

Кафедра машиностроения

Л.Н. Курдюмова, Л.Ю. Фроленкова

## УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Часть 2

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ

Дисциплина – «Упрочняющие технологии и покрытия»  
Специальность – 15.05.01 «Проектирование технологических  
машин и комплексов»

Орёл  
ОГУ имени И.С. Тургенева  
2020

Авторы: канд. техн. наук,  
доц. каф. машиностроения Л.Н. Курдюмова  
д-р техн. наук, доц.,  
зав. каф. машиностроения Л.Ю. Фроленкова

Рецензент: канд. техн. наук,  
доц. каф. машиностроения С.Н. Злобин

В методических указаниях кратко изложены теоретические основы, необходимые для подготовки к лабораторным работам и их выполнения, содержится справочный материал и требования к оформлению отчета.

Предназначены студентам, обучающимся по специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов», изучающим дисциплину «Упрочняющие технологии и покрытия».

Редактор И.Ю. Куликов  
Технический редактор О.Н. Федоров

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Подписано к печати 04.08.2020 г. Формат 60×90 1/16.

Усл. печ. л. 1,9. Тираж 10 экз.

Заказ №\_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета  
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Введение .....	4
Лабораторная работа № 1.	
Упрочнение стали методом поверхностной закалки .....	5
Лабораторная работа № 2.	
Упрочнение стали методом химико-термической обработки .....	10
Лабораторная работа № 3.	
Влияние холодной пластической деформации на микроструктуру и твердость стали .....	22
Литература .....	28
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	30
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	11

## **ВВЕДЕНИЕ**

Методические указания по выполнению лабораторных работ разработаны с целью оказания помощи студентам при изучении дисциплины «Упрочняющие технологии и покрытия» и приобретения практических навыков работы на исследовательской аппаратуре.

Процесс выполнения лабораторных работ по данной дисциплине направлен на формирование и развитие у студентов общекультурных и профессиональных компетенций.

В каждой лабораторной работе изложены основы теоретических сведений, необходимые для понимания сущности рассматриваемого вопроса, указываются материалы и оборудование, порядок выполнения работы и схема оформления отчета. Кроме того, даны контрольные вопросы для самопроверки.

При подготовке к лабораторной работе студент может использовать конспект лекций, учебную литературу и данные методические указания.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ

**Цель работы:** ознакомление с возможностью упрочнения стали методом поверхностной закалки, изучение одного из способов определения прокаливаемости стали – метода торцевой закалки.

### Теоретические сведения

Сущность поверхностной закалки состоит в том, что поверхностные слои заготовки быстро нагреваются до температуры закалки, а затем охлаждаются со скоростью выше верхней критической. Основное назначение поверхностной закалки: повышение твердости, износостойкости и предела выносливости поверхности при сохранении вязкой сердцевины.

**Основные понятия о прокаливаемости.** Прокаливаемость – это способность стали закаливаться (образовывать мартенситную структуру) на определенную глубину. При закалке реальная скорость охлаждения по сечению детали ( $v_{\text{охл}}$ ) неодинакова: на поверхности она максимальная, а в сердцевине – минимальная. Если  $v_{\text{охл}} > v_{\text{в.к.}}$ , то аустенит превращается в мартенсит. Если  $v_{\text{в.к.}} < v_{\text{охл}} < v_{\text{б.к.}}$ , то только часть аустенита перейдет в мартенсит, остальной объем металла приобретет структуру ферритно-цементитной смеси – троостита. При  $v_{\text{охл}} < v_{\text{б.к.}}$  весь аустенит превращается в ферритно-цементитную смесь. Сталь в этом случае не закалится.

Глубина закаленного слоя, т.е. прокаливаемость, увеличивается по мере снижения критической скорости закалки. Для стали с определенной критической скоростью закалки прокаливаемость увеличивается с повышением реальной скорости охлаждения (рис. 1.1).

Как видно из рис. 1.1, закалка образца 1 осуществляется в кольцевом слое (заштрихованная зона). В образце 2 с более высоким значением  $v_{\text{к2}}$  закалится более тонкий слой. В образце 3  $v_{\text{к3}} = v_{\text{охл}}$  в сердцевине наблюдается сквозная закалка.

На практике за глубину закаленного слоя принимают расстояние от поверхности детали до слоя с полумартенситной структурой (50 % мартенсита и 50 % троостита). Твердость этой зоны зависит от содержания углерода (рис. 1.2).

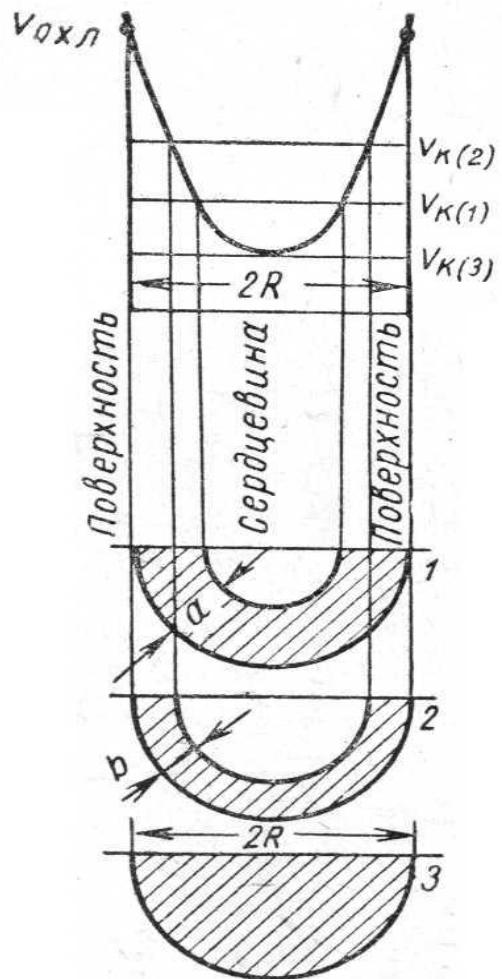


Рис. 1.1 – Зависимость прокаливаемости от величины критической скорости закалки (штриховкой показана глубина закаленного слоя)

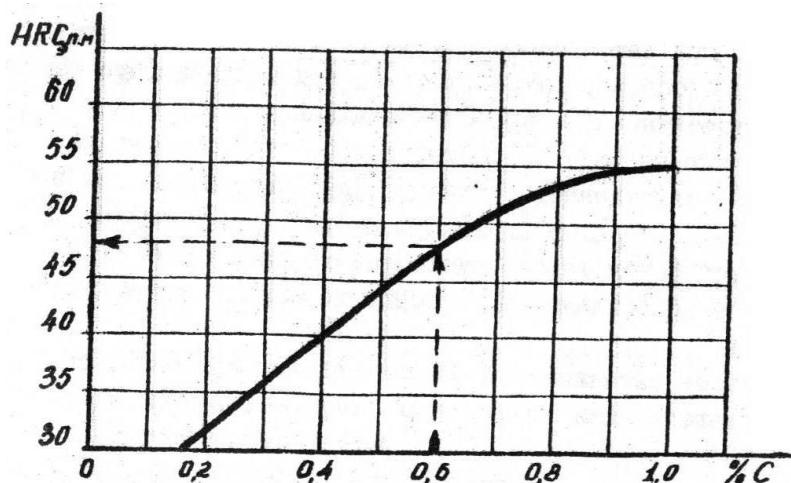


Рис. 1.2 – Зависимость твердости полумартенситной структуры от содержания углерода

Для определения прокаливаемости слали широко применяется метод торцевой закалки. Сущность метода заключается в том, что стандартный образец нагревают в печи до температуры закалки, а затем быстро переносят в специальную установку, где он охлаждается струями воды только с торца. При таком способе реальная скорость образца по его длине изменяется: у водоохлажденного торца она максимальная, а затем понижается, поэтому по сечению образца микроструктура формируется различная. Твердость закаленного таким образом образца измеряется через небольшие отрезки (например, через 2 мм) до полумартенситной зоны. По полученным значениям можно построить характеристическую кривую и узнать прокаливаемость стали. Например, для стали с 0,6 % С полумартенситная твердость – 48HRC.

