь аустенита и цементита (эвтектика) образуется при температуре 1420 К (линия *ECF*). Массовая доля углерода 4,3 %. Отличается большой твердостью (более 700 НВ) и хрупкостью.

Диаграмма состояния железо-углерод в интервале концентраций от железа до цементита представлена на рис. 5. Ось абсцисс (концентрационная) на этом рисунке двойная: содержание углерода и содержание цементита.

Линия *ABCD* — линия ликвидуса. Показывает зависи-





мость температуры начала затвердевания или полного расплавления сплава от содержания углерода. Линия *AIII<sub>1</sub>ECF* — линия солидуса. Показывает температуру полного затвердевания или начала плавления. Линия образования аустенита — *ECF*. Показывает температуру полного затвердевания или начало плавления чугунов. Линия образования ледебурита *GOS* показывает температуру начала распада аустенита с образованием феррита при охлаждении. При нагреве эта линия показывает температуру получения однородного аустенита.

Линия *SE* показывает температуру начала распада аустенита с образованием цементита при охлаждении. При нагревании получается однородный аустенит.

Линия *PSK* показывает температуру окончательного распада аустенита с образованием перлита при охлаждении. При нагревании начинается образование аустенита.

Линия *GP* показывает температуру окончательного превращения аустенита в феррит при малом содержании углерода в сплаве.

Линия *PQ* показывает температуру начала выделения из феррита частиц третичного цементита.

Точка *C* показывает эвтектическую температуру. Массовая доля углерода в жидкой фазе составляет 4,3 %.

Точка *E* соответствует 2,14 % предельной массовой доли углерода в аустените.

Сплавы, содержащие не более 2,14 % углерода, называют сталями. При содержании углерода в сталях до 0,8 % последние называются доэвтектоидными, более 0,8 % — заэвтектоидными, а 0,8 % — эвтектоидными.

## 1.6. Основы термической обработки

Цель процесса термической обработки состоит в том, чтобы нагревом до определенной температуры и последующим охлаждением вызвать желаемое изменение строения металла. Основные факторы воздействия при термической обработке — температура и время.

Режим термической обработки характеризуют следующие основные параметры: температура нагрева (максимальная температура, до которой был нагрет сплав при термической обработке); время выдержки сплава при температуре нагрева, скорость нагрева и скорость охлаждения.

Превращения, происходящие в сталях и чугунах при изменении температуры, происходят в соответствии с диаграммой состояния. Температура, при которой начинается

то или иное превращение, называется критической, а точка на диаграмме, соответствующая ей, — критической точкой. Критические точки обозначаются буквой *A*.

Нижняя критическая точка, обозначаемая  $A_1$ , лежит на линии *PSK*. Верхняя критическая точка  $A_3$  лежит на линии *GSE*.

Чтобы отличить критическую точку при нагреве от критической точки при охлаждении, рядом с буквой *A* ставят букву *c* в первом случае и *r* — во втором.

Следовательно, критическая точка превращения аустенита в перлит обозначается  $Ar_1$ , а перлита в аустенит  $Ac_1$ ; начало выделения феррита из аустенита обозначается  $Ar_3$ , конец растворения феррита в аустените  $Ac_3$ . Начало выделения вторичного цементита из аустенита обозначается также  $Ar_3$ , а конец растворения вторичного цементита в аустените —  $Ac_3$  (эту точку часто обозначают  $Ac_m$ ).

В зависимости от соотношений параметров термической обработки в стали реализуются следующие основные превращения: перлита в аустенит, происходящее при нагреве выше точки  $Ac_1$ , аустенита в перлит, происходящее при медленном охлаждении из  $\gamma$ -области диаграммы состояния; аустенита в мартенсит при быстром охлаждении из  $\gamma$ -области диаграммы состояния; нагрев мартенсита приводит к образованию ферритно-карбидной смеси и ее состав сильно зависит от температуры нагрева.

При нагреве до температуры выше 373 К из мартенсита начинает выделяться углерод в виде метастабильного карбида состава, близкого к  $Fe_2C$ . Эти выделения имеют чрезвычайно дисперсную структуру в форме тонких пластинок, которые на этой стадии ориентированы по структуре мартенсита. Такой мартенсит называется отпускным, или кубическим. Кстати, подобная структура может образоваться и при распаде остаточного аустенита, нагретого до температуры 3473 К, и называется бейнитом. Дальнейшее повышение температуры приводит к тому, что метастабильные карбиды обособляются, изменяют форму, теряют прежнюю ориентацию и превращаются в цементит. Ферритно-цементитную смесь, образовавшуюся в результате нагрева мартенсита до температуры 723...923 К, называют еще сорбитом отпуска.

Нагрев и выдержка при температурах, близких к 1000 К, вызывают дальнейший рост карбидов; образуется структура, состоящая из феррита и глобулярных карбидов, называемая зернистым перлитом. Она может образоваться и при изотермическом распаде аустенита вследствие дли-

тельной выдержки при температурах несколько ниже 1000 К или вследствие очень медленного непрерывного охлаждения его. В стали с повышенным содержанием легирующих карбидообразующих элементов (прежде всего ванадия, хрома, вольфрама и молибдена) при температурах выше 623 К выделяются мелкодисперсные субмикроскопические карбиды, которые повышают ее твердость.

По сравнению с перлитом карбиды в бейните имеют меньшие размеры и меньшее межчастичное расстояние. Они начинают коагулировать при нагреве до более низких температур. Возникает сорбитная структура, в которой феррит сохраняет форму исходных игл бейнита. По мере повышения температуры и увеличения времени выдержки карбиды увеличиваются, а феррит теряет игольчатую форму. При температурах, близких к 1000 К, быстро образуется зернистый перлит.

В превращениях стали кроме температурного фактора важную роль играет время выдержки при высокой температуре. Для описания этой связи служит диаграмма изотермического образования аустенита (рис. 6). Кривая 1 показывает начало, а кривая 2 — конец превращения перлита в аустенит; кривая 3 является границей полного растворения карбидов, кривая 4 — гомогенизации аустенита.

Процесс превращения перлита в аустенит резко ускоряется при повышении температуры. Это связано с ускорением диффузионных процессов и с увеличением градиента концентрации в аустените.

Скорость превращения ферритно-цементитной структуры в аустенитную, помимо температуры нагрева, зависит и от ее исходного состояния. Чем тоньше ферритно-цементитная структура, тем больше возникает зародышей аустенита и короче пути диффузии — быстрее

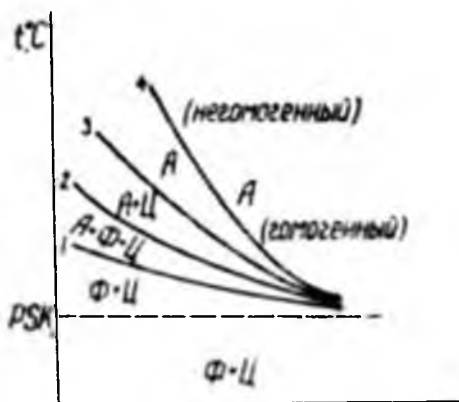


Рис. 6. Диаграмма изотермического образования аустенита.

протекает процесс аустенизации. Повышенное содержание углерода в стали (увеличение суммарной поверхности раздела феррита и цементита) приводит к ускорению образования аустенита.

Введение в сталь карбидообразующих элементов (хрома, вольфрама, молибдена, ванадия и т. п.) задерживает процесс аустенизации вследствие образования легированного цементита или карбидов легирующих элементов, более трудно растворимых в аустените. Соответственно больше времени требуется для гомогенизации аустенита.

Следует отметить, что при температурах выше  $A_{c3}$  мелкие зерна аустенита начинают соединяться между собой и их размер увеличивается. Рост зерна наблюдается также и при увеличении выдержки при нагреве. Склонность к укрупнению зерна для разных сталей различна. В свою очередь увеличение зерна приводит к снижению механических свойств материала. Путем термической обработки можно изменять величину зерна.

Подобные превращения, но только осложненные процессом графитизации, наблюдаются при термической обработке чугуна. Процесс графитизации для чугуна является основополагающим и в конечном счете определяет последующие его свойства. С увеличением скорости охлаждения в чугуне увеличивается доля цементита, а с уменьшением — графита. В первом случае происходит процесс отбеливания чугуна.

На процесс графитизации большое влияние оказывает время выдержки чугуна при высокой температуре (рис. 7).

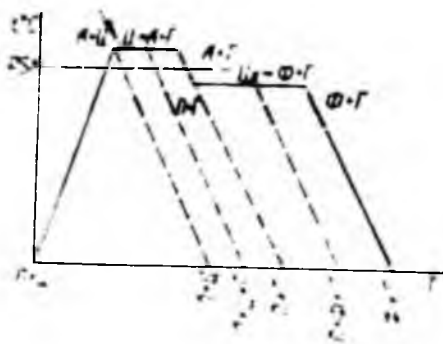


Рис. 7. Схема образования структур при графитизации.

За исходное состояние примем белый чугун. В результате нагрева белого чугуна выше линии  $PSK$  происходит графитизация избыточного нерастворимого цементита. При достаточно длительной выдержке процесс графитизации заканчивается образованием аустенита плюс графита, а после медленного охлаждения эта структура состоит из перлита плюс графит. Недоста-

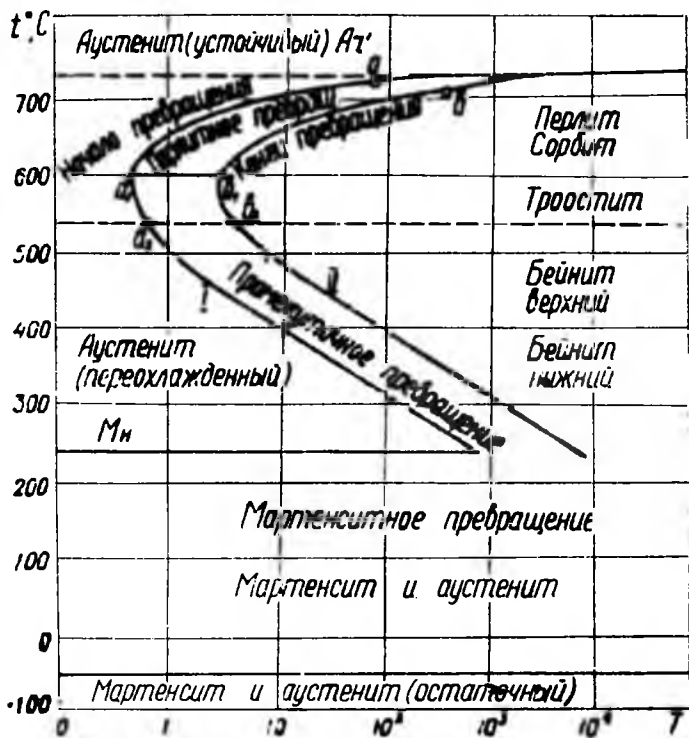


Рис. 8. Диаграмма изотермического превращения стали.

точная выдержка при высокой температуре с последующим медленным охлаждением приводит к образованию структуры из перлита плюс графит плюс цементит.

При переходе через критическую точку (линия  $PSK$ ) аустенит превращается в перлит и выдержка при температурах, близких, но ниже критической точки, может привести к распаду цементита перлита (вторичная стадия графитизации). При полностью завершеном процессе весь цементит перлита разложится, образуя ферритно-графитную структуру, а при частичном превращении образуется структура перлит плюс феррит плюс графит.

В результате нагрева сталь получает структуру аустенита. Поэтому основные ее превращения при охлаждении связаны с превращением аустенита, которое при постоянной температуре отражается в виде диаграммы изотермического превращения (рис. 8). Изотермическое превраще-

ние аустенита происходит в интервале температур  $A_{c1}$  до  $M_n$ . На диаграмме нанесены две С-образные кривые, где кривая I показывает начало, кривая II — конец превращения переохлажденного аустенита. Период времени до начала его превращения называют инкубационным.

При 973 К превращение аустенита начинается в точке  $a$ , заканчивается в точке  $b$  и образуется перлит.

При 923 К превращение аустенита происходит от  $a_1$  до  $b_1$  с образованием сорбита.

Устойчивость аустенита сильно зависит от степени переохлаждения. Наименьшей устойчивостью он обладает при температурах, близких к 823 К (например, для эвтектоидной стали время устойчивости составляет около 1 с). По мере увеличения и уменьшения температуры устойчивость возрастает. Время устойчивости при 973 К составляет 10 с, а при 573 К — около 1 мин.

При охлаждении стали до 823 К превращение аустенита происходит от  $a_2$  до  $b_2$  с образованием троостита, который от перлита и сорбита отличается высокой степенью дисперсности, толщиной пластинок порядка 0,1 мкм.

Ниже температуры 823 К происходит образование структуры бейнита, состоящей из смеси пересыщенного углеродом феррита и цементита. Различают верхний бейнит, образующийся при 723...623 К и нижний бейнит, образующийся при 623...523 К. Верхний бейнит имеет перистое строение, а нижний — пластинчатое и игольчатое. Верхний бейнит стали имеет пониженную прочность и невысокую пластичность, твердость HRC 43...46. Нижний бейнит стали имеет более высокую прочность и пластичность, твердость HRC 52...55.

Мартенситное превращение протекает при непрерывном охлаждении аустенита ниже точки  $M_n$ . По достижении определенной температуры превращение аустенита в мартенсит заканчивается. Температура прекращения мартенситного превращения обозначается  $M_k$ . Положение температур  $M_n$  и  $M_k$  определяется химическим составом стали. Так, легирующие элементы Al и Co повышают температуру  $M_n$ , а Ni, Cu, Mn, Cr, Mo, W, V понижают. Из всех структур мартенсит имеет самую высокую твердостьряду со значительной хрупкостью.

У большинства сталей  $M_k$  ниже комнатной, поэтому при охлаждении до комнатной температуры превращение аустенита не заканчивается и его называют остаточным аустенитом. Особенно много остаточного аустенита содержится в закаленных высоколегированных сталях.

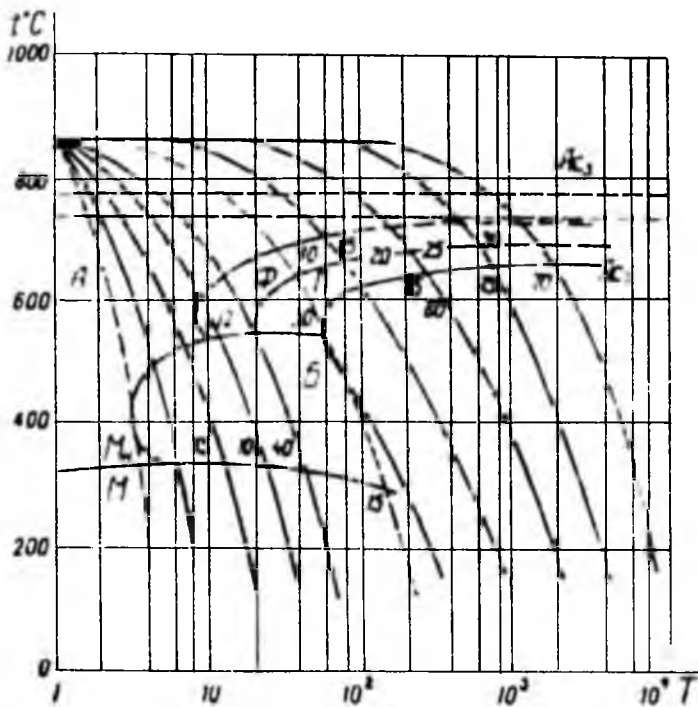


Рис. 9. Термокинетическая диаграмма распада аустенита при непрерывном охлаждении стали.

В производственных условиях невозможно обеспечить во всем объеме термически обрабатываемого изделия высокую скорость охлаждения до температуры изотермической выдержки, которая достигается при построении диаграмм изотермического распада аустенита. Кроме того, большая часть видов термической обработки предусматривает непрерывное охлаждение, поэтому в практике термической обработки большое значение имеют термокинетические диаграммы распада аустенита. Эти диаграммы строят в тех же координатах, что и изотермические; на них нанесены точки начала и конца превращения при различных скоростях охлаждения, а также окончательная структура и результирующая твердость при данной скорости охлаждения (рис. 9).

По термокинетической диаграмме превращения аустенита для конкретной стали можно установить минимальную скорость, при которой возможно образование только,



мартенситной структуры. Эта скорость называется верхней критической скоростью охлаждения (штриховая линия на рис. 9). Минимальная скорость охлаждения, при которой прекращается образование мартенсита, называется нижней кинетической скоростью охлаждения (пунктирная линия на рис. 9). Цифры на диаграмме характеризуют долю образовавшейся структуры в процентах. Аналогично диаграммам изотермического распада аустенита положение и форма термокинетических диаграмм зависят от уровня температуры аустенизации, величины зерна (чем выше температура и крупнее зерно, тем больше кривые смещены вправо и вниз) и содержания легирующих элементов.

