

620.2

Л12

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С. М. КИРОВА

Кафедра материаловедения и технологии металлов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ  
"МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ"

Часть 11

Библиотека БГТУ



0000000055235b

Составители: Н. А. Свидуневич,  
Б. Н. Пальчевский,  
А. И. Гарост,  
Ж. М. Урбанек

ЧИТ. ЗАЛ 1

БИБЛИОТЕКА БТИ  
им. С. М. Кирова

Минск 1983

УДК 621.7:669.017

Рассмотрен и рекомендован к изданию Редакционно-издательским советом института.

Соавтители: Н.А.Свидуневич,  
Б.Н.Пальчевский, А.И.Гарост, Ж.М.Урбанек

Научный редактор А.Ф.Дулевич, доцент.

Рецензенты: лаборатория металловедения  
ФТИ АН БССР; Р.М.Худокормова, доцент  
кафедры металловедения и литейного  
производства (БИ).

Во второй части лабораторного практикума приведены работы по разделам "Пластическая деформация и механические свойства" и "Технология термической обработки стали".

Л 2108000000 - 082 з. (67) ©  
М 339 - 83

Белорус. ордена Трудового  
Красного Знамени технол.  
ин-т им. С.М.Кирова, 1983.

## ВВЕДЕНИЕ

Задачей курса "Материаловедение" является изучение строения и свойств материалов, используемых в машиностроении, с целью получения навыков правильного их применения при создании надежных в работе и экономичных конструкций.

Термическая обработка - наиболее универсальный и радиальный путь повышения прочности, долговечности и других полезных качеств металлов. Повышение прочности позволяет существенно уменьшить удельный вес конструкций, повысить их надежность и долговечность. В связи с этим в лабораторном практикуме представлены работы по основным процессам термообработки, чтобы студент приобрел навыки самостоятельного выбора и разработки наиболее эффективного технологического процесса термической обработки для различных деталей и инструментов с использованием новейших достижений в этой области.

Практикум подготовлен в соответствии с примерным перечнем лабораторных работ по курсу "Материаловедение" согласно программе, утвержденной учебно-методическим управлением по высшему образованию 4.08.1977 г.

Студенты должны до начала проведения работы самостоятельно ознакомиться с теоретическим материалом по указанной теме, используя настоящий практикум или другие источники, рекомендованные преподавателем.

После прохождения собеседования с преподавателем студенты допускаются к выполнению работы. Каждый студент должен представить отчет о выполненной работе.

### Лабораторная работа № I ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: ознакомление с методами определения твердости металлов; определение твердости на приборах Бринелля и Роквелла.

#### Теоретическая часть

Твердостью называют свойство материала оказывать сопротивление пластической деформации при контактном воздействии нагрузки. В большинстве случаев при испытании твердости производят вдавливание в испытуемый материал индентора.

Готовленного из значительно более твердого материала, чем испытуемый. В результате вдавливания с достаточно большой нагрузкой поверхностные слои материала, находящиеся над наконечником и вблизи его, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Особенность происходящей при этом деформации заключается в том, что она протекает только в небольшом объеме, окруженном недеформированным материалом. В таких условиях испытания, близких к всестороннему неравномерному сжатию, возникают главным образом касательные напряжения, а доля растягивающих напряжений незначительна по сравнению с получаемыми при других видах механических испытаний (на растяжение, изгиб, кручение, сжатие). Поэтому при измерении твердости вдавливанием пластическую деформацию испытывают не только пластичные, но и непластичные материалы, например, чугун, которые при обычных механических испытаниях (на растяжение, сжатие, кручение, изгиб) разрушаются хрупко без макроскопически заметной пластической деформации.

Между твердостью пластичных материалов, определяемой способом вдавливания, и другими механическими свойствами (главным образом пределом прочности) существует количественная зависимость.

Это связано с тем, что при испытаниях на растяжение наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению и отнесенной к его первоначальной площади (предел прочности), отвечает местная пластическая деформация (образование шейки), а не разрушение образца. Такая пластическая деформация аналогична деформации, создаваемой в поверхностных слоях металла при измерении твердости вдавливанием наконечника.