Существует определенная зависимость между термокинетическими диаграммами для стали и результатами торцевой пробы (рис. 1.3).

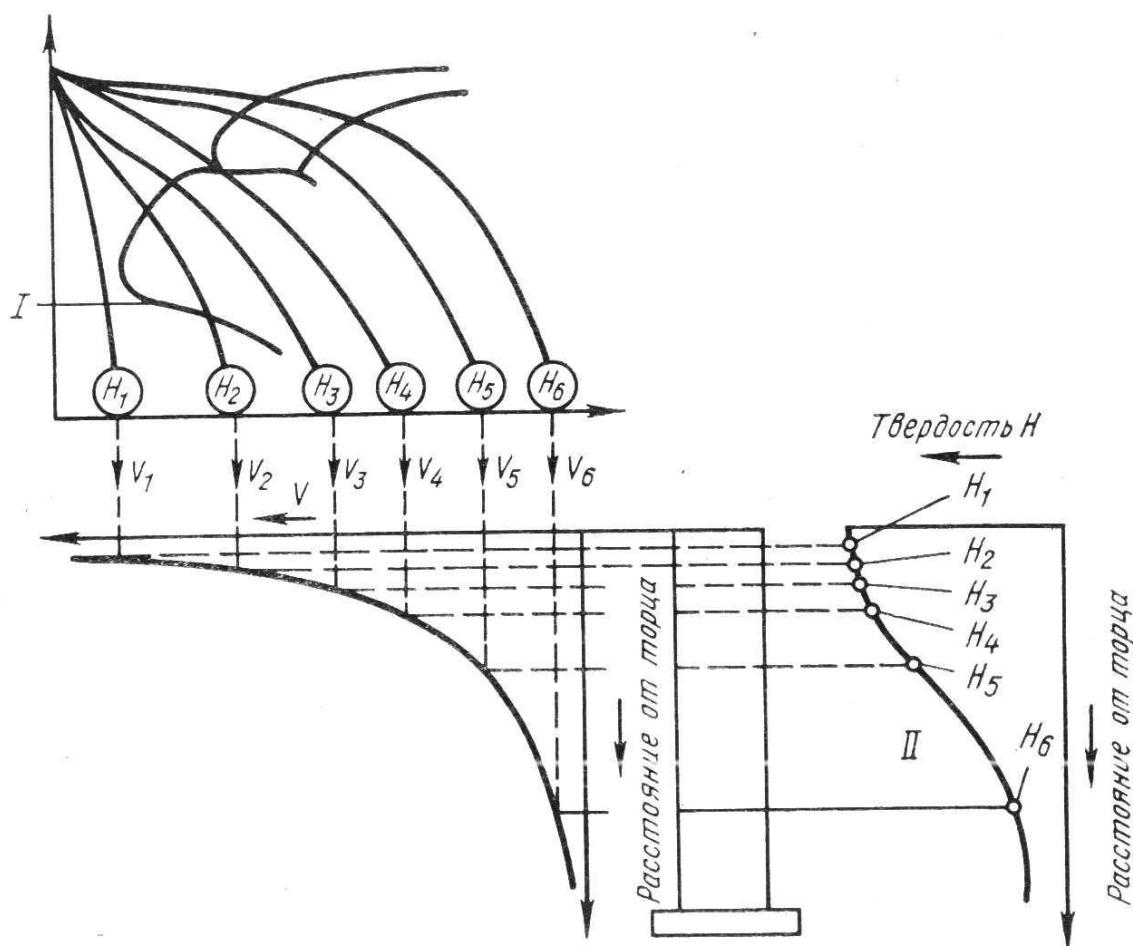


Рис. 1.3 – Зависимость между скоростью охлаждения и твердостью торцевой пробы

## **Материалы и принадлежности**

- По одному стандартному образцу двух марок стали, углеродистой и легированной с одинаковым содержанием углерода (например, сталь 40 и 40Х);
  - Печь лабораторная;
  - Установка для торцевой закалки;
  - Твердомер ТК с алмазным наконечником;
  - Напильник.

## **Порядок выполнения работы**

Получить образцы и ознакомиться с исходными данными: химическим составом, структурной группой, критическими точками, размерами и формой образцов.

Загрузить образцы в печь, нагретую на  $50^{\circ}\text{C}$  выше точки  $A_{c3}$ . Выдержать в печи около 30 минут (из расчета 1 мин на 1 мм минимального сечения образца).

Включить воду в установку для торцевой закалки.

Перенести нагретый образец из печи в установку для торцевой закалки. Образец охлаждать 10 – 15 мин. Затем так же обработать второй образец. Охлажденный образец зачистить напильником (сделать плоскую площадку для замера твердости).

Измерить твердость HRC по образующей образца через каждые 2 мм.

Построить график зависимости твердости от расстояния от торца для данных марок стали (две кривые на одном графике). По графику (рис. 1.2) определить твердость полумартенситной структуры HRC.

Зная значение полумартенситной твердости, на экспериментальных кривых определить характеристическое расстояние  $l_x$  для обеих марок стали.

По характеристическому расстоянию с помощью номограмм (приложение В) можно определить критические диаметры для деталей различной формы и размеров, охлаждаемых при закалке погружением в разные среды.

Номограммой пользуются следующим образом. Пусть, по данным торцевой пробы, характеристическое расстояние – 6 мм. Требуется определить  $D_{kp}$  при охлаждении в воде и масле шара и цилиндра. На шкале "Расстояние от закаливаемого торца до зоны М+Т" находят де-

ление 6 и опускают перпендикуляр до пересечения с линией "идеальное охлаждение" (точка *a*). Из этой точки проводится горизонтальная линия влево до пересечения с линиями "вода" (точка *b*), "масло" (точка *c*). От этих точек опускают перпендикуляр на шкалы "шар" и "цилиндр", и читается ответ: для шара  $D_k = 40$  мм, для цилиндра – 27 (в воде), а в масле: для шара – 25 мм, цилиндра – 17 мм.

Исходя из химического состава стали, объяснить разницу в проектируемости углеродистой и легированной стали.

Оформить отчет.

## Контрольные вопросы

1. Какой вид термической обработки называют закалкой?
2. Какова структура закаленной стали?
3. Что такое верхняя критическая скорость закалки?
4. Что такое нижняя критическая скорость закалки?
5. Что понимают под проектируемостью стали?
6. От чего зависит твердость полумартенситной зоны?
7. Что влияет на проектируемость стали?
8. Как определяют критический диаметр по проектируемости?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ МЕТОДОМ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**Цель работы:** изучение микроструктуры и твердости стали после диффузионного насыщения углеродом, азотом, хромом, ознакомление с методикой определения глубины диффузионного слоя.

#### **Теоретические сведения**

К методам упрочнения с изменением химического состава и структуры поверхности сплавов относится химико-термическая обработка (ХТО). Она заключается в насыщении поверхностного слоя изделия различными атомами различных элементов при высокой температуре. В зависимости от насыщающего элемента различают следующие разновидности химико-термической обработки: цементация, азотирование, нитроцементация (цианирование), борирование, диффузионная металлизация (алитирование, хромирование, силицирование и т.д.). Общим для всех видов поверхностного упрочнения является повышение твердости поверхностного слоя. Выбор метода поверхностного упрочнения изделия зависит от условий ее эксплуатации, формы, размеров, марки выбранной стали и других факторов.

**Цементация** – это диффузионное насыщение поверхности стали углеродом с целью повышения твердости, износостойкости, контактной прочности, усталостной прочности при сохранении относительно мягкой и вязкой сердцевины.

Этот процесс проводится при температурах выше точки  $A_{c3}$  (930 – 950 °C), когда аустенит находится в устойчивом состоянии и растворяет углерод в больших количествах. В качестве карбюризатора применяют природный газ, керосин, пиробензол, древесный уголь и другие богатые углеродом вещества. Вязкость сердцевины обеспечивается применением низкоуглеродистых не закаливающихся сталей, содержащих углерода менее 0,25 %. Для изготовления деталей, подвергаемых цементации, могут применяться как качественные низкоуглеродистые углеродистые, так и низкоуглеродистые низколегированные легированные стали, которые не закаливаются, чтобы сердцевина оставалась вязкой.