### 1.7. Виды термической обработки

Основными видами термической обработки являются отжиг, нормализация, закалка, отпуск, химико-термическая обработка.

Отжиг — фазовая перекристаллизация, заключающаяся в нагреве выше  $A_{c3}$  на  $20...40^\circ$  с последующим медленным охлаждением. При нагреве выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$  полная перекристаллизация не произойдет; такая термическая обработка называется неполным отжигом. При отжиге состояние стали приближается к структурно равновесному; структура стали после отжига: перлит плюс феррит, перлит или перлит плюс цементит.

Скорость нагрева стали при отжиге порядка 100 град/ч, продолжительность выдержки 30...60 мин на 1 т нагреваемого металла. Углеродистые стали охлаждают со скоростью 150...200 град/ч, легированные стали — 10...100 град/ч.

Для увеличения пластичности и улучшения механической обрабатываемости эвтектоидные и заэвтектоидные стали подвергаются отжигу на зернистый перлит (сфероидизацию). С целью ускорения сфероидизации нагрев до 1013...1033 К и охлаждение до 953...973 К повторяют несколько раз.

С целью снижения остаточных напряжений, понижения твердости, обеспечения однородности структуры доэвтектоидной стали, а также сокращения времени отжига производят ее изотермический отжиг по следующему режиму: нагрев до температуры выше  $A_{c3}$ , затем ускоренное охлаждение до температуры на 50...100 ниже точки  $A_{c1}$ , при этой температуре дается изотермическая выдержка для перлит-

ного превращения и охлаждение на воздухе. Заэвтектоидные стали также могут подвергаться изотермическому отжигу, но их нагрев производится выше  $A_{c1}$ .

Отжиг чугуна применяют чаще всего для разложения цементита с образованием свободного графита. Форма графита зависит как от исходного состояния чугуна, так и от температуры отжига. График режима отжига чугуна приведен на рис. 10.

Нормализация — промежуточная термическая операция между отжигом и закалкой. При ней нагрев производят на  $30...50^\circ$  выше  $A_{c3}$  (для заэвтектоидных сталей нагрев выше  $A_{cm}$ ) и охлаждают на воздухе с получением тонкопластинчатой перлитной структуры. Нормализация устраняет внутренние напряжения и наклеп, повышает механические свойства и подготавливает структуру для окончательной термической обработки. Для низкоуглеродистых сталей ее можно применять вместо отжига. Для среднеуглеродистых сталей нормализация может заменить закалку с высоким отпуском. Для заэвтектоидной стали нормализация применяется для устранения цементитной сетки.

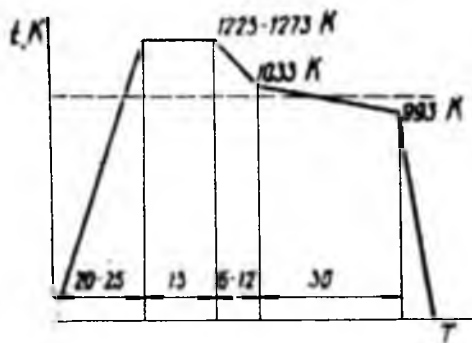


Рис. 10. График режима отжига белого чугуна для получения ковкого чугуна.

Закалка — нагрев выше критической точки  $A_{c3}$  с последующим быстрым охлаждением. При медленном охлаждении аустенит распадается на феррит плюс цементит при  $A_{r1}$ . С увеличением скорости охлаждения превращение происходит при более низких температурах. Ферритно-цементитная смесь по мере снижения  $A_{r1}$  становится все более мелкодисперсной и твердой. Если же скорость охлаждения была так велика и переохлаждение было так значительно, что выделение цементита и феррита не произошло, то и распада твердого раствора не происходит, и аустенит ( $\gamma$ -твердый раствор) превращается в мартенсит (пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе). Неполная закалка — термическая операция, при которой нагрев про-

водят до температуры, лежащей выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$  и в структуре стали сохраняется доэвтектоидный феррит (заэвтектоидный цементит).

Доэвтектоидные стали при закалке нагревают до температуры на  $30...50^\circ$  выше температуры верхней критической точки  $A_{c3}$ . Заэвтектоидные стали нагревают до температуры на  $30...50^\circ$  выше нижней критической точки  $A_{c1}$ , т. е. до температуры  $1033...1063$  К.

Быстрорежущие, нержавеющие и другие специальные высоколегированные стали закаливаются с более высоких температур нагрева, чем углеродистые и низколегированные. Высокая температура нагрева под закалку в этом случае необходима для растворения избыточных карбидов ( $Cr$ ,  $W$ ,  $V$  и т. п.), чтобы получить легированный аустенит.

При закалке возникают внутренние напряжения, которые по величине могут быть настолько большими, что приводят к трещинам и разрушению деталей без всякого дополнительного воздействия. Коробление деталей после закалки — это также результат проявления внутренних напряжений. Они могут вызываться объемным изменением металла при неравномерном распределении температуры. Такие напряжения называются термическими, или напряжениями 1-го рода. Напряжения 2-го рода вызываются структурными изменениями при закалке, так как мартенсит имеет максимальный объем, а аустенит — минимальный. Напряжения, возникающие в атомной решетке за счет внедрения легирующих атомов (углерода, бора и т. п.) или возникновения дислокации, называют напряжениями 3-го рода, или межатомными.

С целью устранения внутренних напряжений после закалки применяют операцию отпуска. Низкотемпературный (низкий) отпуск проводят с нагревом до  $423...473$  К. Он снижает внутренние напряжения при сохранении высокой твердости (HRC 58...63). Этот вид отпуска применяют в основном для инструмента из углеродистых и низколегированных сталей, деталей, подвергаемых поверхностной закалке, цементации и нитроцементации, к которым предъявляются высокие требования по твердости и износостойкости.

Среднетемпературный (средний) отпуск проводят при температуре  $623...773$  К для получения структуры троостита. Твердость закаленной стали снижается до HRC 40...50. Предел упругости достигает максимального значения. Средний отпуск в основном применяется для пружин и рессор.

Высокотемпературный (высокий) отпуск, или улучшение, проводят при температуре 823...953 К. Твердость закаленной стали снижается до 250...350 НВ, прочность снижается в 1,5...2 раза, пластичность и вязкость увеличиваются в несколько раз, внутренние напряжения снимаются полностью.

Химико-термическая обработка заключается в диффузионном насыщении при повышенных температурах поверхностного слоя изделий различными элементами с целью направленного изменения его химического состава, что позволяет повысить механические свойства деталей. Насыщение достигается в результате взаимодействия поверхности изделий с химически активной средой, содержащей вводимый элемент. Процесс насыщения включает три элементарных стадии: выделение диффундирующего элемента в атомарном состоянии благодаря реакциям, протекающим во внешней среде; контактирование атомов диффундирующего элемента с поверхностью изделий и проникновение (растворение) их в решетку железа (абсорбция); диффузия атомов насыщающего элемента в глубь металла.

Скорость этой диффузии в решетку железа неодинакова. При насыщении элементами, образующими твердые растворы внедрения (например, углеродом и азотом), диффузия протекает быстрее, чем при насыщении металлами, образующими твердые растворы замещения.

Толщина диффузионного насыщения зависит от температуры и времени проведения процесса. При постоянной температуре процесса с течением времени скорость увеличения толщины покрытия уменьшается по параболическому закону. Скорость насыщения поверхности при прочих равных условиях тем больше, чем выше концентрация диффундирующего элемента на поверхности изделия. Концентрация диффундирующего элемента на поверхности зависит от активности окружающей среды и температуры.

Виды химико-термической обработки классифицируются по вводимым элементам: процесс диффузионного насыщения углеродом называется цементацией, азотом — азотированием, азотом и углеродом одновременно — нитроцементацией (карбонитрированием) и цианированием, серой — сульфидированием, бором — борированием. Кроме неметаллических элементов для насыщения поверхности широко применяют металлы, такие, как алюминий (алитирование), кремний (силицирование). Насыщение поверхности изделий двумя или большим числом компонентов (Сг и С, Сг и Al, Al и Si и т. д.) позволяет в большей мере

изменять свойства поверхностного слоя в нужном направлении.

Термомеханическая обработка предусматривает комбинированное воздействие на металл процессов пластической деформации и термической обработки в различной технологической последовательности для получения оптимальной структуры и соответственно высокого комплекса механических свойств.

Высокотемпературная термомеханическая обработка заключается в нагреве стали до температуры выше  $A_{с3}$ , выдержке, пластической деформации при температуре выше температуры рекристаллизации и охлаждении со скоростью, превышающей критическую. При этой обработке достигается значительное повышение механических свойств и прежде всего предела текучести и пластичности.

Низкотемпературная термомеханическая обработка заключается в нагреве стали до температуры выше  $A_{с3}$ , охлаждении до температуры устойчивости аустенита (ниже  $A_1$  и выше  $M_n$ ), пластической деформации при этой температуре и последующем охлаждении со скоростью, обеспечивающей образование мартенсита.

## **2. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ**

### **2.1. Сварка и наплавка при восстановлении деталей**

Наплавкой и сваркой восстанавливают до 80 % деталей. Механизированная наплавка отличается от ручной непрерывностью процесса, которая достигается использованием электродной проволоки или ленты в виде больших мотков, подводом тока к электроду на минимальном расстоянии от дуги, что позволяет применить токи большой силы без перегрева электрода. Непрерывность процесса наплавки осуществляется механизмом подачи электродного материала в зону действия источника тепла и механизмом передвижения.

При восстановлении наплавкой приходится решать три основные проблемы: повышение износостойкости восстанавливаемого элемента; сохранение прочности детали; повышение производительности всего технологического процесса восстановления. Например, при наплавке поверхности высокопрочным и износостойким материалом может оказаться, что наиболее трудоемок процесс обработки такого покрытия. Вопрос рационального сочетания свойств наплавляемого покрытия с его механическими свойствами

решается на основании технико-экономического расчета.

В последние годы созданы новые износостойкие сплавы и наплавочные материалы: порошковая проволока с внутренней защитой, металлокерамическая и порошковая ленты, гранулированные порошки, керамические стержни и др.

Наплавка под слоем флюса является одной из разновидностей механизированной наплавки, получившей широкое распространение при восстановлении. При этом способе в зону горения дуги непрерывно подают гранулированный флюс и электродную проволоку. Флюс насыпается слоем 50...60 мм, статическое давление его на жидкий металл составляет 70...90 Па. Этого давления достаточно для устранения разбрызгивания и хорошего формирования шва даже при очень больших силах сварочного тока. Часть флюса плавится под действием высокой температуры дуги, образуя вокруг нее оболочку, защищающую наплавляемый металл от окисления и выгорания легирующих элементов, а также способствует сохранению теплоты дуги. После затвердевания металла образуется наплавленный валик, покрытый шлаковой коркой и нерасплавленным флюсом. Остывшую шлаковую корку удаляют механическим путем.

Для наплавки под флюсом применяют электроды в виде одной или нескольких проволок диаметром 1...6 мм или ленту толщиной 0,4...1,0 мм и шириной 20...100 мм. С помощью наплавки под флюсом можно наносить слой металла любого химического состава толщиной от 2 мм и выше. Данный процесс применяется при наплавке цилиндрических, плоских и криволинейных поверхностей.

Разновидности наплавки под флюсом — расщепленной дугой, одноэлектродная и многоэлектродная.

Суть способов расщепленной и многоэлектроднодуговой наплавки заключается в том, что дуга автоматически возникает на торце то одного, то другого электрода, расположенных на определенном расстоянии друг от друга и имеющих один общий токопровод. Когда на первом электроде расплавится небольшое количество металла, длина дуги, горящей на этом электроде, увеличивается. Тем временем расстояние между концом соседнего электрода и поверхностью уменьшается. В результате дуга на первом электроде гаснет и тотчас возникает на втором. Благодаря такому попеременному плавлению электродов обеспечивается рассеянное тепловое воздействие на деталь и малая глубина проплавления при высокой производительности процесса.

Режим наплавки выбирается соответственно требуемой толщине наплавляемого металла с учетом формы детали.

Чем тоньше нужен наплавленный слой, тем меньше должны быть сила тока и диаметр проволоки. Для наплавки деталей типа вала необходимо учитывать возможность стекания жидкого металла и шлака. Для этого проволоку с положения зенита смещают в сторону, противоположную направлению вращения детали на величину 2...25 мм (в зависимости от диаметра детали) с одновременным уменьшением силы тока. В табл. 2 и 3 приведены данные режимов наплавки деталей с плоскими и цилиндрическими поверхностями.

## 2. Режим наплавки плоских поверхностей

Диаметр проволоки, мм	Сила тока при наплавке, А		Расстояние между осями электродных проволок, мм
	одноэлектродной	шести-электродной	
1,6	120...300	150...800	3 ...6
2,0	160...400	180...1200	3,5...8
2,5	180...450	200...1400	1 ...10
3,0	220...500	250...1600	6 ...12

## 3. Режимы наплавки цилиндрических деталей

Диаметр детали, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость наплавки, м/ч
200	2,0	220...260	27...30	28...32
160	2,0	200...240	27...30	24...28
120	2,0	170...200	26...29	20...24
90	1,6	150...180	26...29	16 20
60	1,2	110 ...130	25 .28	14...18

Характерной чертой одноэлектродной наплавки под флюсом является глубокий провар, в среднем равный 1 мм на каждые 100 А сварочного тока. В этом случае доля основного металла в наплавленном валике колеблется в пределах 60...70 %, а при многоэлектродной наплавке снижается до 22 %.

При многоэлектродной наплавке используют различное сочетание электродных проволок. Иногда их объединяют по две (расщепленная дуга) в несколько групп. Это создает условия для получения уменьшенной глубины проплавления и наплавки разных по химическому составу слоев. Наплавка может осуществляться по подслоям: низкоуглеродистому из аустенитной стали либо переходного состава.

Для наплавки ленточными электродами применяют лен-

ту размером  $0,6 \times 50$  или  $0,6 \times 60$  мм, в отдельных случаях  $1,0 \times 100$  мм. При наплавке широкой лентой под слоем флюса в местах перекрытия валиков часто образуются подрезы и захват шлака. Чтобы избежать этих дефектов, применяют комбинированный метод наплавки — электродной ленты с применением электродной проволоки, располагаемой как со стороны наплавляемого валика, так и с противоположной стороны. Иногда для устранения описанного дефекта наплавку ведут профилированной, в виде желобка, лентой.

Оптимальная ширина ленты и соответствующая ей максимальная производительность определяются из соотношений:

$$b = 14 + 0,388 \sqrt{I - 1200},$$

$$g = 26 + 0,834 \sqrt{I - 1200},$$

где  $b$  — ширина ленты, мм;  $g$  — производительность, кг/ч;  $I$  — величина тока, А.

Эти зависимости справедливы для сварочного тока  $I = 1200 \dots 1800$  А, напряжения дуги 30 В, скорости наплавки 1,7 см/с, вылета электрода 35 мм и толщины ленты 0,5 мм.

Для получения наплавленного материала определенного химического состава применяют наплавку под слоем флюса по гранулированному порошку, который подается впереди электрода на основной металл в зону дуги. Масса гранулированного порошка по отношению к массе электрода находится в соотношении 2 : 1 или 3 : 1.

Наибольшее применение имеют плавные флюсы по ГОСТ 9087—81. По строению частиц плавные флюсы могут быть стекловидными и пемзовидными. Наиболее известным из этого класса флюсом является АН-348А, состоящий из следующих компонентов:  $\text{SiO}_2$  — 41...43,5 %;  $\text{MnO}$  — 34,5...37,5;  $\text{MgO}$  — 5,5...7,5;  $\text{CaF}_2$  — 3,5...5,5;  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  — 0,1...0,3;  $\text{CaO}$  — 5,0...5,5;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — до 4,5; P — до 0,12 %. Наплавленный металл легируется только кремнием и марганцем.

На практике получили распространение и керамические флюсы. Керамические флюсы представляют собой зернистую массу, зерна которой содержат порошки металлов и ферросплавов, легирующих наплавляемый металл, шлакообразующие материалы и раскислители. Эти порошки склеивают жидким стеклом, прокаливают и дробят до необходимого размера.

Способ наплавки в среде защитного газа нашел широкое применение при затруднительной наплавке под флю-



сом, например: внутренних поверхностей глубокого отверстия, деталей сложной формы и мелких деталей.

Для защиты зоны горения дуги и жидкого металла в ванне применяют углекислый газ, аргон или их смеси. Иногда для этой цели служит водяной пар.

При наплавке в среде аргона используют присадочную проволоку химического состава, соответствующего составу наплавляемого металла, а при наплавке в среде углекислого газа — проволоку с повышенным содержанием раскислителей.

Режимы наплавки цилиндрических деталей проволокой типа СВ-08ГСА, Св-12ГС приведены в табл. 4.