Подобная количественная зависимость не наблюдается для хрупких материалов, которые при испытаниях на растяжение разрушаются без заметной пластической деформации, а при измерении твердости получают пластическую деформацию. Однако в ряде случаев и для этих материалов (например, серых чугунов) наблюдается количественная зависимость между пределом прочности и твердостью: возрастанию твердости обычно соответствует увеличение предела прочности.

Твердость, определенная вдавливанием, характеризует также предел выносливости некоторых металлов, в частности

меди, дуралюминия и сталей, в отожженном состоянии.

Испытание на твердость благодаря своей простоте, а также возможности производить испытания на готовых изделиях без их разрушения и повреждения получило очень широкое распространение. Для деталей, подвергнутых химико-термической обработке (цементации, азотированию и т.п.), и закаленных инструментальных сталей определение твердости является основным методом испытания при оценке качества изделий.

а) Определение твердости по Бринеллю

При определении твердости по Бринеллю согласно ГОСТ 9012-59 в испытуемый материал вдавливается индентор в виде стального шарика определенного диаметра  $D$  под нагрузкой  $P$  в течение определенного времени (рис. 1а)

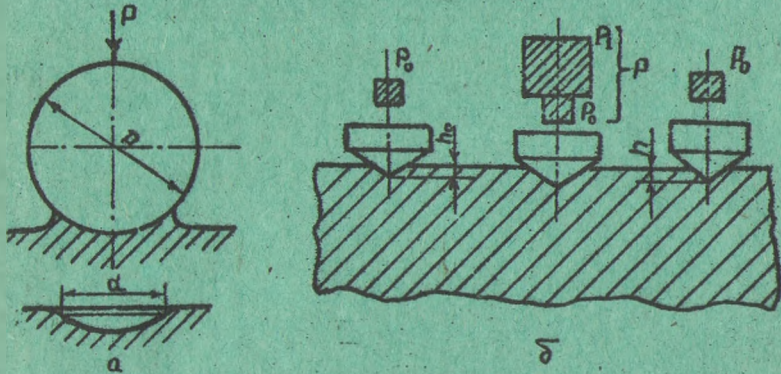


Рис. 1. Схема испытания на твердость: а - по Бринеллю; б - по Роквеллу

При выборе диаметра шарика  $D$ , нагрузки  $P$  и продолжительности выдержки под нагрузкой необходимо руководствоваться данными, приведенными в табл. I.

Более продолжительные выдержки под нагрузкой для цветных металлов объясняются пониженными температурами отжига и рекристаллизации по сравнению с черными металлами.

Т а б л и ц а I

Материал:	Пределы измерения в единицах твердости по Бринелю, МПа	Минимальная толщина испытуемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой Р и радиусом шарика D	Диаметр шарика D, мм	Нагрузка Н, кг Р, мм <sup>2</sup>	Выдержка ка под нагрузкой, с
Черные металлы	1400-4500	6-3	$F=300D^2$	10,0	30000	10
		4-2		5,0	7500	
		<2		2,5	1875	
		>6	$P=100D^2$	10,0	10000	10
Цветные металлы	< 1400	6-3		5,0	2500	
		< 3		2,5	625	
		6-3	$P=300D^2$	10,0	30000	30
		4-2		5,0	7500	
		<2		2,5	1875	
		350-1300	9-3	$P=100D^2$	10,0	10000
		6-3		5,0	2500	
		<3		2,5	625	
	80-350	>6	$P=250D^2$	10,0	2500	60
		6-3		5,0	625	
		<3		2,5	156	

Число твердости по Бринелю обозначают через  $HB, H\alpha$  и выражают как отношение  $\frac{P}{F}$ , где  $P$  - нагрузка;  $H$ ;  $F$  - площадь поверхности отпечатка (лунки) мм<sup>2</sup>.  $F$  может быть выражена через диаметр шарика  $D$  и диаметр отпечатка  $d$ :

$$F = \frac{\pi D^2}{2} - \frac{\pi D}{2} \sqrt{D^2 - d^2} = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}),$$

тогда  $HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ .

В практике определения твердости по Бринелю этих вычислений не делают, а пользуются таблицей, составленной для установленных диаметров шариков, отпечатков и нагрузок, по которой находят числа твердости.