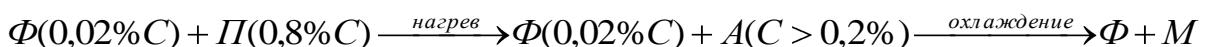
Время выдержки в процессе насыщения поверхности стали углеродом зависит от того, диффузионный слой какой глубины необходимо

димо получить. В обычных камерных или шахтных печах образуется за один час приблизительно 0,1 мм слоя.

Оптимальное содержание углерода на поверхности после процесса цементации должно составлять 0,8–1,0 % во избежание хрупкости из-за присутствия в структуре цементита вторичного. При этом содержание углерода постепенно уменьшается от 0,8 - 1,0 % в поверхностном слое до 0,1 - 0,25 % в сердцевине. В соответствии с этим изменяется и микроструктура стали по сечению изделия. В поверхностном слое, содержащем углерода более 0,8 % С, структура будет перлитно-цементитная (заэвтектоидная зона). В слое, содержащем 0,8 % С структура будет перлитной (эвтектоидная зона). К эвтектоидной зоне прилегает слой с ферритно-перлитной структурой (доэвтектоидная зона), причем чем ближе к сердцевине, тем больше будет феррита. В сердцевине, не подверженной науглероживанию, сохранится исходная структура нецементованной стали. На практике диффузионный (насыщенный) слой может состоять из трех зон, если в поверхностном слое углерода более 0,8 % углерода, из двух (эвтектоидная и доэвтектоидная), если в поверхностном слое 0,8 % углерода, и из одной (доэвтектоидной), если углерода в поверхностном слое менее 0,8 %.

Следует иметь в виду, что цементация обеспечивает только благоприятное распределение углерода по сечению детали, а окончательные свойства сталь приобретает после термической обработки – закалки и низкого отпуска.

После закалки в поверхностном насыщенном углеродом слое получают структуру мартенсит или мартенсит с избыточными карбидами. Так как мартенсит высокоуглеродистый, твердость его не менее 60 HRC. В сердцевине, содержащей мало углерода, структура будет зависеть от температуры закалки. Если температура закалки лежит выше точки  $A_{c3}$ , то сердцевина не закалится, в ней сохранится ферритно-перлитная структура с весьма низкой твердостью (~ 150 - 170 HB). Если температура закалки будет лежать в межкритической области, т.е. превысит только точку  $A_{c1}$ , то сердцевина получит структуру феррит и мартенсит (неполная закалка). Схема изменения структуры сердцевины при неполной закалке приведена ниже.



Твердость сердцевины повысится до 25 - 35 HRC, но будет значительно ниже твердости поверхностного слоя, имеющего структуру высокоуглеродистого мартенсита.

В легированных сталях в сердцевине могут получаться и другие структуры: бейнит, низкоуглеродистый мартенсит и др. Они обладают более высокой твердостью и прочностью, чем феррито-перлитная структура, но все же имеют твердость значительно ниже, чем поверхностный слой.

Диаграмма состояния сплавов системы Fe – Fe<sub>3</sub>C и график изменения твердости по глубине (после закалки) представлены на рис. 2.1.

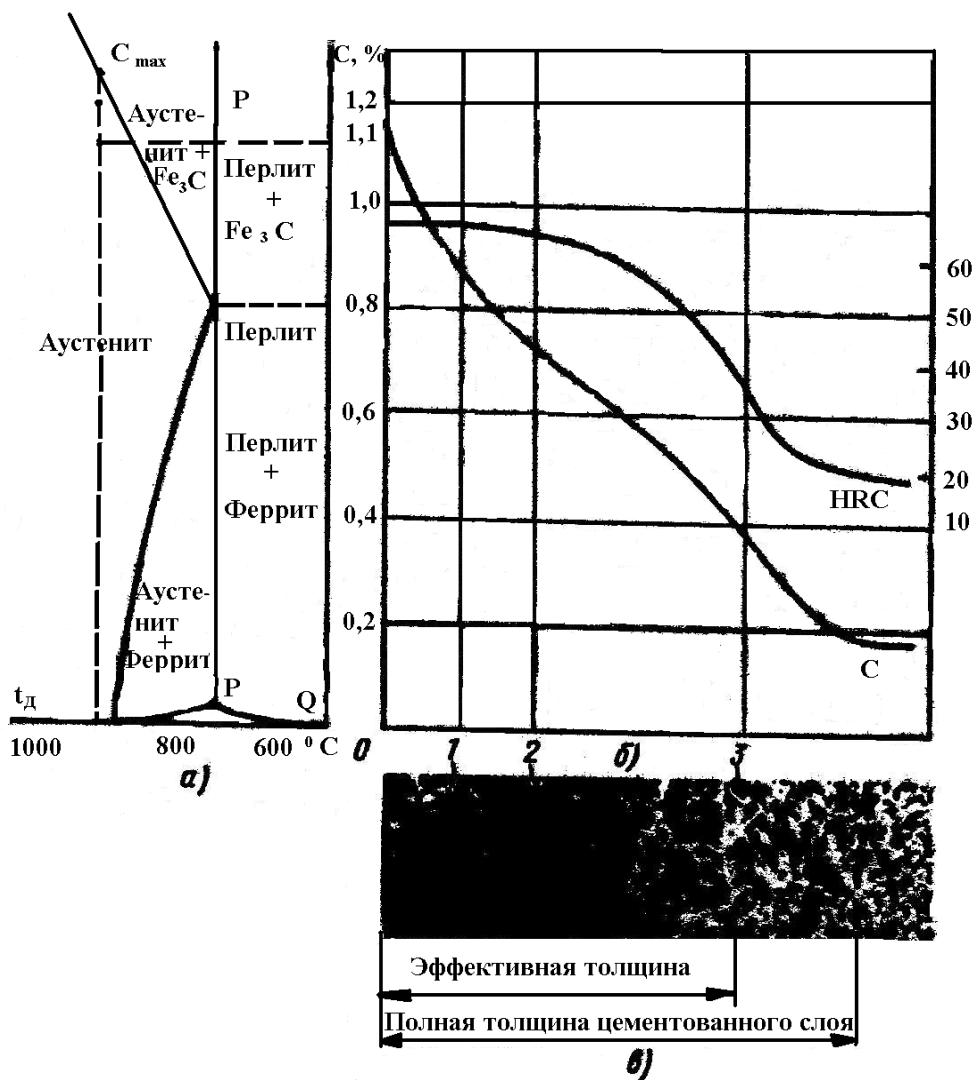


Рис. 2.1 – Зависимость твердости от содержания углерода по глубине цементованного слоя

**Азотирование** – это процесс ХТО, заключающийся в насыщении поверхностного слоя азотом с целью получения в нем нитридов железа и легирующих металлов для повышения износостойкости,

усталостной стойкости, коррозионной стойкости и теплоустойчивости.

В настоящее время азотирование является одним из эффективных и распространённых методов упрочнения в различных отраслях машиностроения. Среди достоинств необходимо отметить высокую твёрдость (до 1300 HV), которая достигается без закалки; незначительную по сравнению с другими методами упрочнения деформацию деталей; теплостойкость поверхностного слоя до 500–600 °C, высокую износстойкость, коррозионную стойкость (особенно в атмосфере); высокую усталостную выносливость. По микротвёрдости азотирование уступает только борированию, в то же время превосходя цементацию и нитроцементацию (незначительно).

К недостаткам метода относятся большая длительность процесса насыщения (до 100 ч), необходимость применения специальных сталей, низкая по сравнению с цементованными деталями контактная прочность, хрупкость поверхностного слоя и пониженная вязкость азотированных деталей.

Азотирование заключается в насыщении поверхностного слоя азотом в среде диссоциированного аммиака при температурах от 500 °C до 1200 °C. В результате азотирования сталь приобретает на поверхности высокую твёрдость, не изменяющуюся при нагреве до 400–450 °C, низкую склонность к задирям, износстойкость, коррозионную стойкость.