4. Режимы наплавки цилиндрических деталей проволокой СВ-08ГСА, Св-12ГС

Диаметр, мм	Электродная проволока				Напряжение, В	Ток, А	Шаг наплавки, мм	Скорость сварки, м/ч
	диаметр, мм	скорость подачи, м/ч	вылет электрода, мм	смещение, мм				
10	0,8	175	8	0...3,0	17...18	75	2,5...3,0	40...45
20	0,8	250	8	3,0...5,0	18...19	95	3,0	40...45
40	1,0	200 235	8...10	8,0	18...19	85...90	3,0...3,5	30...35

Автоматическая вибродуговая наплавка широко используется при восстановлении цилиндрических деталей небольшого размера, особенно при ремонте деталей автомобилей и тракторов. Особенностью этого вида является вибрация электрода в продольном направлении. Это позволяет организовать перенос металла небольшими каплями, что облегчает формирование ровных и плотных его слоев и снижает термическое воздействие на деталь. Практический диапазон диаметров деталей, наплавляемых этим способом, 8...200 мм. Вибродуговая наплавка дает возможность получить ровные слои толщиной от сотых долей миллиметра до 3 мм за один проход. Наплавлять металл можно на воздухе, в среде защитного газа или с подачей жидкости к месту дугового разряда. Вместе с жидкостью в дугу вводят соли, содержащие ионизирующие элементы для стабилизации горения дуги. Для этого чаще всего применяют 2,5...6 %-ный водный раствор кальцинированной соды или 20 %-ный водный раствор глицерина. Ориенти-

ровочные режимы наплавки в струе жидкости приведены в табл. 5.

Вибродуговой наплавкой восстанавливают стальные и чугунные детали, на которые нужно нанести равномерный слой металла при минимальной их деформации, на поверх-

5. Ориентировочные режимы наплавки в струе жидкости

Диаметр электродной проволоки, мм	Скорость подачи проволоки, мм/с	Сила тока, А	Напряжение, В
1,8-2,2	13-17	110-130	14...15
1,8-2,2	15...22	150...180	16...20

ности деталей допустимы мелкие дефекты типа пор. Наплавлять можно и закаленные детали, твердость их при наплавке снижается незначительно.

Поверхность, наплавленная проволокой Св-08ГСА, легко обрабатывается резанием. Для получения твердых износостойких поверхностей применяют проволоки из сталей типа 65Г, У7, У8. Такая поверхность обрабатывается шлифованием или другими специальными методами.

Новым направлением в наплавке при восстановлении деталей является применение порошковых проволок с внутренней защитой, что позволяет производить наплавку на воздухе без применения мер по защите ванны для расплавленного металла.

Порошковая проволока представляет собой трубчатую оболочку из низкоуглеродистой стали диаметром 1,6; 2,0; 2,5; 2,8 и 3,0 мм. Трубка заполнена порошком легирующих элементов в смеси с газо- и шлакообразующими веществами, составляющими 10...12 % от массы проволоки. При плавлении легирующие элементы шихты и металл оболочки переходят в материал покрытия. Изменяя состав шихты, можно изменять и свойства наплавленной поверхности. Для наплавки порошковой проволокой с внутренней защитой используют источники питания с жесткой вольтамперной характеристикой.

## 2.2. Восстановление деталей электролитическими и химическими покрытиями

Электролитические (гальванические) покрытия широко применяют при восстановлении изношенных деталей. По сравнению с наплавкой они имеют ряд преимуществ: позволяют восстанавливать детали, имеющие незначительный

износ; не вызывают структурных изменений в материале детали, так как нагревается она незначительно. Из гальванических способов восстановления деталей в ремонтной практике получили распространение хромирование, осталивание, никелирование, меднение и лужение.

Сущность гальванического нанесения покрытия заключается в процессе переноса ионов под действием электрического тока в электролитах. При прохождении постоянного электрического тока через электроды, опущенные в раствор (электролит), в последнем образуются положительно и отрицательно заряженные ионы. Ионы, несущие положительный заряд, перемещаются к отрицательному электроду (катоде) и осаждаются на нем. Ионы, несущие отрицательный заряд, движутся к положительному электроду (аноду) и осаждаются на нем. Катионы водорода или металла, достигая поверхности катода, приобретают недостающие им электроны и превращаются в нейтральные атомы, причем водород выделяется в виде газа, а металл при определенных условиях образует на катоде металлический осадок.

Анионы кислотных остатков, гидроксидов и кислорода, достигая поверхности анода, разряжаются, отдают избыточные электроны и превращаются в нейтральные атомы или группу атомов. Эти атомы вступают в химическую реакцию с анодом или выделяются в свободном виде.

При электролизе, проводимом для получения гальванического покрытия, катодом обычно служит деталь, а анодом чаще всего пластины, изготовляемые из осаждаемого металла. В этом случае анод растворим: происходит переход атомов металла в раствор в виде катионов. Образовавшиеся катионы при определенных условиях электролиза автоматически поддерживают свою концентрацию в растворе.

При некоторых гальванических процессах, например при хромировании, применяют нерастворимые аноды из свинца, которые служат только проводниками тока. Недостаток катионов в данном случае компенсируют добавкой свежего электролита.

Действительная величина выделившегося вещества редко не совпадает с теоретической. Это объясняется тем, что при электролизе на катоде, кроме металла, может выделяться водород и происходят другие восстановительные процессы. Отношение действительного количества выделенного вещества к теоретическому, умноженное на 100, называют выходом вещества по току или к. п. д. ванны.

Для обеспечения нормального процесса электролиза весьма важное значение имеет соотношение между плотностью тока, концентрацией и температурой электролита. Плотностью тока  $D$  (А/дм<sup>2</sup>) называют отношение величины тока к покрываемой или обрабатываемой поверхности детали.

При отношении малой плотности тока к концентрации электролита получают осадки с крупнокристаллической структурой, а при значительной — нарушается правильность роста кристаллов и ухудшается качество осадка.

На нормальное течение процесса электролиза в значительной степени оказывает влияние кислотность электролита, т. е. концентрация в нем водородных ионов. Этот показатель получил название водородного показателя и обозначается через рН. Чем больше концентрация водородных ионов, тем больше кислотность электролита. Кислые растворы имеют  $pH < 7$ , а щелочные  $pH > 7$ .

Образование качественных покрытий во многом зависит от рассеивающей и кроющей способности гальванической ванны. Под рассеивающей способностью при гальваническом процессе понимают степень равномерности металлического осадка по различным частях покрываемой детали, имеющей неправильную форму. Неравномерный по толщине осадок металла получают вследствие различия условий для прохождения тока между отдельными точками анода и катода. Для частичного устранения этого недостатка в практике гальванических покрытий выдерживают определенное отношение площадей анода и катода, а также концентрично располагают аноды относительно катодов.

Под кроющей способностью понимают возможность ванны покрывать имеющиеся на катоде углубления. Улучшить ее можно конструкцией подвески для навешивания детали в ванну и формой анодов. Это обеспечивает покрытие всех участков детали.

Одним из мероприятий, обеспечивающих получение равномерного покрытия на деталях, имеющих выступы или острые кромки, является экранирование. Например, перед покрытием к торцу концевой шейки вала прикрепляют экран, изготовленный из свинцовой фольги и имеющий диаметр несколько больший, чем у шейки вала. Экран частично воспринимает сконцентрировавшиеся силовые линии на острых кромках вала, а следовательно, обеспечивает равномерную плотность тока по всей покрываемой поверхности и равномерное покрытие по толщине осадка.

Гальванически осажденные металлы отличаются по своим механическим свойствам от литых металлов, ибо вследствие различных условий образования имеют искаженную кристаллическую решетку. Их особые механические свойства: твердость, износостойкость, сопротивление отрыву и т. д.

Для получения качественного покрытия деталь перед нанесением гальванического покрытия проходит следующие стадии подготовки: а) очистку от грязи, ржавчины и масла (грязь и масло удаляют в моечных машинах горячими щелочными растворами, ржавые места зачищают наждачной шкуркой или железными щетками); б) предварительное шлифование для придания изношенной детали правильной геометрической формы (снимают с детали минимальный слой металла, однако достаточный для удаления с поверхности следов износа); в) контроль размеров детали (для определения толщины слоя, который необходимо нанести на деталь, и времени нанесения с учетом припуска на последующую механическую обработку); г) изоляция подвески и мест, не подлежащих нанесению (изолируют цапон-лаком — раствором целлулоида в ацетоне, перхлорвиниловым лаком 9—32 или клеями АК-20 и БФ, которые наносят в 2...6 слоев); д) навешивание деталей на подвеску (необходимо обеспечить надежное соприкосновение их поверхностей с экранирующими устройствами и правильное расположение последних); е) обезжиривание химическими способами: промывкой в бензине или другом органическом растворителе, а также в водном щелочном растворе, нагретом до температуры 333...343°K и состоящем из 40...50 г/л тринатрийфосфата, 10...12 едкого натрия, 25...35 жидкого стекла, 2...5 г/л препарата ОП-7 или ОП-10. Продолжительность обезжиривания 3...5 мин. Кроме этого, детали можно обезжиривать электрохимическим методом, при котором деталь погружается в электролит, нагретый до температуры 343...348 K и состоящий из 30...50 г/л едкого натрия, 50...75 углекислой или кальцинированной соды, 2...5 г/л жидкого стекла. На деталь подают напряжение 8...10 В для обеспечения плотности тока 3...10 А/дм<sup>2</sup> в течение 5...8 мин. При электрохимическом обезжиривании крупногабаритной детали последняя служит катодом, а анодом — свинцовая пластина. Для мелких и тонкостенных деталей целесообразна обратная полярность подключения напряжения. После обезжиривания подвеску с деталями промывают в теплой (нагретой до температуры 333...343 K) проточной воде; ж) анодное

декапирование для удаления окисных пленок с поверхности и выявления структуры детали. Для этого подвеску с деталью погружают в ванну с электролитом, переключают ток так, чтобы деталь была анодом, и подвергают ее декапированию при плотности тока  $30\text{--}35\text{ А/дм}^2$  в течение  $30\text{--}45$  с. Иногда анодное декапирование заменяют химическим, погружая подвеску с деталями в 5 %-ный раствор серной кислоты и выдерживая их в этом растворе  $10\text{--}60$  с. После химического декапирования подвеску с деталями следует промыть дистиллированной водой.

Хромирование — один из процессов, широко применяемых в ремонтной практике. Электролитический хром обладает высокой твердостью (от 400 до 1200 НВ), высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения (0,13 при трении по баббиту и 0,16 при трении по стали), высокой теплопроводностью, низким коэффициентом линейного расширения. Слой электролитического хрома обладает хорошей отражательной способностью и имеет красивый внешний вид. Недостаток хромового покрытия — плохая смазываемость маслами. В зависимости от концентрации и температуры хромового электролита и плотности тока можно получить три вида покрытий: матовое (серое), блестящее и молочное. Матовые (серые) осадки обладают очень высокой твердостью ( $900\text{--}1200$  НВ), но отличаются хрупкостью и невысокой износостойкостью. Блестящие осадки обладают высокой твердостью ( $600\text{--}900$  НВ) и износостойкостью. Хрупкость этих осадков меньше, чем у матовых осадков хрома, но тоже весьма значительна. Молочные осадки хрома обладают меньшей твердостью ( $400\text{--}600$  НВ), чем блестящие, и они достаточно пластичны и износостойки. При восстановлении деталей хромированием следует учитывать в каждом отдельном случае условия их работы и в зависимости от этого принимать режим хромирования.

Электролит хромировочной универсальной ванны представляет собой водный раствор хромового ангидрида ( $150\text{--}250$  г/л) и серной кислоты ( $1,5\text{--}2,5$  г/л). Плотность тока выбирают в пределах  $35\text{--}60\text{ А/дм}^2$ , а температуру —  $323\text{--}338\text{ К}$ .

Большинство деталей при восстановлении хромируют при плотности тока  $35\text{--}45\text{ А/дм}^2$  и температуре  $328\text{--}333\text{ К}$ , получая блестящее хромовое покрытие. На детали, подвергающиеся во время работы ударным нагрузкам, следует наносить молочное покрытие или переходное от блестящего к молочному.

В процессе хромирования в обычных электролитах выход хрома по току весьма невелик (13...15 %) и меняется во время работы ванны. Концентрация хромового электролита постепенно изменяется вследствие обеднения хромом, нарушается соотношение между количеством хромового ангидрида и серной кислоты. В результате этого нарушается нормальная работа ванны, изменяется выход хрома по току и рассеивающая способность, осадки получаются неоднородными.

В настоящее время применяют саморегулирующиеся хромовые электролиты. Для этого в состав хромового электролита вводят труднорастворимые соли сульфата стронция ( $\text{SrSO}_4$ ) и кремнефторида калия ( $\text{K}_2\text{FSiO}_6$ ) в количествах, несколько превышающих их растворимость. Хромовый электролит, насыщенный солями сульфата стронция и кремнефторида калия, обладает способностью автоматически поддерживать постоянную концентрацию ионов хрома. Вследствие этого режим хромирования становится более стабильным. Температуру, при которой хромируют детали, повышают до 338...368 К, а плотность тока — до 40...80 А/дм<sup>2</sup>. Выход хрома по току в этом случае увеличивается до 17,5...18 %.

Саморегулирующийся электролит содержит 200...300 г/л хромового ангидрида, 5,5...6,5 г/л сульфата стронция и 18...20 % кремнефторида калия. Во время хромирования деталей в таком электролите при плотности тока 60 А/дм<sup>2</sup> за 1 ч осаждается слой хрома толщиной 45...50 мкм.

Для процесса холодного износостойкого хромирования применяется электролит, состоящий из 150 г/л хромового ангидрида и 1,5 г/л серной кислоты. Детали хромируют в этом случае при комнатной температуре (293...298°К) и плотности тока 50 А/дм<sup>2</sup>. Технология холодного хромирования отличается от обычного тем, что между обезжириванием и декапированием деталь подвергают анодному травлению в смеси из 50 % (по объему) фосфорной ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) и 50 % серной ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) кислот с последующей промывкой в горячей воде. Детали обрабатывают при плотности тока 20 А/дм<sup>2</sup> в течение 5 мин. Анодное травление обеспечивает надежное сцепление осадка с основным металлом. После такой обработки выход хрома по току составляет 35 %, а скорость осаждения хрома увеличивается в 2,5...3 раза по сравнению с хромированием в горячем электролите. При работе в указанном режиме получают серое или матовое покрытие с микротвердостью около 8000 МПа (800 кг/мм<sup>2</sup>).

Для улучшения смачивания хромированных поверхностей применяют пористое хромирование, после которого масло хорошо удерживается на трущихся поверхностях и повышается их износостойкость. Его можно получить электрохимическим, химическим или механическим способами. При химическом способе пористый хром получают кратковременным травлением покрытия разбавленной соляной кислотой, а при механическом — созданием на хромируемой поверхности углублений (насечкой, накаткой) различного размера и количества.

Наиболее широко распространен электрохимический способ, при котором хромированную деталь, не вынимая из ванны, подвергают анодному травлению. В этом случае только изменяют направление тока, и деталь, бывшая ранее катодом, становится анодом. Чтобы избежать загрязнения раствора железом при травлении детали, лучше эту операцию выполнять в отдельной ванне.

Гальванический процесс осаждения железа называется осталиванием, или железнением. В зависимости от режимов и условий процесса покрытие может быть твердым или мягким. Выход металла по току в 5...7 раз выше, чем при хромировании. Скорость осаждения достигает 0,4 мм/ч. При осталивании можно получить покрытие толщиной до 2 мм высокой твердости и износостойкости. Для твердого осталивания применяют хлористый электролит следующего состава: хлористый натрий, соляная кислота, хлористый марганец, хлористое железо.

Анод изготавливают из малоуглеродистой стали. Общая площадь анодов должна быть в 2 раза больше покрываемой поверхности детали. При растворении анодов, изготовленных из стали, образуется шлам, загрязняющий электролит. С целью предупреждения загрязнения электролита аноды необходимо покрывать чехлами из стеклоткани.

Твердость, вязкость и износостойкость покрытия можно менять в широких пределах, изменяя состав электролита, его кислотность, температуру и плотность тока. При малой плотности тока и высокой температуре получают вязкие мелкозернистые покрытия. Повышение плотности тока увеличивает твердость покрытия. Однако при слишком высокой плотности тока появляется большое количество дендритов.

При понижении температуры электролита твердость покрытия возрастает. Более твердое оно и при уменьшении концентрации хлористого железа в электролите.



Характерной чертой хлористых электролитов является большой расход соляной кислоты. Он составляет 0,2 г кислоты на 1 А/ч, поэтому в электролит необходимо добавлять периодически (раз в смену) или непрерывно водный раствор соляной кислоты.