Чтобы показать, при каких условиях измерялась твердость по Бринелю, применяют следующий условный метод записи. Например,  $HB(7500)10$  означает, что испытание проводилось шари-

ком диаметром 5 мм под нагрузкой 7500 Н в течение 10 с. Если соблюдались условия: диаметр шарика 10 мм, нагрузка 30 000 Н, время выдержки 10 с, то индексы не ставят.

Между числом твердости по Бринеллю НВ и пределом прочности при растяжении  $\sigma_B$  существуют следующие соотношения:

Сталь (НВ=1250-1750) .....  $\sigma_B = 0,343 \text{ НВ}$

Сталь (НВ более 1750) .....  $\sigma_B = 0,362 \text{ НВ}$

Алюминиевое литье .....  $\sigma_B = 0,28 \text{ НВ}$

Медь, латунь, бронза:

отожженные .....  $\sigma_B = 0,55 \text{ НВ}$

наклепанные .....  $\sigma_B = 0,40 \text{ НВ}$

Серый чугун .....  $\sigma_B = \frac{\text{НВ}-40}{6}$

#### Описание установки.

Твердость по Бринеллю определяют на прессах с гидравлическим или механическим приводом нагружения. Схема автоматического рычажного пресса показана на рис.2.

В верхней части станины I имеется шпindel 7, в который вставляется наконечник с шариком 6. Может быть вставлен один из трех наконечников - с шариком диаметром 10; 5 или 2,5 мм. Столик 4 служит для установки на нем испытываемого образца 5. Вращением по часовой стрелке рукоятки 15 приводят в движение винт 3, который, перемещаясь вверх, поднимает столик 4, образец 5 прижимается к шарiku 6. Рукоятку 15 вращают до тех пор, пока указатель 14 не станет против риски; при этом пружина 8 сжимается до отказа и создается предварительная нагрузка 1000 Н.

Электродвигатель 13, который включает нажатием кнопки, расположенной сбоку пресса, приводит во вращение эксцентрик 2. При вращении эксцентрика 2 шатун 9, перемещаясь вниз, опускает рычаг 10 и соединенную с ним подвеску II с грузами 12, создавая этим нагрузку на шарик, который вдавливаются в образец. По окончании определенного промежутка времени, заданного реле времени, при дальнейшем вращении эксцентрик 2 перемещает шатун 9 вверх, который поднимает рычаг 10 и подвеску II с грузами 12, снимая этим нагрузку с шарика. Когда рычаг и подвески с грузами достигнут исходного положения, автоматически дается сигнал и электродвигатель выключается.

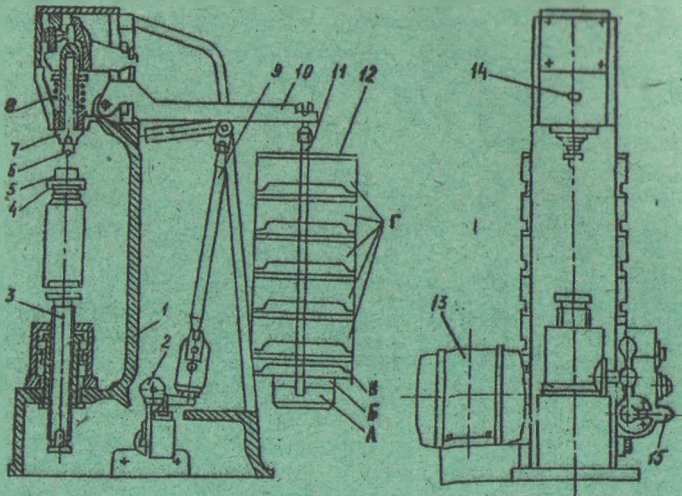


Рис. 2. Схема автоматического рычажного пресса для определения твердости

### Экспериментальная часть

Твердость по Бринелю измеряют на прессе следующим образом. Устанавливают испытуемый образец (деталь) на столике 4 шлифованной поверхностью вверх. Центр отпечатка должен находиться от края образца на расстоянии не менее диаметра шарика, а от центра соседнего отпечатка — на расстоянии не менее двух диаметров шарика. Доводят образец до соприкосновения с шариком 6 вращением маховика 15 по часовой стрелке до полного упора. Включают электродвигатель 13 нажатием кнопки пускателя и следят за ходом испытания. Нагрузка на образец, выключение мотора и освобождение образца от нагрузки происходят автоматически. Приложение полной нагрузки и выдержка сигнализируются зажиганием лампочки. Опускают столик с испытуемым образцом вращением маховика против часовой стрелки.