Диффузия азота в поверхностный слой, так же как и диффузия углерода, проходит по механизму внедрения. Перемещение атомов азота в кристаллической решётке металла происходит под действием разницы концентраций, и в результате образуется твёрдый раствор внедрения азота в междоузлиях кристаллической решётки металла-растворителя. При достижении предельной концентрации азота в твёрдом растворе  $\alpha$ - или  $\gamma$ -железа из него под действием реакционной диффузии начинают выделяться нитриды железа. В связи с наложением этих двух вариантов диффузионного процесса поглощение азота поверхностью детали протекает весьма активно, что способствует быстрому нарастанию его концентрации в тонком поверхностном слое. Наивысшая поверхностная твёрдость азотированного слоя получается при насыщении в области существования  $\alpha$ -железа. Поэтому температура азотирования часто находится в пределах от 480 до 580 °C. Азотирование при таких температурах называют низкотемпературным азотированием.

В результате диффузии азота в соответствии с диаграммой железо-азот первоначально образуется азотистый феррит –  $\alpha$ -фаза с 0,11 %N при небольших выдержках.

При азотировании легированных сталей легирующие элементы увеличивают растворимость азота в  $\alpha$ -фазе и  $\gamma$ -фазе (азотистый аустенит). Кроме того, могут образоваться фазы:  $\gamma$  -фаза – твёрдый раствор на основе нитрида  $Fe_4N$  (до 0,11 %N) при температуре 590 °C;  $\epsilon$ -фаза – твёрдый раствор азота в нитриде  $Fe_{2-3}N$  (до 11 %N) и нитриды  $Fe_2N$  с ромбической решёткой (до 11,08 %N) и твёрдостью HV = 11000–12000 МПа. При выдержке 30–36 часов по достижении предела насыщения  $C_{max}^{\alpha}$  на поверхности образуется слой нитридов. Толщина слоя  $\epsilon$ -фазы зависит от азотного потенциала среды. Все фазы содержат кроме азота углерод, то есть являются карбонитридными.

Наличие в стали легирующих металлов с более активным, чем у железа, сродством к азоту приводит к образованию специальных нитридов этих элементов. Наиболее сильно повышает твёрдость азотированного слоя алюминий, молибден и хром, а титан, ванадий, вольфрам – в меньшей степени. Мелкодисперсные нитриды этих элементов повышают общую твёрдость поверхностного слоя и блокируют плоскости скольжения. В связи с этим одной из самых распространённых сталей, применяемых при азотировании, является 38ХМЮА. Широкое распространение нашли также среднеуглеродистые легированные стали такие как 30Х3ВА, 40ХМ, 30Х2Н2ВА.

Стали с содержанием углерода выше 0,4 % редко подвергают азотированию из-за увеличения энергии активации процесса диффузии и резкого снижения коэффициент диффузии азота при увеличении содержания в стали углерода.

Детали перед азотированием подвергают термической обработке. Обычно применяют улучшение, включающее закалку и последующий высокий отпуск, или только высокому отпуску, с температурой нагрева на 30–50 °C выше температуры последующего азотирования. Это позволяет сохранять полученную структуру сердцевины в процессе азотирования и избежать последующей термообработки.

При подготовке деталей под азотирование необходимо очистить поверхности детали от масляных загрязнений и окисной плёнки, которые препятствуют диффузии азота вглубь поверхности.

*Газовое азотирование* является наиболее распространённым видом процесса азотирования. Детали помещают в металлические ящики-муфели, которые устанавливают в нагревательной печи. В муфель

подаётся газообразный аммиак. При температуре выше 400 °С начинается процесс частичной диссоциации аммиака, в результате чего выделяется атомарный азот по реакции



В результате образуется насыщающая атмосфера, состоящая из атомарного азота, водорода и недиссоциированного аммиака. В условиях повышенной температуры атомарный азот диффундирует вглубь металла.

С повышением температуры степень диссоциации аммиака увеличивается. Водород ухудшает свойства ещё не азотированной поверхности и деазотирует уже обработанную поверхность, поэтому является вредной составляющей атмосферы. Для снижения вредного влияния водорода и регулирования азотного потенциала аммиак разбавляют чистым азотом, кислородом и углеродосодержащими газами. Добавки кислорода связывают водород, окисляя его до водяного пара, что приводит к возрастанию количества атомарного азота.

Составы наиболее часто используемых насыщающих сред и режимы азотирования представлены в таблице 2.1.

Контрольными параметрами процесса являются:

- степень диссоциации аммиака;
- расход аммиака;
- температура;
- расходы дополнительных технологических газов (если применяются).

Таблица 2.1 – Состав основных насыщающих сред и режим азотирования

Состав насыщающей среды	Режим азотирования	
	T, °C	τ, ч
Аммиак NH <sub>3</sub> , степень диссоциации 20—40 %	500—520	6—90
Аммиак NH <sub>3</sub> , степень диссоциации 30—55 %	560—580	1—10
Смесь: 20 % аммиака NH <sub>3</sub> + 80 % азота N <sub>2</sub>	500—520	6—90
Смесь: 50 % аммиака NH <sub>3</sub> + 50 % эндогаза* (40 % H <sub>2</sub> + 20 % CO + 40 % N <sub>2</sub> )*	570	0,5—3,0
Смесь: 50 % аммиака NH <sub>3</sub> + 50 % эндоэкзогаза* (20 % H <sub>2</sub> + 20 % CO + 60 % N <sub>2</sub> )		
Смесь: 50 % аммиака NH <sub>3</sub> + 50 % экзогаза* (10 % CO + 90 % N <sub>2</sub> )	570	2—10
Смесь: 50 % аммиака NH <sub>3</sub> + 50 % пропана C <sub>2</sub> H <sub>8</sub>		
Смесь продуктов пиролиза керосина и спирта (50 %) + аммиака NH <sub>3</sub> (50 %)	570	1—6

\*Экзогаз — газовая смесь, полученная путём частичного сгорания горючих веществ в установках для производства защитных газов при экзотермическом процессе в условиях избытка воздуха. Если газ получают при эндотермическом процессе в условиях недостатка воздуха, то такая газовая смесь называется эндогазом. Исходные вещества для получения этих газов — природный газ, пропан, бутан, генераторный газ, бензин, керосин, дизельное топливо. Экзогаз и эндогаз применяют в качестве контролируемых атмосфер.

*Каталитическое газовое азотирование* — современная модификация технологии газового азотирования. Эта технология сокращает длительность обработки в 2–4 раза, а также повышает срок службы обрабатываемых деталей в 1,5–3 раза по сравнению с традиционным газовым азотированием. Для увеличения количества атомарного азота в печном пространстве на аммиачно-воздушной магистрали устанавливается диссоциатор с кремнезёмным стекловолокнистым тканым катализатором, который обеспечивает высокую активацию печной атмосферы. В целом применение катализаторов позволяет увеличить степень диссоциации аммиака, в результате чего становится возможным снизить температуру азотирования и существенно уменьшить время проведения процесса.

*Парофазовое азотирование* проводят в тлеющем разряде. Применение тлеющего разряда возможно только в сильно разряженной атмосфере аммиака или азота (давление в камере 1–133 Па). При этом деталь является катодом, неплавящийся электрод — анодом. Между ними устанавливается тлеющий дуговой разряд, приводящий к ионизации атомов азота. Полученные ионы азота разгоняются в тлеющем разряде с напряжением 400–800 В до значительных скоростей и бомбардируют поверхность изделия, внедряясь в неё и нагревая до температур диффузационного перемещения (470–580 °С). Продолжительность процесса ионного азотирования от нескольких минут до 24 ч.

Контроль качества слоёв при азотировании проводят на специально завешиваемых в рабочее пространство печи свидетелях или на образцах, вырезанных непосредственно из детали.

На рис. 2.2 представлена микроструктура образца после азотирования.