Для получения покрытия твердостью 220...300 НВ рекомендуется следующий состав электролита: 450...500 г/л хлористого железа, 0,5...0,8 соляной кислоты, 100 хлористого натрия, 10 г/л хлористого марганца. Детали в таком электролите осталиваются при температуре 363 К и плотности тока 20...30 А/дм<sup>2</sup>.

Для нужд восстановления применяют два вида никелирования: химическое и гальваническое (последнее чаще всего применяют в качестве подслоя перед хромированием или для защиты деталей от коррозии). Химическое никелирование заключается в том, что при определенных условиях на железо (сталь), никель, алюминий, цинк, серебро из раствора может осаждаться никель без пропускания электрического тока. На медь и ее сплавы он может осаждаться, если последние контактируют с железом, цинком и т. п. На свинец, кадмий и их сплавы никель не осаждается. Если в ванне имеется даже ничтожное количество этих металлов, исключается возможность осаждения никеля. Для химического никелирования обычно используют растворы солей никеля (сернистого или хлористого) и солей-восстановителей (гипофосфита натрия, калия, кальция). Поскольку в растворе всегда присутствует гипофосфит, одновременно с никелем из раствора на поверхность осаждается фосфор. Твердость покрытия составляет 420...470 НВ, после термообработки повышается до 600...620. При химическом никелировании осадок получается совершенно равномерный и не зависит от конфигурации детали.

Электролит для гальванического никелирования состоит из 70...420 г/л сернистого никеля, растворенного в дистиллированной воде, 20...30 борной кислоты, 25...35 г/л хлористого аммония. В качестве анода используют электроды из чистого никеля. Режим никелирования: температура электролита не менее 293 К, плотность тока 0,5...5 А/дм<sup>2</sup>, напряжение 1,5...2 В.

Разновидностью способа гальванического нанесения покрытия на деталь является гальваническое электропитание. Сущность метода заключается в том, что деталь соединяется с отрицательным зажимом источника тока, а положительный зажим — со специальным инструментом,

в качестве которого используют угольный стержень, обернутый абсорбирующим (поглощающим или впитывающим) материалом. Абсорбирующий материал служит тампоном, непрерывно смачиваемым электролитом из специальной емкости. В процессе нанесения тампон-анод медленно перемещают по восстанавливаемой поверхности. Постоянное перемещение тампона и интенсивная подача свежего электролита позволяют увеличить плотность тока, вследствие чего резко повышается производительность. Этот способ эффективен при восстановлении отверстий в корпусных деталях и посадочных мест осей и валов.

### 2.3. Восстановление деталей металлизацией

Металлизация является одним из прогрессивных способов восстановления. Широкое применение получили следующие способы металлизации: газопламенная, электродуговая и плазменная. В последнее время к перечисленным способам добавилось детонационное напыление.

Сущность металлизации заключается в том, что расплавленный металл под действием струи газа-носителя распыляется на мелкие частицы и с большой скоростью переносится на восстанавливаемую поверхность. На поверхности частица расплавленного металла сильно деформируется и быстро остывает. Вследствие этого только 10 % (для стали) площади соприкосновения капли образует зону сварки, поэтому основным фактором, определяющим силу сцепления, является заполнение частицей металла макро- и микронеровностей на поверхности детали. С увеличением скорости частиц, а следовательно, с увеличением силы их удара сцепления с поверхностью восстанавливаемой детали улучшаются.

В силу специфики образования соединения особое значение приобретает подготовка поверхности перед металлизацией. Поверхность должна быть шероховатой, без пыли, влаги, масла или окислов. В зависимости от конструктивных особенностей восстанавливаемой поверхности и нагрузки на нее подготовка последней может дополняться проточками, нарезкой канавок, наваркой буртиков и т. п. Детали, имеющие односторонний износ, должны быть предварительно обработаны с целью придания им правильной геометрической формы и получения при окончательной обработке равномерной толщины металлизированного слоя. Глубина проточек зависит от свойств покрытия и контактной нагрузки на восстанавливаемую поверхность и может быть определена по выражению:

$$h = 2,04 \sqrt{\sigma_{\text{пл}} R (\sigma_{\text{адг}}^2 - \sigma_{\text{адг}}^2) / E_{\text{п}}}$$

где  $\sigma_{\text{пл}}$  — величина предела выносливости покрытия, МПа;  $E_{\text{п}}$  — модуль упругости покрытия, МПа;  $R$  — радиус вала, м;  $\sigma_{\text{адг}}$  — величина сцепления металлизационного покрытия с поверхностью, МПа;  $h$  — глубина проточки, м. Оценить величину проточки можно из табл. 6.

#### 6. Определение величины проточки под металлизацию

Условия работы поверхности	Диаметр вала, мм				
	15...25	25...50	50...100	100...150	свыше 150
Поверхность скольжения	0,51	0,76	1,02	1,27	1,52
Поверхность под прессовую посадку	0,25	0,25	0,51	0,51	0,51

Обезжиривание и мойку деталей производят либо органическими растворителями, либо в моечных машинах щелочными растворами и горячей водой. Для чугунных деталей, работавших в условиях смазки, обязательна термическая обработка при температуре свыше 523 К в течение 2 ч с целью ее выжигания.

Шероховатость поверхности придают механическим, струйным, электроискровым или химическим (электрохимическим) способами. Механическая подготовка может производиться нарезанием резьбы, проточкой канавок, накаткой. Она эффективна при нанесении покрытий значительной толщины и когда поверхность поддается обработке. Желательно, чтобы проточки и углубления имели клиновидную форму с меньшей стороной клина у наружной поверхности. Струйная обработка заключается в обдуже поверхности дробью или корундом и применяется для твердых деталей и со сложной формой. Другие виды подготовки применяются сравнительно редко и в специальных случаях.

После подготовки детали не позже чем через 1...1,5 ч должны подвергнуться металлизации. Электродуговая металлизация осуществляется аппаратом, где две проволоки из проводящего материала диаметром 1...2 мм находятся под напряжением и при помощи механизма непрерывно подаются навстречу друг другу. В точке их сближения возникает электрическая дуга, расплавляющая металл. В зону дуги подается воздух или инертный газ под давлением. Под действием струи сжатого воздуха металл рас-

пыляется и наносится на поверхность. Наиболее распространены являются электродуговые металлзаторы ЭМ-12-67 и ЭМ-14, а также комплект КДМ-2. Необходимо применять источники постоянного тока с жесткой вольт-амперной характеристикой, дающие порядка 200 А при напряжении 20...35 В. Расход воздуха при работе металлзаторов составляет 2...3 м<sup>3</sup>/мин. Воздух в металлзатор подается через систему очистки. Производительность электродуговых металлзаторов в зависимости от материала 2,5—14 кг/ч.

Для получения стального покрытия, легко обрабатываемого при резании и точении, обычно применяют проволоку Св-08А, а для получения износостойкого покрытия — углеродистую проволоку типа У8А, У10А. Необходимо учитывать, что чем выше содержание в проволоке легирующих элементов типа кремния и марганца, тем большее количество шлаковых включений будет иметь покрытие и тем меньше прочность его самого и сцепления с поверхностью. С целью увеличения прочности сцепления покрытия с поверхностью иногда перед нанесением основного покрытия из стали напыляют подслоем толщиной до 0,1 мм из нихрома, содержащего 20 % хрома и 80 % никеля.

При напылении алюминиевого покрытия, толщина которого превышает 0,2 мм, или цинкового покрытия толщиной более 0,25 мм на подготовленную поверхность напыляют тонкий слой (0,03 мм) углеродистой стали, содержание углерода в которой не превышает 0,25 %. Такой подслоем позволяет значительно повысить прочность сцепления алюминиевого и цинкового покрытия с основой.

При газопламенной металлзации в качестве источника тепла используется химическая реакция горения газов ацетилена или пропан-бутана. В факел пламени вводят напыляемый материал. Чаще всего напыляемым материалом является порошок с размером частиц 40...100 мкм. Продукты горения транспортируют расплавленные частицы на восстанавливаемую поверхность. Газопламенная металлзация проводится в нейтральном пламени горелками ГАЛ-2, ГАЛ-6,2, ГН-2. В качестве материалов применяют самофлюсующиеся порошки ПГ-СР, СНГН, ВСНГН, производство которых налажено НПО «Тулачермет» и Торезским заводом наплавочных твердых сплавов. С целью увеличения прочности таких покрытий их могут оплавливать газовой горелкой, в печах с защитной атмосферой или на установках ТВЧ при температуре 1223...1323 К.

Плазменная металлизация целесообразна при нанесении тугоплавких покрытий. Сущность процесса заключается в том, что между электродами горит электрическая дуга и через нее пропускается газ (водород, азот или аргон). При температуре горения дуги газ ионизируется и становится электропроводным. При ионизации происходит поглощение энергии, которая выделяется при обратном процессе. Выделяющуюся при этом энергию используют для разогрева напыляемого материала. В связи с тем что плотность энергии в плазматронах высока, температура в струе плазмы порядка 15 000...17 000 К. Это позволяет наносить самые тугоплавкие покрытия.

Для плазменного нанесения покрытий применяют установки УМП-4-64, УМП-5-68, УПУ-3 (М, Д), выпускаемые Барнаульским аппаратно-механическим заводом.

### **3. ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ**

#### **3.1. Технологические свойства термообработываемых деталей**

Закаливаемость — свойство стали повышать твердость. Определяется содержанием в ней углерода: чем больше в мартенсите углерода, тем выше его твердость. Легирующие элементы оказывают относительно небольшое влияние на закаливаемость.

Способность стали получать закаленный слой с мартенситной или троостомартенситной структурой и высокой твердостью на ту или иную глубину называется прокаливаемостью. Она определяется критической скоростью охлаждения, зависящей от состава стали.

Условно глубина закаленного слоя — расстояние от поверхности до полумартенситной зоны (50 % мартенсита и 50 % троостита). Диаметр заготовки, в центре которой после закалки в охлаждающей среде образуется полумартенситная структура, называется критическим диаметром. Его величина определяет размер сечения изделия, прокаливающегося насквозь и получающего высокую твердость.

Полумартенситная структура во многих случаях не обеспечивает наивысшей механической прочности (особенно усталостной), поэтому прокаливаемость нередко определяют по глубине закаленного слоя со структурой 95 %

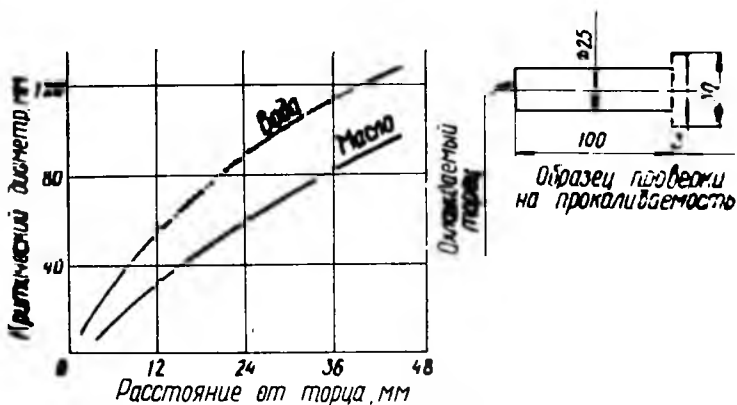


Рис. 11. Определение критического диаметра прокаливаемости по торцевой пробе.

мартенсита. Критический диаметр для такой структуры примерно на 25 % меньше определенного по полумартенситной зоне. Полная прокаливаемость на структуру из 99,9 % мартенсита составляет приблизительно 50 % от полумартенситной. Полумартенситную зону легко установить по величине твердости. Зависимость ее твердости от содержания углерода и степени легирования приведена в табл. 7.

#### 7. Зависимость твердости полумартенситной зоны от содержания углерода и степени легирования (твердость в HRC)

Тип стали	Содержание углерода, %			
	0,13...0,22	0,28...0,32	0,43...0,52	0,53...0,62
Углеродистая	25	35	45	50
Легированная	30	40	50	55

Чем меньше критическая скорость закалки и выше устойчивость аустенита к переохлаждению, легированные стали имеют большую прокаливаемость, чем углеродистые. Увеличивают ее марганец, хром, молибден и присадки бора (0,003...0,005 %). Небольшое влияние на прокаливаемость оказывают никель, кремний, а при одновременном легировании несколькими элементами она сильно возрастает. Такие элементы, как титан, ниобий и ванадий, уменьшают прокаливаемость из-за нерастворимости карбидов в

аустените, они не только создают дополнительные центры кристаллизации, способствующие распаду аустенита, но и измельчают его зерно.

Если прокаливаемость покрытия выше, чем самой детали, желательно производить закалку со скоростью меньше или больше критической для материала детали, что позволяет получить на поверхности твердую мартенситную структуру с высокими положительными напряжениями сжатия, а при необходимости и менее прочные, но более вязкие структуры.

Прокаливаемость стали согласно ГОСТ 5657—69 определяют методом торцевой закалки: цилиндрический образец определенной формы и размеров (рис. 11) нагревают до заданной температуры и охлаждают водой с торца на специальной установке. После охлаждения измеряют твердость по длине образца. Так как скорость охлаждения убывает по мере увеличения расстояния от торца, будет снижаться и твердость. Расстояние от торца до участка с твердостью, соответствующей полумартенситной зоне данной стали или покрытия, откладывают по оси абсцисс перпендикулярно пересечению с кривой для закалки в масле или воде. Горизонталь, проведенная из точки пересечения перпендикуляра с кривой охлаждения до ординаты, и укажет на ней величину критического диаметра.

Прокаливаемость даже одной и той же марки стали может колебаться в широких пределах в зависимости от изменения ее химического состава, величины зерна, размеров и формы изделия и других факторов и характеризуется не кривой прокаливаемости, а ее полосой, которая указывает на область возможной прокаливаемости для данной марки стали.

При закалке сталей (в особенности тех деталей, которые имеют покрытия, по физическим свойствам отличающиеся от материала детали) неизбежно возникают внутренние напряжения. Они образуются одновременно из-за неравномерного охлаждения поверхности и сердцевины (тепловые), неоднородности протекания мартенситных превращений по объему детали (структурные), разности теплофизических свойств материала покрытия и детали. Внутренние напряжения вызывают деформацию, коробление, а в отдельных случаях приводят к образованию трещин. Снизить уровень внутренних напряжений, связанных с различием теплофизических свойств покрытия и детали, можно в том случае, если материал и покрытия (наплавки) детали относятся к одному классу сталей, ибо

коэффициент теплового расширения среди различных классов неодинаков. Так, у аустенитной стали он отличается на 25...30 % от этой же характеристики перлитной низколегированной стали, а высокохромистых сталей — почти на 40 %.

Подбор покрытия и материала детали для соединения условий рационального перемещения углерода в зоне их контактирования (сплавления) имеет практическое значение для работоспособности восстановленной детали после термической и в особенности химикотермической обработки. Нерациональное перемещение углерода в этой зоне способно привести к обезуглероживанию. Такое изменение структурного состояния в зоне контактирования приводит к резкому скачкообразному изменению свойств на участке малой протяженности, что снижает способность детали воспринимать эксплуатационные нагрузки.

Различная подвижность углерода в зоне контакта, а также связанные с этим химические и структурные неоднородности обуславливаются различием в показателях термодинамической активности углерода в контактируемых растворах. Регулируют эту активность изменением концентрации легирующих элементов покрытия. Хром и марганец служат для понижения активности углерода, а никель — для ее повышения. Использование кремния нецелесообразно, так как этот элемент снижает вязкость. Эффективно введение небольших количеств ванадия.

### 3.2. Охлаждающие среды для закалки

Закалочные среды должны обеспечивать высокую скорость охлаждения в интервале температур 923...823 К (интервал температур наименьшей устойчивости аустенита) и пониженную скорость охлаждения при температуре ниже 573 К (в интервале мартенситных превращений). Одновременно закалочная среда не должна повреждать (разъедать) поверхность при закалке и полностью удаляется с поверхности детали при промывке. Кроме этого, закалочная среда должна быть безопасна и недефицитна.

В качестве закалочной среды широкое применение получила вода. Она обладает достаточно высокой скоростью охлаждения в интервале температур перлитного превращения (923...823 К), что позволяет получить необходимую твердость и прокаливаемость крупногабаритных деталей. Однако большая скорость охлаждения в интервале мартенситного превращения вызывает значительные внутренние



напряжения, что приводит к деформациям и закалочным трещинам. Охлаждение проводят водяным душем, водяной струей, водовоздушной средой и прямым погружением. Последний метод может давать на поверхности детали мягкие пятна. Для устранения технологических недостатков воды последнюю применяют в виде растворов солей, многоатомных спиртов и полимеров. Так, добавка поваренной соли или едких щелочей в количестве 5...10 % повышает охлаждающую способность воды, добавление 5...7 % марганцовокислого калия снижает скорость охлаждения в интервале мартенситного превращения, добавление 0,15 % поливинилового спирта позволяет получить скорость охлаждения, которая является промежуточной между чистой водой и маслом.