Полученный отпечаток измеряют с помощью лупы в двух взаимно перпендикулярных направлениях, диаметр отпечатка определяется как среднее арифметическое двух измерений. Лупу со шкалой, малое деление которой равно 0,05 мм, нижней



лпорной частью надо плотно установить на испытываемую по-  
верхность образца над отпечатком; вырез (окно) в нижней  
части дупа обратить к свету. Поворачивая окуляр, необходи-  
мо добиться, чтобы края отпечатка были резко очерчены.

Затем, передвигая дупу, надо один край отпечатка совместить  
с началом шкалы (рис.3). Деление шкалы, с которым совпадает

противоположный край отпечатка, и будет соответствовать  
размеру диаметра отпечатка.  
Затем дупу или образец сле-  
дует повернуть на  $90^\circ$  и из-  
мерить диаметр отпечатка  
второй раз.

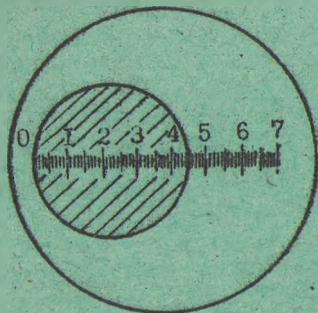


Рис.3. Отсчет по шкале дупы

Для получения правиль-  
ной характеристики твердос-  
ти данного материала необхо-  
димо еще два повторных ис-  
пытания на твердость того  
же образца.

Измерение твердости по  
Бринелю не является универ-  
сальным способом. Этот способ не позволяет: а) испытывать  
материалы твердостью более 4500 МПа; б) измерять твердость  
тонкого поверхностного слоя (толщиной менее 1-2 мм), так  
как стальной шарик продавлирует этот слой и проникает на  
большую глубину. Толщина измеряемого слоя (или образца)  
должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка.

### б) Определение твердости по Роквеллу

Испытание на твердость по Роквеллу согласно ГОСТ 9013-59  
производят вдавливанием в испытуемый образец (деталь) алмазно-  
го конуса с углом  $120^\circ$  или стального закаленного шарика диа-  
метром 1,588 мм. Шарик и конус вдавливают в образец под дейст-  
вием двух последовательно прилагаемых нагрузок - предваритель-  
ной  $P_0$  и основной  $P_1$ . Общая нагрузка  $P$  будет равна сумме  
предварительной  $P_0$  и основной  $P_1$  нагрузок (рис. 1б):  $P = P_0 + P_1$ .  
Предварительная нагрузка  $P_0$  во всех случаях равна 100 Н, основ-  
ная  $P_1$  и общая  $P$  нагрузки при вдавливании стального шарика  
(шкала В) составляют  $P_1 = 900$  Н,  $P = 100 + 900 = 1000$  Н,  
а при вдавливании алмазного конуса (шкала С)  $P_1 = 1400$  Н,

$P = 100 + 1400 = 1500$  Н, при вдавливании алмазного конуса (шкала А)  $P_I = 500$  Н,  $P = 100 + 500 = 600$  Н.

Число твердости по Роквеллу - отвлеченное и выражается в условных единицах.

За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм. Число твердости по Роквеллу  $HR$  определяется по формулам: при измерении по шкале В  $HR = 130 - e$ , при измерении по шкалам С и А  $HR = 100 - e$ .

Величина  $e$  определяется из выражения:

$$e = \frac{h - h_0}{0,002}$$

где  $h$  - глубина внедрения наконечника в испытуемый материал под действием общей нагрузки  $P$ , измеренная после снятия основной нагрузки  $P_I$ , с оставлением предварительной нагрузки  $P_0$ ;  $h_0$  - глубина внедрения наконечника в испытуемый материал под действием предварительной нагрузки  $P_0$  (см. рис.16).

В зависимости от того, применяют шарик или алмазный конус, а также от нагрузки, при которой проводят испытание (т.е. по какой шкале: В, С или А), число твердости обозначают  $HRB$ ,  $HRC$ ,  $HRA$ .