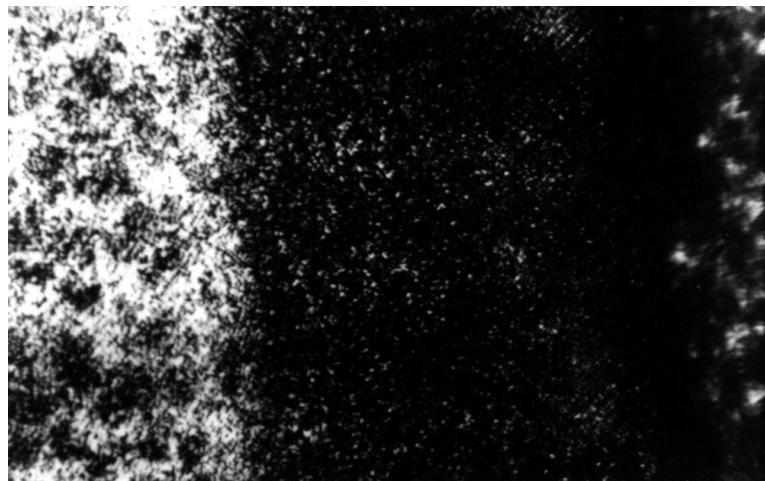
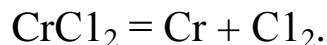


Рис. 2.2 — Микроструктура образца после азотирования

**Хромирование** – это процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя детали хромом. Хромированию подвергаются изделия, работающие в условиях износа; под напряжением (или без него) при высоких и криогенных температурах в средах, вызывающих химическую или электрохимическую коррозию; на усталость – механическую, термическую и коррозионную.

Все технологии хромирования различаются по виду насыщающей среды – твёрдой, жидкой и газообразной.

*Хромирование в порошках.* Наиболее широко применяется метод диффузионного хромирования в порошках, содержащих хром или феррохром и активные добавки в виде галогенов аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_4\text{I}$ ,  $\text{NH}_4\text{F}$ ,  $\text{NH}_4\text{Br}$ ). В процессе нагрева в порошке происходит разложение хлористого или йодистого аммония. Атомарный хлор или йод, взаимодействуя с хромом, образуют газовую фазу, например хлорид хрома ( $\text{CrCl}_3$  или  $\text{CrCl}_2$ ). Газ при соприкосновении с поверхностью детали выделяет атомарный хром, который адсорбируется на поверхности нагретого изделия:



Другим вариантом хромирования в порошках является использование смесей на основе оксида хрома, восстановляемого аллюмотермическим методом. Для этого в аллюмотермическую смесь добавляют  $\text{AlSb}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

*Парофазовое хромирование в вакууме (хромирование из паровой фазы).* Осуществляется в парах хрома, получаемых либо отдельно, либо путём испарения хрома в том же пространстве, где находится изделие. Для образования паров хрома используется более высокая

температура – порядка 1100–1200 °С. Вакуумное неконтактное хромирование производится при температуре 1000–1100 °С путём осаждения паров хрома, подаваемых в камеру при остаточном давлении 1,33–0,133 Па ( $10^{-2}$ – $10^{-3}$  мм рт. ст.) на поверхность обрабатываемой детали. При вакуумном контактном хромировании изделие засыпают кусочками хрома размером 1–3 мм температуру повышают до 1100–1200 °С и процесс ведут в вакууме при давлении 0,133 Па ( $10^{-3}$  мм рт. ст.). Этот метод привлекателен тем, что не требует в ходе химико-термической обработки применения агрессивных веществ, позволяет получать наиболее высококачественные поверхности и может применяться для производства деталей ответственного назначения.

*Хромирование в газовой среде (газовый метод).* Газовое неконтактное хромирование проводят в среде газа  $\text{CrCl}_2$ , полученного отдельно. Для этого через слой порошкообразного хрома или феррохрома пропускают либо хлористый водород ( $\text{HCl}$ ), либо смесь хлористого водорода и чистого водорода ( $\text{HCl} + \text{H}_2$ ), либо газообразный хлор ( $\text{Cl}_2$ ). В результате образуются летучие хлориды хрома  $\text{CrCl}_3$  и  $\text{CrCl}_2$ , которые поступают в контейнер с обрабатываемыми деталями. Кроме хлорида хрома могут быть использованы другие его галогениды, в частности одной из лучших сред для газового хромирования считается иодид хрома –  $\text{CrI}_2$ .

*Жидкостное хромирование.* При жидкому методе хромирования активной фазой является расплав соли, содержащей хром. Оно проводится в ваннах расплавленных хлористых солей с введением феррохрома, предварительно обработанного соляной кислотой. Наиболее часто применяют смесь, состоящую из 70 %  $\text{BaCl}_2$  и 30 %  $\text{NaCl}$ , которую нагревают до температуры 1000–1050 °С. Количество феррохрома составляет 20–25 % веса ванны. Вместо введения порошкообразного феррохрома через ванну с расплавленными солями могут пропускать газ  $\text{CrCl}_2$ .

Различные виды технологий хромирования, режимы процесса и глубина полученного слоя указаны в таблице 2.2.

Процесс протекает медленно, при проведении его в вакууме скорость насыщения увеличивается и предотвращается окисление изделия. Качество поверхности улучшается.

Если хромированию подвергают низкоуглеродистые стали, то на поверхности образуется твёрдый раствор хрома в железе и повышается коррозионная стойкость.

При хромировании средне- и высокоуглеродистых сталей на поверхности образуется слой карбидов хрома, таких как  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , так как одновременно протекают два процесса – диффузия хрома из карбюризатора и диффузия углерода из сердцевины к поверхности. При этом повышается не только коррозионная стойкость, но и твёрдость и износостойкость поверхности, твёрдость карбидов достигает 18000 МПа, под ним слой альфа-железа с примесью карбидов хрома, имеющий твёрдость порядка 4600 МПа. Толщина образующегося слоя 20 – 150 мкм.

Благодаря высокой концентрации (более 12 %) хрома диффузионный слой обладает хорошей сопротивляемостью коррозии в атмосфере (в том числе морской), перегретом паре, сернистых газах, органических кислотах, азотной кислоте, щелочах и других средах. Он также устойчив в жидких металлах (Pb, Zn, Al). В соляной и серной кислотах хромированный слой не устойчив.

Таблица 2.2 – Составы сред и режимы хромирования сталей [4]

Состав насыщающей среды	Режим хромирования		Глубина слоя, мм
	3VC	$\tau$ , ч	
Хромирование в порошковых средах <i>(газовый метод)</i> 50 % феррохрома или хрома + $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 1–2 % $\text{NH}_4\text{Cl}$ (или $\text{NH}_4\text{I}$ или $\text{NH}_4\text{Br}$ , или $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) 5–10 % $\text{CrCl}_2$ + 90 % $\text{Al}_2\text{O}_3$	1000—1050	6—12	0,1—0,15 (0,01—0,03)*
Хромирование в вакууме (парогазовый метод) Порошок хрома, образующий в вакууме при высоких температурах паровую fazу	1050—1100	4—15	0,05—0,25 (0,01—0,04)
Газовое хромирование (неконтактный метод) $\text{CrCl}_2 + \text{H}_2$ галогениды типа $\text{CrCl}_2$ , $\text{CrF}_2$ , $\text{CrI}_2$ , $\text{CrCl}_3$ и др.	1000—1050	6—12	0,1—0,2 (0,02—0,05)
Хромирование в керамической массе <i>(газовый метод, контактный способ)</i> Пористый фарфор, пенопамотный кирпич или глина, поры которых наполнены хлоридами хрома, а также хромом или феррохромом	1050	5—6	0,1—0,2
Жидкое хромирование Расплавы солей $\text{BaCl}_2$ , $\text{MgCl}_2$ , $\text{NaCl}$ , $\text{CaCl}_2$ и др., к которым добавляют $\text{CrCl}_2$ в количестве 15—20 % массы нейтральных солей или 20—25 % массы нейтральных солей феррохрома, обработанного соляной кислотой	1000—1100	1—6	0,05—0,3

На рис. 2.3 представлена микроструктура образца после хромирования.



Рис. 2.3 — Микроструктура образца после хромирования

Хромированные изделия можно подвергать при необходимости термической обработке. Закалка проводится с охлаждением в масле.