Масла нашли широкое применение как закалочные среды с пониженной скоростью охлаждения в области мартенситных превращений. Наибольшее распространение для этих целей получили масла индустриальные (12, 20, 30, 45, 50), цилиндровые (11, 24, 38, 52) и др.

Вес закалочного масла в баке во избежание его воспламенения должен в 12...18 раз превышать вес закаливаемой детали. Кроме того, масло в закалочной емкости перемешивается механическим путем, а при интенсивном его использовании закалочный бак обеспечивается охлаждающей системой. Основным недостатком масел как закалочных сред — их старение (окисление), поэтому необходимо регулярно проверять свойство масла и производить его замену.

Применение в качестве закалочных сред расплавов солей и щелочей позволяет получить более высокие механические свойства сталей, наименьшие деформации, избежать появления закалочных трещин, а в некоторых случаях получить светлую поверхность детали, что позволяет избежать последующей их очистки. В качестве расплавов применяют натриевую или калиевую селитру, а также едкий калий или натрий. К недостаткам расплавов солей и щелочей относятся непостоянство состава и низкая теплопроводность, что требует перемешивания среды в процессе закалки.

Аналогичными технологическими свойствами обладают расплавы металлов (свинца или олова). Они отличаются от предыдущих повышенной теплопроводностью.

Для закалки высоколегированных сталей с невысокой критической скоростью охлаждения применяют воздух или водовоздушную, масловоздушную смеси.

Охлаждающей средой могут служить твердые частицы (песка, корунда), которые поддерживаются во взвешенном состоянии (кипящей смолой). Такая среда обладает высокой теплопроводностью. Скорость охлаждения ее занимает промежуточное положение между скоростью охлаждения в масле и на воздухе.

### 3.3. Нагрев деталей

При термообработке восстановленных деталей используется как оборудование для общего нагрева (камерные печи, ванны с расплавом солей, нагрев в электролитах), так и местный нагрев (установки токов высокой частоты, газопламенный нагрев горелками, сварочной дугой).

Температуру нагрева можно определить с помощью термометров и милливольтметров, проградуированных в градусах или по цвету детали (табл. 8).

Выбор способа нагрева восстановленной детали диктуется влиянием нагрева на последующие эксплуатационные

8. Зависимость цвета детали от температуры

Температура, К	Цвета калиения и побежалости
493	Светло-желтый
513	Соломенно-желтый
528	Коричнево-желтый
538	Красно-коричневый
548	Пурпурно-красный
558	Фиолетовый
568	Васильково-синий
588	Светло-синий
603	Серый
803...853	Темно-коричневый
853...923	Коричнево-красный
923...1003	Темно-красный
1003...1043	Темно-вишнево-красный
1103...1173	Светло-красный
1173...1323	Оранжевый
1323...1423	Темно-желтый
1423...1523	Светло-желтый
1523...1573	Ослепительно-белый

их свойства. Так, при нагреве детали в обычных печах на ее поверхности образуется окалина и происходит обезуглероживание. Это может привести к уменьшению конструктивно важных размеров и снижению прочности не только невозстанавливаемых элементов, но и детали в целом. Для предотвращения таких явлений общий нагрев восстанов-

ленной детали производят в защитной атмосфере, как эндо- или экзогаз, диссоциированный аммиак, инертный газ или технический азот.

При проведении локального нагрева отдельного элемента детали принимают меры защиты от разогрева соседних участков. Наиболее распространенным методом защиты является охлаждение прилегающих участков водой.

### 3.4. Термическая обработка восстановленных деталей

Термическая обработка восстановленных деталей производится для снятия или снижения уровня остаточных напряжений, связанных с технологией восстановления;

#### 9. Режимы термической обработки низколегированных покрытий

Материал наплавки	Твердость после наплавки	Термическая операция	Температура, К	Способ охлаждения	Твердость после термообработки
Нп-25	НВ 160...220	Отпуск (местный или общий)	913...933 1 ч	На воздухе	НВ 160.. 200
Нп-30	НВ 160 . 220	Закалка	1163...1183	Вода	HRC 34.. 40
		Отпуск	913...933 1 ч	На воздухе	НВ 160 ..200
Нп-50	НВ 180...240	Нормализация	1183.. 1203 0,5 ч	То же	НВ 160.. 200
		Закалка	1143...1163	Вода	HRC 42. 48
		Отпуск	903...923 1,5 ч	На воздухе	НВ 200 : 220
Нп-80	НВ 260 ..340	Нормализация	1153...1173 0,5 ч	То же	НВ 200 .220
		Закалка	1093...1133	Вода	HRC 54...60
Нп-50Г	НВ 200...270	Отпуск	873...923 2,0 ч	На воздухе	НВ 170...196
		Закалка	1053...1073	Через воду в масле	HRC 63.. 65
Св-08	НВ 120...160	Нормализация	1093...1113	На воздухе	
		Отжиг	1113...1143	С печью	
Св-10Г2	НВ 180...210	Отпуск	913...933 1 ч	На воздухе	НВ 120.. 150
		Нормализация	1183 ..1203 0,5 ч	То же	НВ 120...150
Св-08Г2С	НВ 180...210	Нормализация	1193	На воздухе	—
		Закалка	1163...1183	Вода	НВ 395. 410
		Нормализация	1183...1203	На воздухе	НВ 180 . 200
		Закалка	1173...1193	Вода	НВ 400. 410

восстановления или улучшения структурного состояния и свойств зоны покрытия—деталь; восстановления необходимых механических свойств отдельного элемента или детали в целом; придания необходимых механических свойств покрытию перед механической обработкой; изменения химического состава покрытия.

При наплавке на углеродистую сталь низко- и средне-легированных покрытий металл наплавки близок к углеродистым сталям. Термическая обработка таких покрытий проводится по режимам, указанным в табл. 9.

При наплавке низко- или среднелегированных покрытий на низколегированный материал детали термическая обработка назначается для более легированной стали (табл. 10). Все виды термообработки, связанные со снятием напряжений, должны проводиться не позже чем через 3...10 ч после наплавки.

Для получения качественного покрытия из порошков типа ПГ-СР их нанесение проводят в следующем порядке. Наплавку производят на предварительно подогретую деталь. Величина подогрева для нанесения порошка ПГ-СР2 составляет 670—770 К, для ПГ-СР3 — 750...870, а для ПГ-СР4 — 850...920 К. После наплавки деталь сразу помещают в печь с температурой 823...873 К, которую затем поднимают до 973...1023 К. При этой температуре деталь выдерживают 2...3 ч и затем охлаждают с печью или в песке.

При нанесении этих порошков газотермическим методом их оплавление производят при температуре 1223...1323 К. Разогрев при оплавлении можно осуществлять как

10. Режимы термической обработки средне- и высоколегированных покрытий

Материал наплавки	Твердость после наплавки	Термическая обработка	Температура, К	Способ охлаждения	Твердость после термообработки
Нп-20Х14	HRC 32...38	Отжиг	1033...1073 2 ч	С печью На воздухе	HB 190...240
Нп-40Х13	HRC 45...52	Закалка Отпуск	1223...1323 823...873	Масло На воздухе	HRC 48...50 HRC 35...38
Нп-30ХГСА	HB 220...300	Закалка Отпуск	1273...1323 913...943	Масло На воздухе	HRC 50...50 HB 217...241
Св-06Х19Н9Т	HB 160...190	Закалка Закалка	1143...1163 1323...1373	Масло Вода	— HRC 18

нейтральным пламенем газовой горелки, так и в печи с защитной атмосферой.

Термическая обработка способствует увеличению сцепления покрытия, нанесенного электродуговой металлацией. Такие покрытия из углеродистой проволоки при нагреве до температуры 873 К в течение 24 ч увеличивают прочность сцепления на 30...50 %, а при нагреве до 1173 К в течение этого же времени позволяют увеличить величину сцепления почти в 2 раза за счет развития диффузионных процессов. Закалка таких покрытий производится на масло с температурой 1123 К.

Термическая подготовка детали к нанесению гальванического покрытия заключается в ее высоком отпуске перед операцией. Это позволяет увеличить сцепление покрытия с основой и снизить величину остаточных напряжений.

Наиболее эффективным для хромированных деталей является трехкратный отпуск: перед хромированием, после хромирования и после шлифования.

Детали после осталивания нагревают до температуры 573...523 К и выдерживают в течение 0,5...1 ч для частичного устранения водородной хрупкости осадка. Такая термическая обработка практически не снижает твердости покрытия.

После химического никелирования деталь подвергается нагреву до температуры 573 К и выдерживается при этой температуре в течение 1 ч. В покрытии образуются твердые никель-фосфатные соединения, придающие ему особую твердость и прочность. Одновременно улучшается сцепление покрытия с основным металлом.

### 3.5. Химико-термическая обработка восстановленных деталей

Наибольшее распространение при восстановлении деталей получили цементация, нитроцементация, азотирование и борирование. Для придания специальных свойств восстановленным деталям или запасным частям применяется термомодифузионная металлация (алитирование, хромирование, силицирование или многокомпонентное легирование).

Цементируемые детали должны иметь покрытия, обеспечивающие одинаковую термодинамическую активность углерода на границе покрытие—основа с целью избежания зоны разупрочнения в восстановленном элементе. Рекомендации по выбору видов упрочнения восстановленных дета-

лей и электродной проволоки для покрытий под цементацию приведены в табл. 11 и 12.

Для цементации детали обычно поступают после механической обработки с припуском на шлифование 0,05...0,1 мм. При цементации отдельные участки детали, не подлежащие упрочнению, защищают слоем меди толщиной 0,02...0,05 мм, которую наносят электролитическим методом или слоем специальных обмазок из смеси огнеупорной глины, песка и асбеста.

Цементация может проводиться в твердом, жидком или газообразном карбюризаторе. Твердый карбюризатор состоит из древесного угля (каменноугольного полукокса или торфяного кокса), к которому добавлены активаторы: углекислый барий и кальцинированная сода в количестве 10...40 % от веса угля. В качестве жидкого карбюризатора чаще всего применяют метанол. Для газовой цементации применяют как углеводороды, содержащие газы, так и продукты разложения углеводородных жидкостей (керосина, метанола и т. п.).

Технология цементации в твердом карбюризаторе заключается в следующем: подготовленные и очищенные детали укладывают в стальной или чугунный ящик, на дно которого насыпан карбюризатор слоем 20...30 мм. Затем

#### 11. Рекомендации применения упрочняющей технологии при восстановлении деталей

Конструктивные особенности детали	Материал детали	Способ первичного упрочнения	Способ восстановления и упрочнения
Вал или втулка	Низколегированная сталь	Цементация или нитроцементация Закалка ТВЧ	Наплавка в среде углекислого газа (материал наплавки в табл. 12) с последующей цементацией или нитроцементацией и объемной закалкой
	Среднелегированная сталь		
Сложный вал или сложная пластика	Низколегированная сталь	Цементация или нитроцементация  Закалка ТВЧ	Наплавка в среде углекислого газа (материал наплавки в табл. 12), цементация и нитроцементация, закалка ТВЧ Наплавка в среде углекислого газа с последующим низкотемпературным азотированием
	Среднелегированная сталь		

## 12. Выбор материала покрытия под цементацию и нитроцементацию

Материал восстанавли- ваемой детали, сталь	Рациональный материал наплавочной проволоки	Допустимый материал наплавочной проволоки
20 20X	Св-08, Св-12ГС, Нп-25 Св-08Г2С, Св-12ГС	Св-08Г2С Св-18ХГСА, Св-20Х13, Нп-20Х14
18ХГТ	Св-18ХГСА	Св-08Г2С
20ХНР	Св-18ХГСА	Св-08Г2С
12ХНЗА	Св-18ХГСА	Св-08Г2С
65Г	Св-08Г2С	Св-12ГС, Св-10Г2, Св-18ХГСА
45	Св-08, Св-12ГС, Нп-25	Св-08Г2С, Св-10Г2

деталь засыпают карбюризатором так, чтобы над поверхностью детали образовался слой не менее 40...50 мм. Ящик накрывают крышкой и герметизируют огнеупорной глиной. Таким образом подготовленный ящик нагревают до температуры цементации 1183...1203 К. Продолжительность выдержки при такой температуре составляет в среднем 5,5...6,5 ч для диффузионного слоя упрочняемых деталей глубиной 0,6...0,9 мм и 9...14 ч для слоя 1,2...1,5 мм. После цементации ящик охлаждают до температуры 673...773 К и затем раскрывают. Охлажденные детали нагревают повторно и закалывают. Иногда из карбюризатора готовят пасту, обмазывают ею деталь и нагревают токами высокой частоты до температуры 1473...1573 К в течение нескольких минут.

Газовая цементация может осуществляться как локальным способом с помощью факельной или щелевой горелки с восстановительным пламенем или дугой угольных электродов, так и в специальных печах. Преимущество цементации в газовых печах заключается в возможности получения заданной концентрации углерода в слое, сокращении всего цикла термообработки, возможности полной механизации процесса термической обработки. Процесс цементации в шахтных печах продолжается 6...12 ч при температуре 1183...1203 К (толщина слоя 1,0...1,7 мм). Изделия в печь загружаются на специальной подвеске. Необходимая газовая атмосфера создается путем подачи в нагретую до рабочей температуры печь углеводородсодержащих жидкостей (керосина, сентина, спирта и т. п.), которые при этой температуре распадаются на активный углерод и водород.

После окончания процесса науглероживания детали подстуживают до температуры 1073...1103 К и производят их объемную закалку. В отдельных случаях деталь охлаж-

дают до комнатной температуры с последующей закалкой отдельного ее элемента ТВЧ.

Более твердую и износостойкую поверхность получают после процесса нитроцементации, который заключается в одновременном насыщении поверхности углеродом и азотом при 1113...1133 К в газовой среде, состоящей из углероживающего газа и аммиака. Продолжительность процесса 4...10 ч. Толщина нитроцементованного слоя 0,2...0,8 мм и не должна превышать 1,0 мм. При большей толщине слоя в нем образуется темная составляющая и появляются другие дефекты, снижающие механические свойства покрытия.

Для нитроцементации легированных сталей рекомендуется использовать контролируемую эндотермическую атмосферу, к которой добавляют 1,5...5,5 % необработанного природного газа и до 3,5 % аммиака. После нитроцементации следует закалка либо непосредственно из печи с подстуживанием до 1073...1098 К, либо после повторного нагрева. После закалки проводят отпуск при температуре 433...453 К в течение 1,5 ч.

## **4. ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

### **4.1. Классификация оборудования для термической обработки**

Оборудование термических цехов ремонтных предприятий делится на основное, дополнительное и вспомогательное. К основному оборудованию относятся нагревательные печи, установки: индукционного нагрева, приготовления защитных атмосфер, обработки холодом, закалочные баки и др. Вспомогательное — контрольно-измерительная аппаратура, правильные прессы, оборудование очистного отделения, подъемно-транспортное оборудование, вентиляторы, воздуходувки и т. п. Дополнительное оборудование термических цехов: для очистки, травления деталей от окалины, выявления поверхностных дефектов различными способами.

Печи, используемые в термических цехах, классифицируются следующим образом: а) по технологическим признакам: универсальные печи для отжига, нормализации, закалки и высокого отпуска; печи для цементации и азотирования; б) по применяемой температуре: низкотемпера-



турные, среднетемпературные, высокотемпературные; в) по источнику получения теплоты: мазутные, газовые, электрические.

#### 4.2. Основное печное оборудование для термической обработки

Печное оборудование следует выбирать по действующим каталогам, выпускаемым отечественной промышленностью с учетом специфики ремонтных предприятий.

В термических цехах для нагрева мелких и средних деталей применяют камерные печи периодического и непрерывного действия, работающие на жидком и газообразном топливе или с применением электроэнергии. Камерные печи периодического действия широко применяются для отжига, нормализации, закалки, отпуска и цементации. В качестве жидкого топлива используется мазут. Мазут имеет большую вязкость, плохо распыляется и плохо смешивается с воздухом, кроме того, при горении выделяет много дыма. В связи с этим затрудняется автоматизация теплового режима печи и нарушаются санитарно-гигиенические условия в цехе. Поэтому жидкое топливо использу-

#### 13. Технические характеристики установок типа ИЗ

Параметры	ИЗ1-30/8	ИЗ1-1002,4	ИЗ2-100/8
Напряжение питающей сети, В	380	380	380
Число фаз	3	3	3
Частота питающей сети, Гц	50	50	50
Мощность, потребляемая от сети, кВт·А	50	140	140
Мощность средней частоты, кВт	30	100	100
Частота рабочая, Гц	8000	2400	8000
Напряжение, В:			
среднечастотной сети	400	800	800
на индукторе (максимальное)	74	240	240
Величина поверхности закаливаемой детали (максимальная) при одновременной закалке, см <sup>2</sup>	25	200	200
Глубина закаливаемого слоя, мм	1,3...2,5	2,5...10	1,3...5,0
Диаметр нагреваемой детали (минимальный), мм	17	35	19

Параметры	ИЗ1-30/8	ИЗ1 1002.4	ИЗ2-100/8
Расход воды на охлаждение, м <sup>3</sup> /ч*	2,58	7,2	7,2
Расход закалочной жидкости, л/мин	83	До 200	До 200
Давление закалочной жидкости, МПа	0,4.. 0,6	0,4 ..0,6	0,4..0,6
Габаритные размеры (суммарные), мм:			
в плане	3750×1300	5200×2000	5200×2000
высота	2000	2000	2000
Масса установки, кг	2170	4500	4500

\* Вода должна быть чистой, без механических примесей (количество примесей не должно превышать 40 мг/л); жесткость воды не более 3 мг-экв/л, температура охлаждающей воды не должна превышать 298 К, на выходе — 323 К.