#### Описание установки

Определение твердости на приборе типа Роквелла имеет широкое применение, т.к. этот прибор дает возможность испытывать мягкие, твердые, а также тонкие материалы. Отпечатки от конуса или шарика очень малы, поэтому можно испытывать готовые детали без их порчи. Испытание легко выполнимо и занимает мало времени (несколько секунд); не требуется никаких измерений, и число твердости читается прямо на шкале. Значения твердости по Роквеллу могут быть переведены в значения твердости по Бринелю.

Схема прибора для определения твердости по Роквеллу (тип ТК-2) показана на рис.4.

Шпиндель I прибора служит для закрепления на его конце с помощью винта 4 оправки 5 с шариком или алмазным (из твердого сплава) конусом. Постоянный груз 17 создает нагрузку 500 Н; если на постоянный груз 17 установлен груз 18 (400 Н), то создается нагрузка 900 Н, а если установлен груз 18 и груз 19 (500 Н), то - нагрузке 1400 Н.

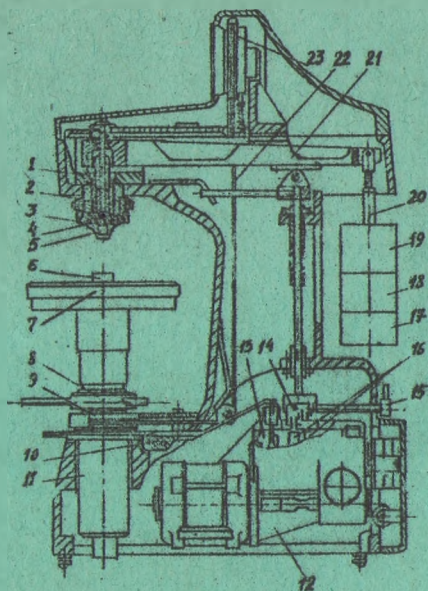


Рис.4. Схема прибора ТК-2

Стол 7 служит для установки на нем испытуемого образца 6. При вращении по часовой стрелке маховика 8 приводится во вращение шпиндель II, который, перемещаясь вверх, поднимает стол 7, и образец 6 подводится к оправке 5 с шариком или алмазным конусом. При дальнейшем вращении маховика 8 сжимается пружина 2, шарик или алмазный конус начинает вдавливаться в испытуемый образец 6, а стрелки поворачиваются по шкале индикатора 23. При вращении маховика 8 до тех пор, пока образец не упрется в ограничительный чехол 3, малая стрелка I индикатора (рис.5а) дойдет до красной точки 2, а большая стрелка 3 установится (с погрешностью  $\pm 5$  делений) приблизительно в вертикальном положении (рис.5б); создается предварительная нагрузка 100 Н. Точную установку шкалы индикатора на нуль (рис.5в) производят при помощи барабана 9 (см.рис.4) тросиком 22, закрепленным на ригеле индикатора.

Циферблат индикатора имеет две шкалы - черную С и красную В. Независимо от того, что вдавливается в испытуемый

образец - алмазный конус или шарик - с большой стрелкой индикатора всегда совмещается нуль черной шкалы со значком С. Большую стрелку с нулевым штрихом красной шкалы со значком В не совмещать!

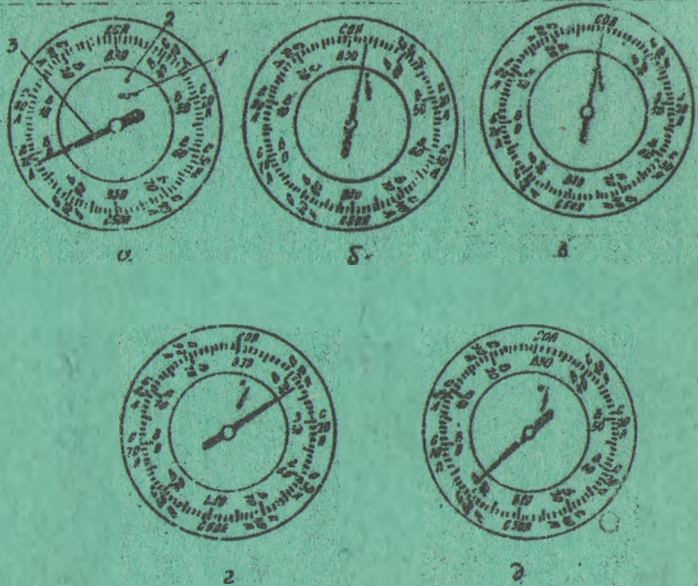


Рис. 5. Последовательное перемещение стрелок на циферблате прибора Тк-2 при вдавливании алмазного конуса

Приведение в действие основной нагрузки осуществляется помощью привода 12 от электродвигателя, работающего непрерывно и отключенного с помощью тумblers 13 только при длительных перерывах в работе прибора.