## **Материалы и принадлежности**

- Металлографический микроскоп с окуляром, имеющим шкалу для измерения линейных размеров;
- Твердомеры Роквелла с алмазным наконечником и с шариком;
- Коллекция микрошлифов, подвергнутых цементации, хромированию и азотированию с термической обработкой и без неё.

## **Порядок выполнения работы**

Получить образцы, цементация, азотирование и хромирование, а также необходимая термическая обработка которых проведена предварительно лаборантом.

Ознакомиться с исходным состоянием образцов (марка стали, химический состав, критические точки, параметры процессов).

Измерить твёрдость образцов в исходном состоянии по шкале В шариком.

Измерить твёрдость образцов после химико-термической обработки на поверхности и по сердцевине:

- поверхность по шкале В шариком;
- сердцевину по шкале С алмазным наконечником.

Ознакомится со структурой образцов после химико-термической и термической обработки, схематично зарисовать структуру в прямоугольниках 30x60 мм в направлении от поверхностного слоя до сердцевины.

Измерить толщину слоя, используя окуляр-микрометр.

Сделать вывод о влиянии химико-термической обработки на структуру и свойства стали.

Оформить отчет.

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое хромирование? Параметры процесса.
2. Какие стали можно хромировать?
3. С какой целью назначают термодиффузионное хромирование?
4. В каких средах хромированный слой является коррозионностойким?
  5. Какие карбюризаторы применяют при хромировании?
  6. Какие фазы образуются в поверхностном хромированном слое?
  7. Что такое азотирование? Назначение процесса.
  8. При каких температурах проводят азотирование? Длительность процесса.
  9. Какие фазы образуются при азотировании на поверхности?
  10. Какие виды термической обработки применяют до азотирования?
11. На каком твердомере измеряют твёрдость термодиффузионных слоёв?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

## ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ СТАЛИ

**Цель работы:** изучение влияния холодной пластической деформации на процесс упрочнения стали и возможности ее разупрочнения при нагреве.

### Теоретические сведения

**Деформация** – это изменение линейных размеров и формы тела под действием приложенной силы (нагрузки).

**Упругая деформация** (обратимая) исчезает после снятия нагрузки. **Пластическая деформация** (необратимая) не исчезает после снятия нагрузки.

**Абсолютная деформация** – абсолютное изменение линейных размеров длины  $l$ , ширины  $b$  или высоты  $h$ , которое обозначается  $\Delta l$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta h$  соответственно и измеряется в единицах длины.

**Относительная деформация** (степень деформации) – это отношение абсолютной деформации к начальному размеру. Она обозначается буквами  $\delta$ ,  $\beta$  или  $\varepsilon$  и является величиной безразмерной или выражается в процентах.

Пластическая деформация возникает при напряжениях, превышающих предел упругости  $\sigma_{yup}$  или предел текучести  $\sigma_m$ . При этом чем больше величина деформирующего напряжения, тем большее степень деформации. Важнейшим практическим следствием пластической деформации является упрочнение металла. Упрочнение металла в процессе пластической деформации называется **наклепом**. Это выражается в повышении характеристик прочности (твердость, пределы текучести и прочности) и снижении пластичности и вязкости (относительное удлинение, ударная вязкость) (рис. 3.1).

Пластическая деформация носит сдвиговый характер и осуществляется путем перемещения дислокаций по плоскостям и направлениям скольжения, при этом количество дислокаций (плотность) возрастает. Это приводит к искажениям кристаллической решетки и упроч-

нению металла. Сущность упрочнения заключается в торможении дислокаций, в возникновении препятствий для их перемещения.

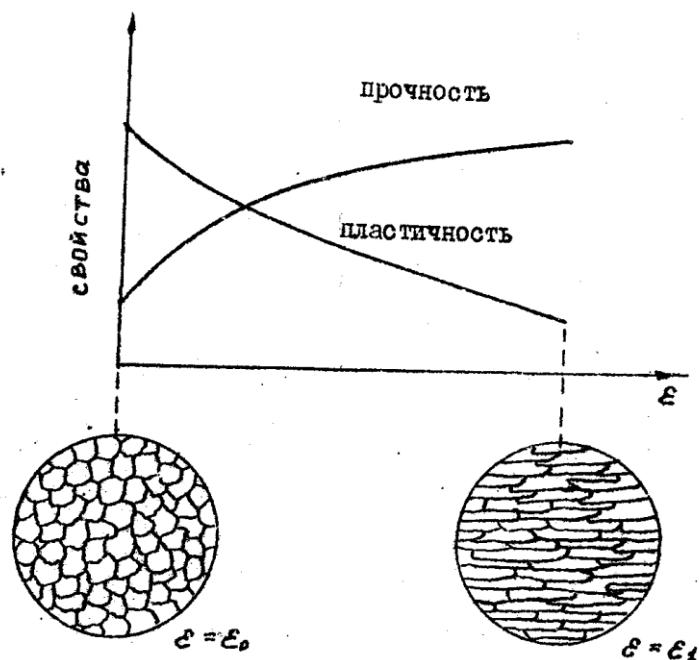


Рис. 3.1 – Влияние степени пластической деформации на структуру и свойства металла

При пластической деформации изменяется микроструктура металла. Зерна вытягиваются, и структура приобретает волокнистое строение. Кроме того, зерна поворачиваются в направлении, благоприятном для сдвига, в результате чего возникает одинаковая кристаллографическая ориентировка зерен в пространстве – **текстура**.

Таким образом, при пластической деформации увеличивается плотность дислокаций, изменяется микроструктура, повышается прочность и снижается пластичность и вязкость.

Пластически деформированный металл находится в структурно-неустойчивом состоянии. В нем повышенена плотность дислокаций, вакансий. В таком металле даже при комнатной температуре могут протекать процессы, приводящие его в более устойчивое состояние. При повышении температуры скорость этих процессов возрастает. По характеру внутренних превращений различают процессы возврата (и рекристаллизации).

Возврат протекает при сравнительно низких температурах, когда подвижность атомов мала. На этой стадии частично снижаются внутренние напряжения за счет уменьшения искажений кристаллической

решетки, связанного с уменьшением плотности точечных дефектов кристаллического строения (*отдых*) и перераспределением дислокаций (*полигонизация*). При этом не наблюдается изменения микроструктуры по сравнению с деформированным состоянием.

Механические свойства металла также не претерпевают значительных изменений (рис. 3.2). В отдельных случаях они вообще не изменяются.

Частичное (незначительное) изменение механических свойств за счет снятия упругих искажений кристаллической решетки без заметного изменения микроструктуры называется ***возвратом***.

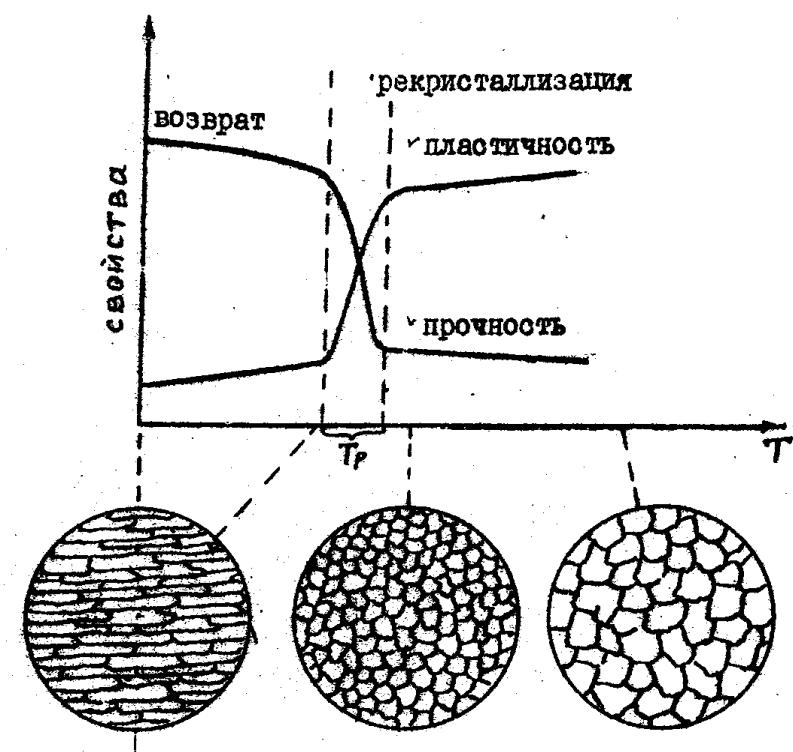


Рис. 3.2 – Зависимость механических свойств от температуры нагрева деформированного металла

При дальнейшем повышении температуры, когда подвижность атомов возрастает и они получают возможность мигрировать в кристаллической решетке, происходит образование новых, свободных от дефектов, зерен равноосной формы. Образование новых зерен равноосной формы взамен ориентированной волокнистой структуры деформированного металла называется процессом ***рекристаллизации***. При этом механические свойства резко изменяются и приобретают значения, которые металл имел до деформации. Происходит полное разупрочнение деформированного металла, снижается твердость,

предел текучести, прочности, а характеристики пластичности возрастают (см. рис. 3.2).