ется только при отсутствии газообразного. Среди камерных газовых печей нашли распространение печи со сжиганием топлива непосредственно в рабочем пространстве. В последних конструкциях камерных печей используются контролируемые атмосферы.

На ремонтных предприятиях широко применяются камерные электрические печи СНЗ-2,5,5,0.17/10, СНЗ-4,0,8,0.2,6/10, СНЗ-5,0.10.3,2/12, где «С» — нагрев сопротивлением; «Н» — камерная нагревательная электропечь; «З» — защитная атмосфера. Цифры после букв: в числителе — ширина, длина и высота рабочего пространства, дм; в знаменателе — температура рабочего процесса.

Шахтные печи применяются для различных процессов термической обработки: отжига, нормализации, закалки, высокого и низкого отпуска и химико-технической обработки. Эти печи, имея вертикально расположенную рабочую камеру, позволяют нагревать длинные детали (например, коленчатые валы), а также небольшие детали, размещая их на специальных приспособлениях или в корзинках. Размещение длинных деталей в печи в подвешенном состоянии обеспечивает их минимальную деформацию. Печи размещаются в зоне действия подъемно-транспортных средств: электротельферов, мостовых кранов и т. д. Шахтные печи на единицу площади дают большее количество продукции, чем камерные. Их нагрев производится с использованием жидкого и газообразного топлива и электроэнергии. В пламенных печах для отопления применяется природный

газ или мазут. В них отношение высоты рабочего пространства к диаметру составляет не менее 3. Такие печи имеют индекс ТШОВ при работе с обычной окислительной атмосферой и ТШЭВ при работе с контролируемой атмосферой.

Для удобства обслуживания эти печи обычно устанавливают в прямке на кирпичный или бетонный фундамент так, чтобы верхняя ее часть выступала над уровнем пола на 500...700 мм.

Для химико-термической обработки, газовой цементации, нитроцементации и азотирования восстанавливаемых деталей на ремонтных предприятиях применяют электрические шахтные печи СШЗ-4.8/10, СШО-10.20/7, США-5.7,5/6 и др. («Ш» — шахтная печь, «З» и «О» — соответственно защитная и окислительная атмосферы, «А» — печь азотирования).

Для упрочнения восстановленных и вновь изготавливаемых деталей поверхностной закалкой на ремонтных предприятиях нашли применение машинные генераторы, технические характеристики которых приведены в табл. 13.

### 4.3. Контролируемые атмосферы

Для предохранения стальных деталей от окисления и обезуглероживания, а также для химико-термической обработки широко применяются контролируемые атмосферы, при которых взаимодействие с металлом при нагреве регулируется в нужном направлении. Это снижает потери металла, ликвидирует трудоемкую операцию очистки металла от окалины и увеличивает долговечность деталей машин. Для получения контролируемых атмосфер применяют продукты диссоциации аммиака или частичного его сжигания; генераторный газ, предварительно очищенный от углекислого газа и осушенный для предупреждения обезуглероживания; смесь газов, получаемую частичным сжиганием природного, светильного, коксового и других углеводородных газов. Промышленностью выпускаются специальные эндотермические и экзотермические генераторы. Серийно выпускаемое термическое оборудование для проведения химико-термического упрочнения экономически выгодно лишь при больших программах производства.

Химико-термическое упрочнение, в частности нитроцементация, — высокоэффективный процесс, но он на специализированных ремонтных предприятиях не используется. Это объясняется существенным различием между тех-

нологическими требованиями к процессу нитроцементации новых деталей и восстановленных, а также отсутствием термического оборудования, способного реализовать необходимые требования для восстанавливаемых деталей.

Различие технологических требований обусловлено специфичностью восстанавливаемой детали как объекта химико-термического упрочнения. Восстанавливаемая деталь, содержащая нанесенный на изношенную поверхность слой металлопокрытия, представляет собой по химическому составу и структуре в зоне диффузионного слоя биметалл, состоящий из материалов металлопокрытия и основного металла. Из-за неравномерности износа поверхности восстановления деталь имеет, как правило, локально нанесенное металлопокрытие. Таким образом, при нитроцементации наряду с металлопокрытием повторному насыщению подвергаются неизношенные участки рабочей поверхности, которые наклепываются и вследствие этого приобретают склонность к росту зерна. Металлопокрытие в связи со своей высокой химической и структурной неоднородностью, а для наплавленных слоев и из-за большого содержания С (примерно 1%), также имеет склонность к ускоренному росту зерна, приводящему к растрескиванию поверхностного слоя, и требует сокращения времени выдержки деталей в печи при нитроцементации восстанавливаемых деталей.

При нитроцементации восстанавливаемых деталей насыщение поверхности деталей С и N позволяет получить диффузионный слой с высокими характеристиками лишь при достижении оптимальной концентрации С и N в нем. Причем недопустимые отклонения С и N от оптимальных значений весьма малы. Например, для деталей из стали 25ХГТ допускаемая концентрация С на поверхности желательна 0,75...1,2%, N — 0,1...0,35%.

При концентрации С, равной 1,3%, или N — 0,4% детали выбраковываются из-за появления цементитной сетки и темной составляющей, резко разупрочняющих детали. При недостаточном содержании С и N происходит существенное снижение предела выносливости деталей из-за образования троостита в поверхностном слое. Надежное поддержание концентрации С и N в оптимальных пределах возможно лишь с использованием печной атмосферы, состоящей из смеси газоносителя с контролируемым углеродным потенциалом и регулируемой добавкой аммиака.

Серийно выпускаемое термическое оборудование для проведения нитроцементации в смеси эндогаз—аммиак эко-

номически эффективно лишь при больших программах производства, многократно превышающих специализированные ремонтные предприятия. При упрочнении нитроцементацией восстанавливаемых деталей необходимо проводить процесс диффузионного насыщения слоя, отличающегося по химическому составу и структуре от основного материала восстанавливаемой детали. Наряду с величиной концентрации N и C на поверхности металлопокрытий важную роль для прочностных характеристик деталей играет также глубина диффузионного слоя и распределение C и N в нем, что в значительной степени предопределяет распределение внутренних напряжений.

Для применения нитроцементации восстанавливаемых деталей как упрочняющей операции с учетом вышеизложенных требований выпускается промышленная установка в кипящем слое катализатора для цементации и нитроцементации восстанавливаемых и вновь изготавливаемых деталей (рис. 12).

**Краткая техническая характеристика промышленной установки для цементации и нитроцементации**

Температура нитроцементации, К	1133...1173
Температура цементации, К	1223...1273
Масса садки, кг	До 150
Общая установленная мощность, кВт	40
Расход пропана, Н·м <sup>3</sup> /ч	До 2
Расход аммиака, Н·м <sup>3</sup> /ч	До 0,5
Расход воздуха на образование газовой смеси, Н·м <sup>3</sup> /ч	До 20
Расход воды, Н·м <sup>3</sup> /ч	2
Диаметр реторты, мм	320
Габариты, мм:	
высота	3000
длина	3260
ширина	2300
Масса, кг	3100

В табл. 14 приведены режимы нитроцементации на характер распределения C и N в диффузионном слое.

Использование в рабочем пространстве установки псевдооживленного слоя катализатора позволяет ускорить процесс нагрева упрочняемых деталей в печи в 5...8 раз и сократить продолжительность процесса цементации и нитроцементации более чем в 3 раза, что очень важно для восстанавливаемых деталей.

На рис. 13 приведена схема универсальной установки химико-термического упрочнения деталей. Данная установка позволяет проводить азотирование, цементацию, ни-

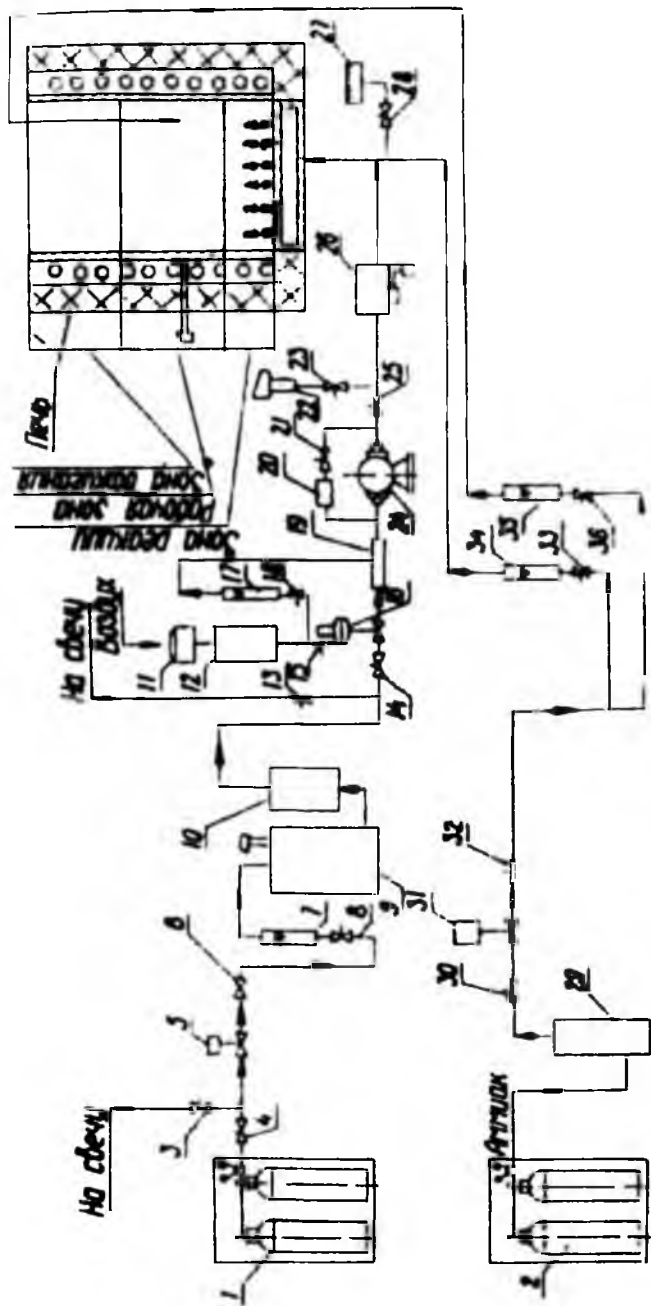


Рис 12 Принципиальная схема промышленной установки

1 — рама пропан-бутановая; 2 — рама аммиачная; 3, 4, 6, 8, 11, 13, 18, 21, 23, 25, 28, 30, 32, 33, 36 — газовые краны;  
 5, 31 — вентили сепарационные; 7, 17, 34, 35 — магистраль; 9 — блок сепарационный; 10 — холодильник; 11 — фильтр воздушный;  
 12 — газушитель; 16 — нуль регулятор; 19 — смеситель; 22 — датчик реле давления; 26 — заслонка газовая; 31 —  
 вентиль; 32 — газушитель; 34 — газушитель; 29 — осушитель

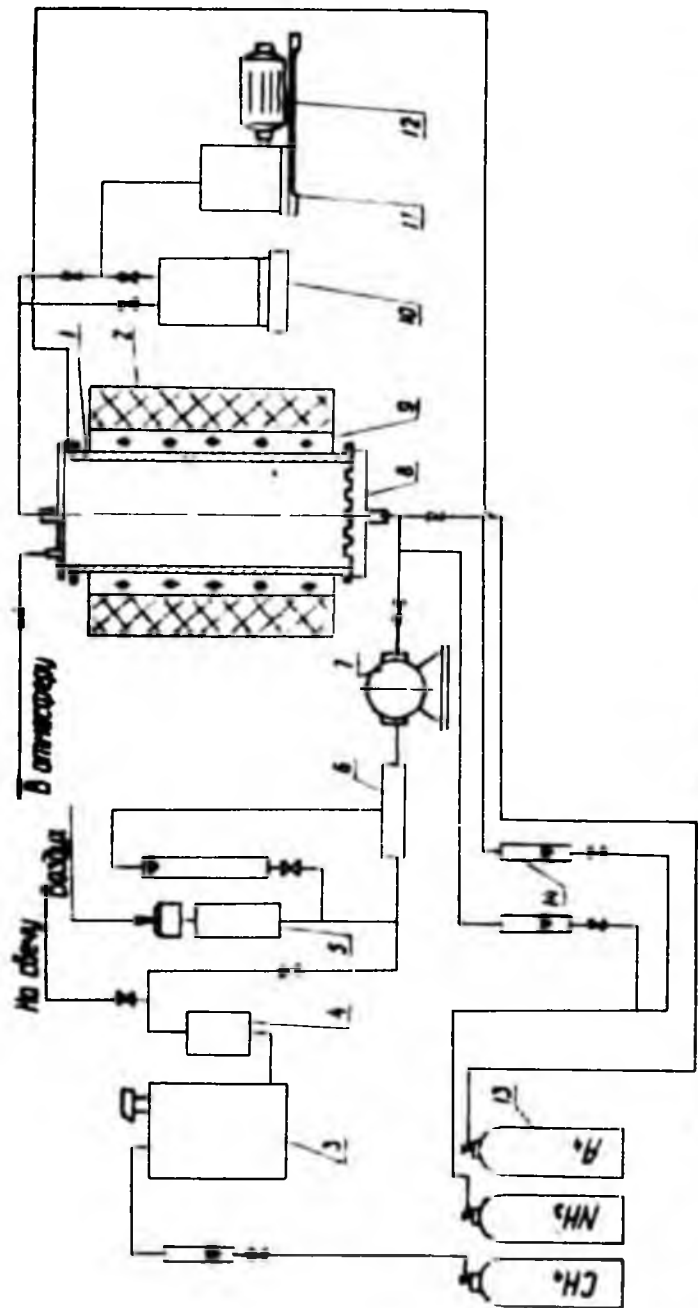


Рис. 13. Схема универсальной установки химико-термического упрочнения сталей:  
 1 — вакуумный насос; 2 — вакуумметр; 3 — печь; 4 — зона нагрева; 5 — зона охлаждения; 6 — термопара; 7 — вакуумный насос; 8 — вакуумметр; 9 — зона нагрева; 10 — вакуумметр; 11 — вакуумметр; 12 — вакуумметр; 13 — вакуумметр; 14 — вакуумметр.

#### 14. Влияние режима нитроцементации на характер распределения С и N в диффузионном слое

Марка стали	Температура нитроцементации, К	Время выдержки над кипящим слоем, ч	Время выдержки в кипящем слое, ч	Содержание азота на поверхности, %	Содержание углерода на поверхности, %	Глубина слоя, мм	Добавка аммиака, %
20Х	1143	1,5	1,5	0,25	0,82	0,75...0,82	7
25ХГМ	1143	1,5	1,5	0,2	0,75	0,81...0,87	6
25ХГТ	1143	1,5	2,0	0,3	0,8	0,85...0,88	6

троцементацию, закалку в контролируемой атмосфере и вакууме, а также ряд процессов поверхностного термодиффузионного легирования (титанирование, борирование, хромирование, силицирование и т. п.), включая процессы, проводимые в вакууме  $10^1 \dots 10^3$  мм рт. ст. при температуре до 1323 К. Термодиффузионному упрочнению предполагается подвергать детали широкой номенклатуры, восстановленные и вновь изготавливаемые. Лабораторные исследования и промышленные испытания подтверждают возможность увеличения износо- и коррозионной стойкости деталей в 3...5 и более раз. Установка предназначена для работы на предприятиях Госкомсельхозтехники, но может быть использована на машиностроительных и ремонтных предприятиях других отраслей.