Нажатием клавиши 10 приводит в действие кулачковый блок 15 механизма привода 12, передача от которого к грузопому рычагу 21 осуществляется с помощью штока 14. При этом подвеска 20 с грузами 17-19 опускается, обеспечивая действие основной нагрузки; создается обная нагрузка (предварительная + основная).

Под действием основной нагрузки шарик или алмазный конус вдавливаются в образец и испытуемый образец при этом

большая стрелка индикатора поворачивается против часовой стрелки (рис.5г). После окончания вдавливания основная нагрузка, действовавшая на образец, автоматически снимается и остается предварительная нагрузка. При этом большая стрелка индикатора перемещается по часовой стрелке и указывает на шкале индикатора число твердости по Роквеллу (рис.5д). При испытании алмазным конусом под нагрузкой 1500 или 600 Н отсчет производят по черной шкале, а при испытании шариком под нагрузкой 1000 Н -- по красной шкале.

По окончании цикла испытания кулачковый блок автоматически отключается и фиксируется в исходном положении. Нормальная продолжительность цикла испытания -- 4 с (при положении рукоятки 15 указателя против буквы Н), укороченный цикл испытания -- 2 с (при положении рукоятки указателя против буквы У).

При вращении маховика 8 против часовой стрелки стол 7 опускается, и образец 6 освобождается от действия предварительной нагрузки.

Нагрузку и наконечник выбирает в зависимости от твердости испытуемого металла (табл.2).

Поверхности образца -- как испытываемая, так и опорная должны быть плоскими, параллельными друг другу и не должны иметь таких дефектов, как окалина, забоины, грязь, различные покрытия.

Т а б л и ц а 2

Выбор нагрузки и наконечника для испытаний на твердость по Роквеллу

Обозначение шкалы	Вид наконечника	Нагрузка, кг	Обозначение твердости по Роквеллу	Пределы измерения в единицах твердости по Роквеллу
B	Стальной шарик	1000	HRC	25-100
C	Алмазный конус	1500	HRC	20-67
A	То же	600	HRA	70-85

**П р и м е ч а н и е.** Для испытания неответственных деталей твердость HRC 20-50 допускается применение наконечника из твердого сплава.

Все дефекты поверхности образца должны быть удалены мелкозернистым наждачным кругом, напильником или наждачной бумагой. При обработке поверхности образец не должен нагреваться свыше 100-150°C.

Перед испытанием на твердость по Роквеллу необходимо произвести контроль прибора с целью определения точности его показаний.

Контроль прибора производят при помощи контрольных брусков, твердость которых заранее известна. При проверке показания прибора должны находиться в пределах чисел твердости, обозначенных на контрольных брусках. Если твердость по прибору не соответствует твердости контрольных брусков, вводится соответствующая поправка.

#### Экспериментальная часть

Испытание на твердость по Роквеллу производят следующим образом.

1. В конец шпинделя I прибора закрепить оправку с алмазным (или из твердого сплава) конусом или шарик и установить необходимую нагрузку.
2. Установить испытуемый образец 6 на стол 7 прибора.
3. Вращением маховика 8 по часовой стрелке стол осторожно поднимать до тех пор, пока образец не упрется в ограничительный чехол; при этом малая стрелка индикатора должна стать против красной точки, а большая - с погрешностью  $\pm 5$  делений - на нуль шкалы индикатора; если большая стрелка будет отклонена больше чем на  $\pm$  делений относительно нулевого штриха шкалы, необходимо вращением маховика 8 против часовой стрелки опустить стол (снять предварительную нагрузку) и испытание провести вновь в другом месте образца.
4. Вращением барабана 9 установить нуль шкалы С (черного цвета) против конца большой стрелки индикатора.
5. Плавным нажатием руки на клавишу 10 включить в работу привод механизма нагружения.
6. После окончания цикла нагружения произвести отчет по шкале индикатора.
7. Вращением маховика 8 против часовой стрелки опустить стол (снять предварительную нагрузку), образец передвинуть и повторить испытание в другом месте образца (на каждом об-

разаце должно быть проведено не менее трех испытаний). Расстояние центра отпечатка от края образца или от центра другого отпечатка должно быть не менее 3 мм.