Минимальная температура, при которой возможен процесс рекристаллизации, называется температурным порогом рекристаллизации или *температурой рекристаллизации*  $T_p$ . Абсолютная температура рекристаллизации зависит от абсолютной температуры плавления металла  $T_{nl}$  (формула Бочвара):

$$T_p = a \cdot T_{nl}, \quad (3.1)$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от состава и структуры металла. Для металлов высокой чистоты  $a = 0,1 - 0,2$ ; для металлов технической чистоты  $a = 0,3 - 0,4$ ; для сплавов  $a = 0,6 - 0,8$ ; для углеродистых сталей  $a = 0,4$ .

Рекристаллизация металлов протекает в две стадии.

*Первичная рекристаллизация*, или *рекристаллизация обработки*, – это появление центров новых зерен и их рост за счет деформированных зерен. Чем больше центров, тем мельче получается зерно.

*Собирательная рекристаллизация* представляет собой процесс роста уже рекристаллизованных зерен. Чем выше температура, тем быстрее идет этот процесс.

В результате процесса рекристаллизации не восстанавливается старое зерно, а возникает новое, размер которого зависит от многих факторов: степени предшествующей деформации  $\varepsilon$ , температуры нагрева  $T_h$ , скорости нагрева  $v_h$ , времени выдержки  $\tau_e$ . Чем больше  $\varepsilon$  и  $v_h$ , тем мельче получается зерно. Чем выше  $T_h$  и больше  $\tau_e$ , тем крупнее зерно.

Нагрев деформированного металла выше температуры рекристаллизации с целью снять наклеп называют *рекристаллизационным отжигом*. Обычно температуру отжига выбирают намного выше, чем температура рекристаллизации, когда с заметной скоростью идет процесс рекристаллизации и для снятия наклела (разупрочнения) не требуется больших выдержек. Например, для меди температура рекристаллизации – 270 °C, а температура отжига – 650 °C.

*Холодная деформация* происходит при температурах ниже температуры рекристаллизации. В ходе этого процесса металл упрочняется. Его упрочнение зависит от степени деформации.

**Горячая деформация** – это деформация при температурах выше температуры рекристаллизации. При этом металл упрочняется за счет пластической деформации и разупрочняется за счет рекристаллизации. Конечный эффект будет зависеть от соотношения скоростей деформации и рекристаллизации. Чем выше температура, тем больше вероятность полного разупрочнения металла.

## Материалы и принадлежности

- Образцы стали 20, деформированные сжатием на разную степень деформации № 1 – № 4;
- Пять образцов, деформированных на одну степень и нагретых на разные температуры № 5 – № 9;
- Коллекция микрошлифов образцов;
- Штангенциркуль;
- Твердомер ТК с шариком;
- Металлографический микроскоп.

## Выполнение работы

Получить деформированные образцы № 1 - № 4, записать марку стали, размеры (высоту) образцов до и после деформации. Подсчитать степень деформации по формуле:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_i}{h_0} 100 \% , \quad (3.1)$$

где  $h_0$  и  $h_i$  - высота образца до и после деформации.

Измерить твердость образцов на приборе Роквелла по шкале В и построить график зависимости твердости HRB от степени деформации  $\varepsilon$ .

Посмотреть и зарисовать в кругах диаметром 35 - 40 мм или квадратах со стороной 30 – 35 мм микроструктуру образцов.

Описать микроструктуру; сделать вывод о влиянии степени деформации на микроструктуру и твердость стали. Объяснить видимые изменения с точки зрения теории дислокаций.

Получить образцы № 5 – 9, записать их состояние (степень деформации, температура нагрева, время выдержки).

Измерить твердость на приборе Роквелла по шкале В (на каждом образце делать по три замера). Построить график зависимости твердости  $H$  (среднее из трех замеров) от температуры нагрева.

Получить микрошлифы образцов № 5 – 9, посмотреть и зарисовать микроструктуру. Обратить внимание на изменение светлой составляющей стали (феррита).

Описать микроструктуру каждого образца и указать его твердость, сравнить с не нагретым. Установить связь между микроструктурой и твердостью стали (указать, при каких температурах сохранилась волокнистая структура и наклеп, а при каких – нет). По изменению твердости и микроструктуры установить температурный интервал, в котором лежит порог рекристаллизации  $T_p$ .

Подсчитать температуру рекристаллизации по формуле Бочвара, если известно, что для стали температура плавления  $T_{пл} = 1808$  К, а коэффициент пропорциональности  $a = 0,4$ . Сравнить с температурой, найденной опытным путем. Сделать вывод о влиянии рекристаллизации на свойства деформированной стали.

## Контрольные вопросы

1. Что такое деформация (упругая, пластическая, абсолютная, относительная)?
2. Что такое наклеп?
3. Какова природа упрочнения металлов?
4. Как изменяются микроструктура и свойства металла в процессе пластической деформации?
5. Какие процессы протекают при нагреве деформированного металла?
6. Что такое отдых, рекристаллизация?
7. Какую температуру называют температурой рекристаллизации? Как определить ее опытным путем, теоретически?
8. Как изменится микроструктура и твердость деформированного металла, если нагреть его до температуры ниже температуры рекристаллизации, выше температуры рекристаллизации?
9. Какую деформацию называют холодной, горячей? Как изменяются свойства металла при деформации холодной, горячей и почему?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении. Том I. Стали и чугуны [Электронный ресурс]: учебное пособие / М.А. Филиппов [и др.]. – Электрон. текстовые данные. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2013. – 231 с. – 978-5-7996-0928-3. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66548.html>
2. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей [Электронный ресурс] / В.И. Бородавко [и др.]. – Электрон. текстовые данные. – Минск: Белорусская наука, 2013. – 464 с. – 978-985-08-1630-6. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/29485.html>
3. Алифанов А.В. Технологии изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей машиностроения [Электронный ресурс] / А.В. Алифанов, А.М. Милюкова, В.А. Томило. – Электрон. текстовые данные. – Минск: Белорусская наука, 2014. – 322 с. – 978-985-08-1667-2. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/29526.html>
4. Елагина О. Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Учебное пособие. — Университетская книга. Логос, 2009. — 485 с.
5. Комаров О.С. Материаловедение в машиностроении [Электронный ресурс] : учебник / О.С. Комаров, Л.Ф. Керженцева, Г.Г. Макаева. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Вышэйшая школа, 2009. — 304 с. — 978-985-06-1608-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/20088.html>
6. Защитные покрытия : учеб. пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардонина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с.
7. Помк М. С. Технология упрочнения. — М.: Скрипториум, 1995. Т. 1, 2.
8. Лахтин Ю. М., Леонтьева В.П.. Материаловедение. М.: Машиностроение. 1993, 529 с.
9. Материаловедение. Ч. 1 : лабораторный практикум : для технических специальностей / Л.П. Одинокова; Л.В. Ильина; Н.Н. Маркова; Л.Н. Курдюмова; Каф. "АПиМБОМ". - Орел: Изд-во ОрелГТУ, 2007. - 123 с. – Режим доступа:  
<http://elib.oreluniver.ru/laboratornyj-praktikum/materialovedenie-ch-1-1.html>