В качестве сырья для нее применяются сжиженная пропан-бутановая смесь или природный газ. Цементация и нитроцементация проводятся с использованием псевдосжиженного слоя активного катализатора, что позволяет сократить продолжительность цементации или нитроцементации в 3...5 раз и ускорить нагрев деталей в печи в 5...8 раз. Пропан-бутановая смесь поступает в камеру сероочистки, нагретую до 623 К и заполненную специальным серопоглотителем. Затем газ охлаждается в холодильнике и направляется в смеситель, где смешивается с воздухом, поступающим через фильтр и ротаметр. Соотношение расхода воздуха и газа 7,14 : 1. Газовоздушная смесь поступает в газораспределительную решетку только после достижения в реторте рабочей температуры цементации 1193...1233 К. При нитроцементации в газовую решетку из баллона через ротаметр дополнительно подается необходимое количество аммиака (до  $0,5 \text{ Н} \cdot \text{м}^3/\text{ч}$ ).

Поверхностное термодиффузионное легирование проводят в активных засыпках или обмазках, основу которых



составляют легирующий элемент — его соединения или сплав, например, ферротитан, феррохром, окислы легирующих элементов и т. п. Температура в защитной атмосфере или вакууме составляет 1223...1323 К. Установка позволяет производить термодиффузионное легирование с предварительным науглероживанием поверхности деталей после восстановления их размеров.

#### 4.4. Способы и оборудование для очистки деталей после термической обработки

При соприкосновении поверхностей с окислительной газовой средой (обычно с воздухом) в области повышенных, и особенно высоких температур, происходит окисление и обезуглероживание изделий, причем толщина поврежденного слоя с течением времени и повышением температуры увеличивается.

Окалинообразование, распространяясь в глубь поверхности изделий, ухудшает качество, увеличивает общую трудоемкость изготовления изделий за счет очистных операций. Появление окалина на поверхности металла приводит к безвозвратным его потерям. При нагреве деталей в пламенных печах потери на окалину составляют 2...3 %, а нагрев в электрических печах приводит к еще большим потерям металла.

В последние годы широко применяется нагрев в контролируемых и нейтральных атмосферах (эндо- и экзогазе, аргоне и др.), в соляных и свинцовых ваннах, индукционный нагрев и другие способы безокислительного нагрева. Однако эти способы полностью не обеспечивают отсутствие контакта изделий с окислительной средой. Так, при переносе изделий из печи в закалочную ванну образуется небольшой налет окалина. Наибольшее окисление поверхности происходит при нагреве в соляных ваннах и индукционном нагреве. Поэтому, несмотря на то что потребность в очистке деталей благодаря безокислительному нагреву резко снизилась, полностью ликвидировать очистку не удалось, она еще широко применяется в термических цехах. Очистку деталей от окалина и ржавчины производят в основном травлением и дробеструйными аппаратами. Травление выявляет также поверхностные дефекты на деталях (трещины, волосовины и т. д.). Для очистки от масла, солей и грязи детали промывают.

Химическому травлению подвергают детали после термической обработки. Обычно применяют водные растворы серной кислоты (8...12 %-ные) при температуре 313...353 К

и соляной кислоты (10...20 %-ные) при температуре 303...333 К. Продолжительность травления составляет 15...30 мин. Для уменьшения потерь металла в состав травильных ванн добавляют специальные присадки в количестве 0,1...1 % от объема травильного раствора. После травления детали промывают в холодной или подогретой до температуры 333...353 К воде или подвергают нейтрализации в горячем щелочном растворе в течение 5...8 мин.

Механическая очистка деталей производится в дробеструйных установках в виде герметически закрытых барабанов. На поверхность деталей через сопла направляется струя дроби под давлением сжатого воздуха. Для обдувки используют чугунную дробь диаметром 0,5...2 мм или мелко рубленные куски стальной проволоки.

### 15. Состав моющих средств

Компоненты	Содержание компонентов в моющих средствах, %			
	МЛ-51	МЛ 52	Тракторин	Детали
Кальцинированная сода	44	50	32	8
Тринатрийфосфат			11	—
Триполифосфат	34,5	30		12
Жидкое стекло	20	10	53	5
Сульфанол	—	1,8	—	10
ДС-РАС	—	—	1,1,5	—
Смачиватель ДБ	1,5	8,2	—	—
Вода		—	До 100	До 100

Ультразвуковая очистка применяется для очистки и обезжиривания термически обработанных металлических деталей. Под действием ультразвуковых волн в жидкости (состав которых приведен в табл. 15), находящейся в резервуаре, возникают сильные гидравлические удары, которые воздействуют на поверхность деталей и отрывают с нее окалинну, жир, грязь, абразивные частицы. Для ультразвуковой очистки деталей выпускают специальные агрегаты. Режимы ее приведены в табл. 16.

После ультразвуковой очистки производится промывка (обычно в воде) для удаления следов моющей среды и оставшихся загрязнений. После очистки и промывки поверхность металлических изделий склонна к окислению. Для сохранения поверхности металла неокисленной необходимо ее пассивировать.

Мощные акустические поля в ультразвуковых ваннах

## 16. Режимы ультразвуковой очистки

Вид очистки	Режим	Оборудование	Примечание
Очистка изделий сложной формы от продуктов коррозии и других дефектов перед гальванопокрытием	Травление: серная кислота — 100 мг/л; соляная кислота — 50 мг/л; контакт Петрова — 30 г/л; 333°K; выдержка 2 мин; промывка	Генератор УЗГ-10М, ванна из винипласта	Травление в ванне производится одновременно с обезжириванием и удалением дефектов
Очистка изделий из нержавеющей стали после термической обработки	Обезжиривание в бензине. Предварительное травление: азотная кислота 8...10%-ная; фтористый азот — 45 г/л; выдержка 20 мин; промывка. Ультразвуковая очистка: сода — 3%; 323...333°K; выдержка 3 мин	Генератор УЗГ-10М, обычная ванна с преобразователем ПМС-6	Между операциями не должно быть разрыва
Очистка от окалины термически обработанных изделий перед гальванопокрытием	Травление: серная кислота — 100 мг/л; соляная кислота -- 50 мг/л; поваренная соль — 5 г/л; контакт Петрова — 30 г/л; 333 K; выдержка 0,5...5 мин; промывка	Генератор УЗГ-10М, ванна из винипласта	Травление можно производить без ультразвука, но с последующим снятием шлама в воде ультразвуком

очистки создаются при помощи магнитоотрицательных и пьезоэлектрических преобразователей. Наибольшее применение в установках для очистки нашли частоты от 16 до 44 кГц. Диапазон мощностей ультразвуковых преобразователей для очистки находится в пределах от 0,04 до 4,0 кВт.

## 5. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

### 5.1. Дефекты наплавки

Основные дефекты наплавки — трещины в наплавленном слое и в зоне сплавления с основным металлом, поры и раковины, шлаковые включения, несплавления слоя с основным металлом, надрывы и др. Дефекты могут быть внешними, выходящими на поверхность наплавки, и внут-

ренными, располагающимися внутри наплавленного слоя. Внешние дефекты обнаружить относительно легко путем осмотра наплавов, с помощью магнитной дефектоскопии и др. При обнаружении внутренних дефектов пользуются следующими методами контроля: просвечиванием рентгеновскими или гамма-лучами, магнитной или ультразвуковой дефектоскопией, металлографическими исследованиями макро- и микрошлифов и др.

Трещины являются наиболее опасным дефектом наплавов, так как под воздействием быстро изменяющихся нагрузок или тепловых колебаний они могут развиваться, увеличиваться в размерах, что может привести к преждевременному выходу детали из строя. Возникновение трещин зависит от содержания углерода и серы в наплавленном слое металла, от температуры предварительного подогрева детали при наплавке, жесткости детали и пр.

Поры образуются при использовании влажного или отсыревшего флюса, при наличии ржавчины на наплавляемых поверхностях, при недостаточном слое флюса и др. Поры — менее опасный дефект, чем трещины, но они тоже снижают износостойкость и прочность наплавленного металла.

Шлаковые включения чаще наблюдаются при многослойной наплавке. Они являются результатом наплавки по неудаленной или плохо удаленной шлаковой корке с предыдущих слоев. Шлак не успевает расплавиться и всплыть на поверхность металла, вследствие чего остается в металле в виде шлаковых включений.

Несплавление слоя с основным металлом детали может произойти при несоответствии выбранной скорости наплавки и типа оборудования, при неправильной установке электрода, загрязнении наплавляемых поверхностей, нарушении режима наплавки и т. д. Наличие этих дефектов может привести к трещинам или отколу наплавленного слоя в процессе работы восстановленной детали.

При установке наплавленных деталей на машины без последующей механической обработки (ножи бульдозеров, опорные катки тракторов и др.) важным требованием является гладкая поверхность наплавленного слоя. Причиной наплывов и подрезов в наплавленном слое бывает нарушение режима наплавки — силы тока, напряжения дуги, скорости наплавки, смещения электрода с зенита при наплавке цилиндрических деталей, величины вылета электрода и др. Поверхностные дефекты наплавленного слоя могут быть при плохой устойчивости дуги.

## 5.2. Дефекты термической обработки

При нагреве до высокой температуры для закалки, отжига или нормализации прочность металла настолько снижается, что деталь может прогнуться или покоробиться даже под действием собственной массы или под тяжестью других деталей, которые лежат на ней. Тонкие детали удлиненной формы, как, например, валы, оси, следует при нагреве устанавливать вертикально либо подвешивать на приспособлениях. Детали в виде плоских плит, дисков нужно по возможности также помещать в приспособлениях в вертикальном положении.

Трещины при нагреве — сравнительно редкое явление. Они могут возникнуть в основном по двум причинам: во-первых, вследствие неравномерного нагрева и, во-вторых, при чрезмерно большой скорости нагрева, особенно массивных деталей. Равномерность нагрева обеспечивается рациональной системой укладки деталей. Во избежание подстуживания не следует располагать их в непосредственной близости от заслонки печи.

Если детали нагреваются до температуры выше критических точек  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ , то образуется аустенитная структура. По мере дальнейшего повышения температуры зерна аустенита начинают расти, при этом крупные зерна как бы поглощают мелкие. Чем выше температура и длительнее выдержка, тем больше вырастают зерна. При последующем охлаждении с любой скоростью обратного явления (уменьшения размера аустенитного зерна) не происходит. Какую бы структуру ни имел металл после окончательного охлаждения — закаленную, нормализованную или отожженную, все равно последствия крупнозернистости аустенита скажутся в том, что сталь будет иметь пониженную ударную вязкость. В изломе такая сталь будет иметь крупнокристаллическое камневидное строение.

Явление укрупнения зерен аустенита под действием высокой температуры, приводящее в дальнейшем к снижению ударной вязкости, т. е. к повышению хрупкости, называется перегревом стали. Если перегретую сталь быстро охладить, то возникает особая структура, известная под названием видманштеттовой. Вследствие высокой хрупкости такая структура недопустима.

Перегрев — исправимый дефект. Для его устранения необходимо нагреть сталь немного выше критических точек. При этом вновь возникнет мелкозернистая аустенитная структура. Охлаждение можно провести на воздухе.

Таким образом, путем нормализации можно исправить перегрев. Следует, однако, иметь в виду, что не всегда удастся устранить его в полной мере.

При высокой температуре газы, имеющиеся в составе печной атмосферы: кислород, двуокись углерода, пары воды и водород, вступают в реакцию с углеродом, входящим в состав стали, в результате чего поверхность деталей обезуглероживается. Содержание углерода в нижележащих слоях оказывается большим, чем у поверхностей. В этих условиях неизбежно начинается перемещение атомов углерода (диффузия) из нижележащих слоев к поверхности, где происходит контакт с печными газами, и, таким образом, выгорание углерода продолжается. Чем выше температура, тем больше скорость диффузии и степень обезуглероживания.

Хотя обезуглероженный слой обычно бывает небольшим и по глубине не превышает десятых долей миллиметра, однако наличие его в готовой детали приводит к крайне нежелательным последствиям. Содержание углерода в таком слое может снизиться до сотых долей процента, так что структура его будет представлять собой почти чистый феррит. При таком низком содержании углерода слой не закалится и поэтому поверхность детали после закалки будет иметь низкую твердость, прочность и износостойкость. В большинстве случаев это делает детали непригодными к эксплуатации.

### 5.3. Дефекты закалки и их предупреждение

При закалке происходит деформация деталей, которая заключается в изменении их геометрической формы и размеров. При охлаждении вызывается двумя причинами: термическими напряжениями и структурными превращениями.

Основные меры борьбы с деформацией при закалке: применение специальных способов закалки (прерывистая, ступенчатая, изотермическая и др.); правильный выбор закалочной среды в соответствии с маркой стали; применение горячих закалочных сред; правильное погружение деталей в закалочную жидкость; закалка с подстуживанием; местная закалка.

Внутренние напряжения при закалке могут превысить предел прочности стали, в результате чего возникают трещины. Чаще всего трещины возникают на внутренних углах детали, в отверстиях, в местах резких переходов сече-

ний, между близко расположенными выступающими частями. Перегрев стали также увеличивает опасность образования закалочных трещин.

После закалки возникает пониженная твердость деталей. Основные ее причины: недогрев, малая выдержка, обезуглероживание, недостаточная скорость охлаждения.

В результате недогрева конструкционных (доэвтектоидных) сталей получается неполная закалка: в структуре наряду с мартенситом присутствуют участки феррита, что и является причиной пониженной твердости.

Возможны и такие случаи, когда нагрев проведен до требуемой температуры, однако при последующем переносе деталей из печи в закалочный бак допускается значительное подстуживание (например, при слишком большом удалении закалочного бака от печи, особенно при закалке деталей небольших размеров).

При недостаточном времени выдержки внутренний объем детали окажется недогретым до требуемой температуры, тогда в данной стали образуется аустенит и, следовательно, закалка не получится.

Содержание углерода в обезуглероженном слое может снизиться до 0,3...0,2 % и менее, поэтому такой слой не закалится. Твердость поверхности может оказаться даже ниже, чем она была до закалки. Обычно глубина обезуглероженного слоя не превышает нескольких десятых долей миллиметра. Чтобы убедиться, что причиной пониженной твердости после закалки является обезуглероживание поверхности, достаточно зачистить деталь на глубину 0,4...0,5 мм и проверить твердость. Если она окажется выше, чем на незачищенной поверхности, то это верный признак обезуглероживания. При необходимости обезуглероживание легко можно выяснить по микроструктуре.

Причинами недостаточной скорости охлаждения могут быть образование паровой рубашки, неправильный выбор закалочной среды, закалка мелких деталей на приспособлении «навалом».

Неоднородная, или пятнистая, твердость проявляется в том, что после закалки на отдельных участках детали твердость оказывается значительно сниженной (HRC 35...45) по сравнению с другими участками, где величина ее нормальная и составляет HRC 60...62. Такого рода дефект может быть вызван в основном тремя причинами: неравномерным нагревом, неравномерной скоростью охлаждения, неудовлетворительной структурой стали перед закалкой.

#### 5.4. Дефекты закалки с нагревом ТВЧ и их предупреждение

Как и при объемной закалке, деформация связана с неравномерностью нагрева и охлаждения и с увеличением объема стали при росте мартенсита. Неравномерность нагрева при высокочастотной закалке вызывается неодинаковым зазором по окружности между индуктором и нагреваемой деталью. В тех местах, где зазор меньше, нагрев происходит сильнее, что называется явлением близости. Во избежание этого проводят вращение детали при нагреве. Несмотря на то что глубина закаленного слоя в большинстве случаев не превышает 2...3 мм, изменение объема даже в таком небольшом слое может привести к ощутимому нежелательному изменению размеров детали. Если же учесть, что в большинстве случаев увеличение объема при поверхностной закалке происходит в основном в направлении глубины слоя (по диаметру детали), то увеличение диаметра может быть в 3 раза большим и составит 0,01 мм на каждый миллиметр толщины слоя. Наряду с этим при закалке цилиндрических деталей, особенно в тех случаях, когда длина их значительно превышает диаметр, происходит уменьшение длины. Такое уменьшение может достигать 1 % от длины закаленного участка.

Важным преимуществом высокочастотной закалки является то, что изменение объема, связанное со структурными превращениями, а значит, и изменение размеров обрабатываемой детали могут быть точно учтены.

Первопричиной появления трещин при высокочастотной поверхностной закалке, как и при обычной, являются внутренние напряжения. Условия возникновения трещин, их вид и размеры при высокочастотной закалке имеют свои характерные особенности. Поскольку нагреву подвергается только тонкий поверхностный слой металла, то при последующем резком охлаждении он стремится уменьшаться в объеме, но этому будет препятствовать лежащий под ним холодный слой. В поверхностном слое возникнут растягивающие напряжения, приводящие к микротрещинам, которые можно удалить при последующей шлифовке. Возникновению микротрещин способствует неравномерность охлаждения водяным душем, когда разобщенные тонкие струйки воды, попадая на закаливаемую поверхность, создают неоднородное охлаждение. Эффективное средство борьбы с трещинами — охлаждение масляным душем.