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Химический состав и критические точки некоторых марок сталей

Марка стали	Химический состав, основные компоненты, %				Критические точки, °C	
	C	Cr	Ni	Si	A <sub>c1</sub>	A <sub>c3</sub>
Сталь 30	0,3				730	810
Сталь 40	0,4				730	790
Сталь 45	0,45				725	770
Сталь 50	0,50				725	760
У7	0,7				730	740
У8	0,8				725	-
У10	1,0				730	840 <sup>1</sup>
У12	1,2				730	860 <sup>1</sup>
40Х	0,4	1			740	770
40ХН	0,4	1	1		730	770
60С2	0,6			2	750	820
9ХС	0,9	1		1	770	870 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> – сталь заэвтектоидная; дано значение критической точки A<sub>cm</sub>

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица соотношений чисел твердости, определяемой различными методами

Виккерс HV	Твердость					Виккерс HV	Твердость				
	Бринелль		Роквелл				Бринелль		Роквелл		
	d, мм	HB	HRC	HRA	HRB		d, мм	HB	HRC	HRA	HRB
2150	-	-	-	93	-	534	2,80	477	51	74	-
2040	-	-	-	92	-	502	2,85	461	50	73	-
1939	-	-	-	91	-	474	2,90	444	48	73	-
1841	-	-	-	90	-	460	2,95	429	46	72	-
1732	-	-	-	89	-	435	3,00	415	45	72	-
1630	-	-	-	88	-	423	3,05	401	44	71	-
1527	-	-	-	87	-	401	3,10	388	43	71	-
1425	-	-	-	86	-	390	3,15	375	42	70	-
1324	-	-	-	85	-	380	3,20	363	41	70	-
1224	2,20	780	72	84	-	361	3,25	352	40	69	-
1116	2,25	745	71	83	-	344	3,30	341	38	68	-
1022	2,30	712	69	82	-	334	3,35	331	37	67	-
941	2,35	682	67	81	-	320	3,40	321	35	67	-
868	2,40	673	65	80	-	311	3,45	311	34	66	-
804	2,45	627	63	79	-	303	3,50	302	33	66	-
746	2,50	601	61	78	-	292	3,55	293	32	65	-
694	2,55	578	59	78	-	285	3,60	285	31	65	-
650	2,60	555	57	77	-	278	3,65	277	30	64	-
606	2,65	534	55	76	-	270	3,70	269	29	64	-
587	2,70	514	53	75	-	261	3,75	262	28	63	-
551	2,75	495	52	74	-	255	3,80	255	27	63	-
249	3,85	248	25	62	-	149	4,90	149	-	-	82
240	3,90	241	25	62	102	148	4,95	146	-	-	81
235	3,95	235	23	61	101	143	5,00	143	-	-	80
228	4,00	229	22	61	100	140	5,05	140	-	-	79
222	4,05	223	21	60	99	138	5,10	137	-	-	78
217	4,10	217	20	60	98	134	5,15	134	-	-	77
213	4,15	212	17	59	97	131	5,20	131	-	-	76
208	4,20	207	16	59	95	129	5,25	129	-	-	75
201	4,25	201	15	58	94	127	5,30	126	-	-	74
197	4,30	197	14	58	93	123	5,35	123	-	-	73
192	4,35	192	13	57	92	121	5,40	121	-	-	72
186	4,40	187	11	57	91	118	5,45	118	-	-	71
183	4,45	183	10	56	90	116	5,50	116	-	-	70
178	4,50	179	9	56	90	115	5,55	114	-	-	68
174	4,55	174	8	55	89	113	5,60	111	-	-	67
171	4,60	170	6	55	88	110	5,65	110	-	-	66
166	4,65	167	5	54	87	109	5,70	109	-	-	65
162	4,70	163	4	53	86	108	5,75	107	-	-	64
159	4,75	159	3	53	85	-	-	-	-	-	-
155	4,80	156	2	52	84	-	-	-	-	-	-
152	4,85	152	-	-	83	-	-	-	-	-	-

Примечание – Числа твердости по Бринеллю и Виккерсу даны в кгс/мм<sup>2</sup>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

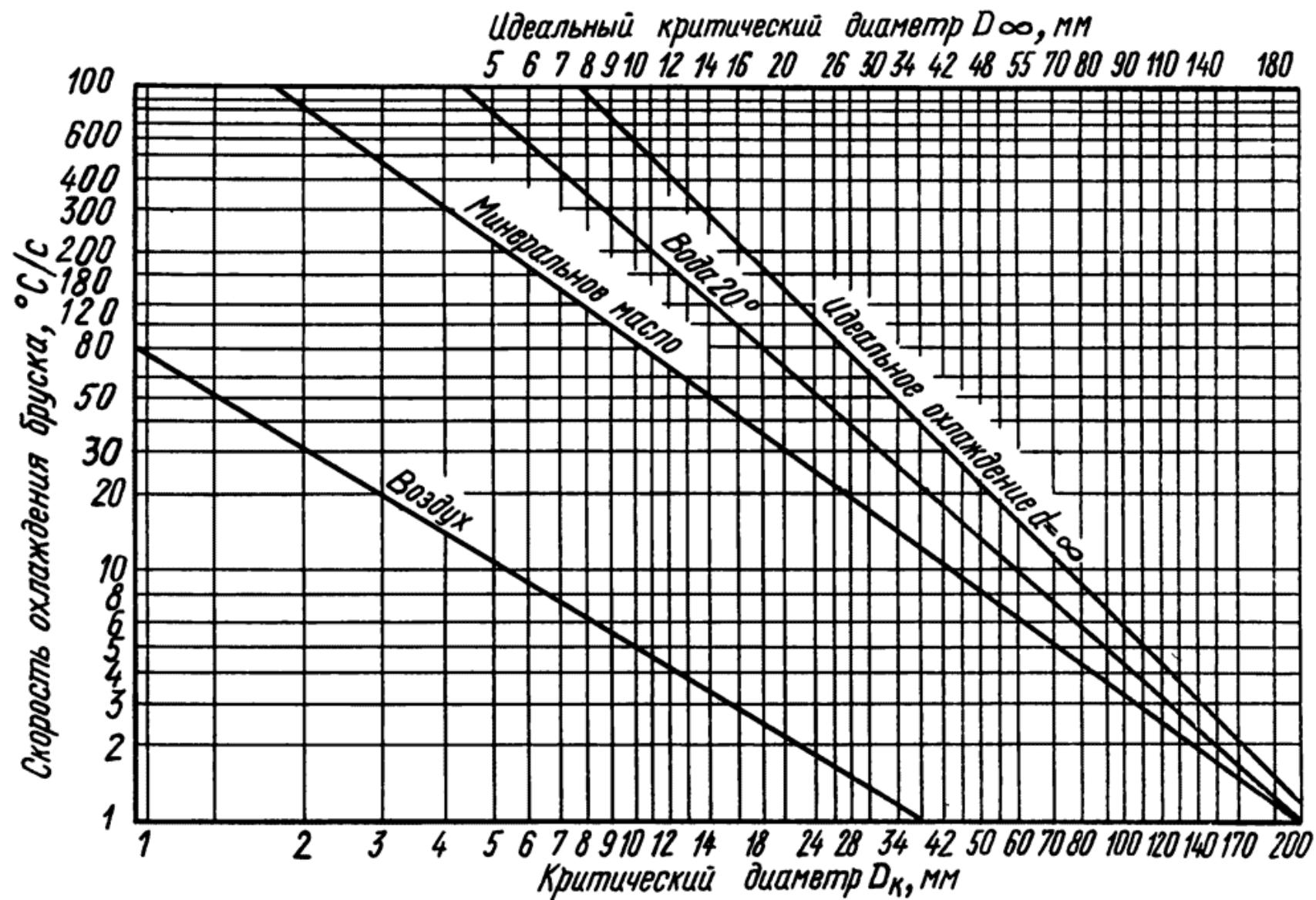


Рисунок В1 - Номограмма для определения критического диаметра прокаливаемости