## 5.5. Дефекты цементации и их предупреждение

Пониженная толщина цементованного слоя — следствие пониженной температуры процесса или недостаточного времени выдержки. Этот дефект можно исправить повторной цементацией. При нормальной температуре процесса и достаточном времени выдержки пониженная концентрация углерода вызывается недостаточной подачей карбюризатора. Если одновременно наблюдается пониженная концентрация в нем углерода, то наряду с регулированием подачи карбюризатора нужно повысить температуру процесса и увеличить время выдержки.

Повышенная концентрация углерода в слое приводит к образованию в цементованном слое цементитной или карбидной сетки, в результате чего после закалки слой приобретает хрупкость. При газовой цементации регулирование насыщенности цементованного слоя углеродом достигается изменением подачи карбюризатора и регулированием его активности.

Неравномерная толщина слоя может быть вызвана двумя причинами: неравномерным распределением температуры в различных местах печи и неравномерной циркуляцией газов в рабочем пространстве. Если же неравномерность слоя наблюдается в пределах одной и той же детали, то наиболее вероятная причина этого — выделение сажи и закоксовывание деталей.

Неравномерная, пятнистая, цементация и, как следствие, неравномерная твердость после закалки вызываются оседанием сажи на поверхности деталей с последующим ее закоксовыванием, что препятствует науглероживанию при цементации и способствует неравномерному охлаждению при закалке.

## 5.6. Дефекты азотирования и их предупреждение

По температурному режиму азотирование подобно длительному высокому отпуску, при котором снимаются внутренние напряжения. Насыщение детали азотом приводит к увеличению ее удельного объема, поэтому, как и при поверхностной закалке, в азотированном слое возникают большие внутренние сжимающие напряжения. Такие напряжения не всегда бывают уравновешенными, особенно в деталях несимметричной формы, в результате чего возникает коробление.

При возрастании удельного объема азотированного

слоя увеличиваются размеры упрочняемых деталей. Ориентировочно можно принять, что размер детали увеличивается в среднем на 4...6 % от толщины азотированного слоя. Чтобы избежать брака по размерам, необходимо при предварительной механической обработке предусмотреть соответствующее занижение размеров.

Хрупкость азотированного слоя возникает при пересыщении его азотом. На поверхности детали образуется тонкая корочка, состоящая из хрупких нитридов. Хрупкая корочка может быть удалена путем шлифовки толщиной 0,01...0,05 мм. Поверхностная твердость при этом не снижается. Причиной хрупкости могут послужить также крупнозернистость и обезуглероживание стали, вызванные перегревом или длительной выдержкой при предварительной термической обработке — закалке.

Дефект в виде шелушения азотированного слоя наблюдается преимущественно при азотировании высокохромистых сталей. Крупнозернистая структура способствует шелушению.

Возможны три причины пониженной твердости слоя: завышенная температура процесса, приводящая к укрупнению нитридов, следовательно, снижению твердости; крупнозернистая структура, обуславливающая пониженную твердость внутренней части зерен вследствие диффузии азота по границам зерен; обезуглероживание, приводящее к образованию ферритной структуры, в которой нитриды всегда формируются в виде крупных частиц, не обеспечивающих высокой твердости.

Неоднородная по величине твердость в пределах одной детали вызывается неравномерностью величины зерна в стали и попаданием на азотируемую поверхность олова или жидкого стекла.

Пониженная температура процесса и недостаточное время выдержки — основные причины пониженной толщины слоя.

### **5.7. Дефекты цианирования (нитроцементации) и их предупреждение**

При жидкостном цианировании пониженная твердость и толщина цианированного слоя возникают при истощении ванны, а также при недостаточной продолжительности выдержки. Для предупреждения этих дефектов необходимы систематический контроль состава ванны и строгое соблюдение технологического режима.

Хрупкость появляется при длительной выдержке, а также при использовании ванн с повышенной концентрацией цианистых солей. Для снижения хрупкости необходимо нагреть обрабатываемую деталь в селитровой ванне и выдерживать при 823...923 К в пределах 30 мин.

При нитроцементации могут появляться аналогичные дефекты. Пониженная толщина слоя — следствие нескольких причин: пониженной температуры процесса; недостаточного времени выдержки; снижения активности газовой среды вследствие недостаточной подачи аммиака и карбюризатора.

После закалки при нормальной толщине пониженная твердость может получиться из-за недостаточной насыщенности слоя углеродом и азотом или повышенного количества остаточного аустенита при нитроцементации легированных сталей. Уменьшение количества остаточного аустенита достигается подстуживанием перед закалкой и обработкой холодом.

Один из наиболее опасных дефектов — хрупкость слоя возникает при пересыщении его азотом и углеродом. Для предотвращения этого необходимо снизить активность газовой среды путем уменьшения подачи карбюризатора и аммиака или сократить продолжительность выдержки.

Наиболее опасной является дефектная микроструктура слоя в виде темной разорванной сетки. Такой дефект располагается на глубине до 0,15 мм и представляет собой скопление мелких пор, образующихся при пересыщении слоя азотом. В этих условиях образуется молекулярный азот в виде мельчайших пузырьков газа, что и вызывает микротрещины, которые резко снижают эксплуатационные свойства деталей: в несколько раз уменьшается предел выносливости.

## 5.8. Контроль качества деталей

После термической и химико-термической обработки контролируют твердость деталей на приборах Роквелла или Виккерса. Структуру определяют по металлографическим шлифам. Плоские детали, склонные к изменению формы при термической обработке, подвергаются правке. Кривизну плоских деталей проверяют на плите с помощью щупа. Для контроля мелких поверхностных трещин в закаленных деталях распространен магнитный метод (магнитная дефектоскопия).

Поверхностные дефекты можно выявлять люминесцент-

ным методом. По сравнению с методом магнитной дефектоскопии, которым можно обнаруживать дефекты только в магнитных металлах, люминесцентный метод применим для контроля деталей, изготовленных из магнитных и немагнитных металлов. Для обнаружения дефектов, расположенных в деталях на значительной глубине, применяют метод ультразвуковой дефектоскопии. Наличие или отсутствие на закаленной поверхности трооститных пятен определяют макротравлением с помощью «тройного» реактива.

## 6. ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Наплавленный металл восстановленных деталей по своему сечению имеет неоднородные физико-механические свойства, химический состав, микроструктуру, засоренность поверхностных слоев неметаллическими включениями высокой твердости, повышенную пористость наружного слоя металлопокрытия.

Механические свойства наплавленного металла значительно превосходят свойства нормализованной стали, что приводит к иным скоростям резания. Скорость резания уменьшается с увеличением предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (или  $\sigma_s$ ), уменьшением относительного удлинения и восприимчивости к наклепу.

При соотношении пределов прочности нормализованной стали 45 ( $\sigma_B$ ) и наплавленного (например, проволокой Св-08Г2С под флюсом АНК-18) металла скорость резания для металлопокрытия составляет 65 % от скорости резания стали 45.

По сравнению со сталью 45 увеличенная твердость наплавленного металла также приводит к повышенным скоростям резания при его точении.

Влияние скорости резания на чистоту обрабатываемой поверхности показано в табл. 17 и 18.

17. Влияние скорости резания на чистоту обрабатываемой поверхности при точении наплавленного металла и стали 45

Обрабатываемый материал	Высота неровностей Нesk, мкм, скорости, м/мин							
	7,7	9,7	12	20	40	80	100	160
Наплавленный металл	11	15	12	9	6,5	5,2	5,0	5,0
Нормализованная сталь 45	12	16	12,5	10	8,0	5,5	5,0	5,2

## 18. Режимы резания при точении наплавленного металла

Подача, мм/об	Чистовое точение				Черновое точение по «корке» наплавленного металла			
	скорость резания, м/мин, при глубине резания, мм				скорость резания, м/мин, при глубине резания, мм			
	0,25	0,5	0,75	1	1	2	3	4
0,15	138	123	115	110				
0,2	114	104	98	94	46,0	44	42,5	41,5
0,3	77	71	67	65	28,5	27,5	27	26,5
0,4	60	55	53	51	20	19,5	19	18,5
0,5	50	46	44	42	15	14,7	14,5	14,3

## 19. Рекомендуемые условия шлифования хромированных деталей

Шлифовальный круг	Режим резания		
Шлифовальный материал	Электрокорунд белый	Поперечная подача	0,05...0,015 мм (дв. ход стола)
Марка шлифовального материала	24А (ГОСТ 2424—75)	Продольная подача	2...10 мм/об
Зернистость	50—40—11 (ГОСТ 3647—71)	Окружная скорость	20...35 м/с
Степень твердости	СМ-1-С1 (ГОСТ 1818—72)	То же	Не менее 10 м/мин
Структурная связь	5—12 Керамическая К-5	Количество смазочно-охлаждающей жидкости	15...30 л/мин
Рабочая скорость	35 м/с		
Класс неуровненности	1 (ГОСТ 3060—75)		
Класс точности	АА		

## 20. Режимы механической обра

Обрабатываемый материал	Микротвердость, Н/мм <sup>2</sup>	Материал инструмента	Скорость резания, мм/об	Подача, мм/об
Электролитическое железо	2000...2500	Т30К4, УМ332	35...40	0,1...0,15
Электролитическое железо	4800...5200	Эльбор	300...400	0,05...0,07
		Т30К4, УМ332	45...50	0,1...0,15
		Эльбор	300...400	0,05...0,07

Из приведенных данных следует, что при точении наплавленного металла и стали 45 с возрастанием скорости резания высота неровностей сначала увеличивается, достигая максимума, затем непрерывно уменьшается и в зоне скоростей 100 м/мин стабилизируется и становится постоянной, практически одинаковой как для наплавленного металла, так и для стали 45.

При чистовом точении целесообразно применять резцы, оснащенные пластинками твердого сплава ВК-3, ВК-8, Т14КВ, Т30К4, при черновом — ВК-6, ВК-8, Т5К10, Т14КВ, Т15К6Т. Лучшие результаты при чистовом точении показывают резцы, имеющие передний угол  $\gamma = -10^\circ$ , задний угол  $\alpha = 12^\circ$ ; при черновом  $\gamma = -15^\circ$ ,  $\alpha = 12^\circ$ . Лучшие результаты получаются при доводке инструмента кругом из синтетических алмазов (например, АЧК200×10××ЗАС012÷51-100 при работе на следующих режимах: окружная скорость — 15 м/с, глубина шлифования — 0,01 мм/дв. ход. Шероховатость поверхности находится в пределах  $Ra = 2,5 \div 0,63$  мкм.

Перед механической обработкой резанием целесообразно применять нагрев наплавленных поверхностей. При этом прочность и твердость их снижаются, пластичность повышается, что благоприятно сказывается на процессе обработки резанием. При нагреве сормаита выше 773 К он начинает снижать твердость. Например, при 1073 К сормайт имеет твердость НВ-170; при 1173 К — НВ-120 и при 1273 К — НВ-77. При этом сила резания и потребляемая мощность снижаются почти в 1,5...1,8 раза по сравнению с обработкой ненагретых наплавленных поверхностей. Кратковременный нагрев не вызывает значительных изменений в материале наплавленного слоя изделия.

Шлифовка — наиболее распространенный вид чистовой обработки восстанавливаемых деталей при получении точ-

#### ботки электролитического железа

Глубина резания, мм	Стойкость реза, мин	Геометрические параметры режущего инструмента					
		$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$\lambda^\circ$	$\varphi^\circ$	$\psi^\circ$	$r_1$ , мм
0,2	8 10	-10	5	-5	60	30	1,5
0,2	60...90	-15	5	+5	45	10	1,0
0,2	15...20	-10	5	+15	45	30	1,0
0,2	90...120	-15	5	+15	45	10	1,0

ности 6, 7 и 8 квалитетов и шероховатости поверхности порядка  $Ra=0,2...0,6$  мкм.

Детали, восстановленные гальваническим хромированием, шлифуют кругами из белого электрокорунда на керамической связке с зернистостью 40...25 и твердостью  $CM1...CM2$  с окружной скоростью шлифовального круга 25...45 м/с.

Восстановленные детали с твердостью свыше 50...55 HRC целесообразно шлифовать алмазными кругами на станках с повышенной точностью.

В табл. 19 приведены условия шлифования хромированных деталей, при выполнении которых образование поверхностных трещин исключено.

Обработка электролитического железа резанием отличается от обработки обычных углеродистых сталей.

Особенностью мягких осадков является то, что они насыщены включениями гидроокиси в значительно большей степени, чем твердые осадки. Обработку покрытий рекомендуется производить резцом, оснащенным пластинкой металлокерамического твердого сплава Т30К4 или минералокерамической пластинкой ЦММ 332.

При обработке электролитического железа применяется режущий инструмент, оснащенный пластинками из сверхтвердого металла эльбора, не имеющего химического сродства с обрабатываемым материалом. Этот инструмент используется при обязательной заточке и доводке режущих граней шлифовальным кругом АЧК-200×10×3А12-Б1-100 из природных алмазов. Шероховатость поверхности после обработки покрытий эльборовым резцом находится в пределах  $Ra=0,63...0,08$  мкм.

## ЛИТЕРАТУРА

- Воловик Е. Л.* Справочник по восстановлению деталей. — М: Колос, 1981. — 350 с.
- Гуляев А. П.* Металловедение. — 5-е изд., перераб. — М: Металлургия, 1978. — 646 с.
- Думов С. И.* Технология электрической сварки плавлением. — Л.: Машиностроение, 1978. — 366 с.
- Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П.* Металловедение. — 2-е изд., перераб. — М.: Машиностроение, 1980. — 493 с.
- Лившиц Л. С.* Металловедение для сварщиков. — М.: Машиностроение, 1979. — 253 с.
- Николаев Е. Н.* Термическая обработка металлов и оборудование термических цехов. — М.: Высш. шк., 1980. — 192 с.
- Райцес В. Б.* Термическая обработка. — М.: Машиностроение, 1980. — 192 с.
- Самохоцкий А. И., Парфеновская Н. Г.* Технология термической

работки металлов. — 2-е изд., перераб. — М.: Машиностроение, 1976. — 310 с.

Справочник сварщика /Под ред. В. В. Степанова. — 4-е изд., перераб. — М.: Машиностроение, 1983. — 560 с.

Термическая обработка в машиностроении: Справочник /Под ред. М. Лахтина и А. Г. Рахштадта. — М.: Машиностроение, 1980. — 12 с.

*Фиргер И. В.* Термическая обработка сплавов. — Л.: Машиностроение, 1982. — 303 с.

Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник. Под ред. Л. С. Ляховича. — М.: Metallургия, 1981. — 423 с.

*Шубин Р. П., Гринберг Л. М.* Нитроцементация деталей машин. — М.: Машиностроение, 1975. — 206 с.



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Основы металловедения и термической обработки . . .</b>	<b>3</b>
1.1. Кристаллическое строение и свойства металлов . . .	3
1.2. Кристаллизация . . . . .	8
1.3. Строение сплавов . . . . .	13
1.4. Диаграмма состояния . . . . .	16
1.5. Диаграмма состояния железо-углерод . . . . .	22
1.6. Основы термической обработки . . . . .	25
1.7. Виды термической обработки . . . . .	32
<b>2. Основные способы восстановления деталей . . . . .</b>	<b>36</b>
2.1. Сварка и наплавка при восстановлении деталей . . . . .	36
2.2. Восстановление деталей электролитическими и химическими покрытиями . . . . .	41
2.3. Восстановление деталей металлизацией . . . . .	49
<b>3. Практика применения термической обработки при восстановлении деталей . . . . .</b>	<b>52</b>
3.1. Технологические свойства термообрабатываемых деталей . . . . .	52
3.2. Охлаждающие среды для закалки . . . . .	55
3.3. Нагрев деталей . . . . .	57
3.4. Термическая обработка восстановленных деталей . . . . .	58
3.5. Химико-термическая обработка восстановленных деталей . . . . .	60
<b>4. Термическое оборудование для ремонтного производства . . . . .</b>	<b>63</b>
4.1. Классификация оборудования для термической обработки . . . . .	63
4.2. Основное печное оборудование для термической обработки . . . . .	64
4.3. Контролируемые атмосферы . . . . .	66
4.4. Способы и оборудование для очистки деталей после термической обработки . . . . .	72
<b>5. Пути повышения качества восстановленных деталей . . . . .</b>	<b>74</b>
5.1. Дефекты наплавки . . . . .	74
5.2. Дефекты термической обработки . . . . .	76
5.3. Дефекты закалки и их предупреждение . . . . .	77
5.4. Дефекты закалки с нагревом ТВЧ и их предупреждение . . . . .	79
5.5. Дефекты цементации и их предупреждение . . . . .	80
5.6. Дефекты азотирования и их предупреждение . . . . .	80
5.7. Дефекты цианирования (нитроцементации) и их предупреждение . . . . .	81
5.8. Контроль качества деталей . . . . .	82
<b>6. Особенности механической обработки восстанавливаемых деталей . . . . .</b>	<b>83</b>
Литература . . . . .	86

20 к.