В настоящее время для измерения твердости очень тонких поверхностных слоев и твердых материалов (особенно для материалов твердостью более 7000 МПа) применяют приборы типа супер-Роквелл, с помощью которых твердость измеряют с меньшей нагрузкой и меньшей глубиной вдавливания. Предварительная нагрузка составляет 30 Н, а каждое деление (единица шкалы) индикатора соответствует глубине вдавливания, равной 1 мкм (0,001 мм). Эти приборы обладают, следовательно, большей чувствительностью и пригодны для измерения твердости более тонких деталей и поверхностных слоев. Кроме того, расстояние между центрами отпечатков может быть принято на этих приборах несколько меньше, что необходимо для проведения некоторых исследований.

#### Порядок выполнения работы

- 1) Изучить устройство автоматического рычажного пресса;
- 2) Установить для полученного образца условия испытания твердости по Бринелю;
- 3) Провести испытания и измерить отпечатки с помощью лупы;
- 4) Изучить устройство прибора типа Роквелла;
- 5) Провести испытания твердости по Роквеллу;
- 6) Написать отчет о работе.

#### Содержание отчета

При составлении отчета о работе необходимо описать сущность методов измерения твердости, привести схемы измерений, составить сводные таблицы экспериментальных данных (табл. 3, 4).

Т а б л и ц а 3

Таблица результатов испытаний на твердость по Бринелю

Номер отпеч-та:	Материал, толщина : обреза, мм	Условия : испытани- (диаметр шарике : в мм и нагрузка : в Н)	Диаметр отпечатка, мм			Твердость НВ		
			Отпечаток			Отпечаток: Сред-нее зна-чение		
			1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й

Т а б л и ц а 4

Таблица результатов испытаний на твердость по Роквеллу

Номер опыта:	Материал образца:	Шкала:	Твердость НВ				Твердость по Бринеллю (перевод)
			Первое измерение	Второе измерение	Третье измерение	Среднее значение	
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:

К о н т р о л ь н ы е      в о п р о с ы

1. Характеристика твердости как свойство металла. Факторы, влияющие на нее.

2. Что такое твердость по Бринеллю? Методика измерения твердости по этому способу.

3. Принцип измерения твердости по Роквеллу, шкалы и области их применения.

4. Области применения способов измерения по Бринеллю и Роквеллу (преимущества и недостатки каждого из них).

Лабораторная работа № 2

ЗАКАЛКА СТАЛИ

Цель работы: практическое ознакомление с операциями термической обработки; изучение влияния режимов термической обработки на свойства и структуру конструкционной и инструментальной сталей.

Теоретическая часть

Термической обработкой называют процессы теплового воздействия на сплав по определенным режимам для изменения его структуры и свойств. От термической обработки зависят качество и стойкость деталей и инструмента. На результат термической обработки влияют следующие факторы: время (скорость) нагрева, температура нагрева, время (продолжительность) выдержки, скорость охлаждения.

Принято различать четыре основных вида термической обработки: закалку, отпуск, отжиг и нормализацию.

Закалкой стали называют термическую операцию нагрева стали до температуры выше критической точки  $A_{c1}$  или  $A_{c3}$  с последующим быстрым охлаждением, обеспечивающим получение неравновесной структуры. Назначение закалки стали - получение высокой твердости, прочности и износостойкости.



На получение оптимальной структуры после закалки и формирования конечных свойств, получаемых при отпуске закаленной стали, влияет правильный выбор температуры и времени выдержки при нагреве под закалку.

В зависимости от температуры нагрева различают полную и неполную закалку стали. Полной закалкой называют закалку с нагревом до температур однофазовой аустенитной области; неполной - с нагревом до межкритических температур, при которых сохраняется избыточная фаза - феррит или вторичный цементит.

Довзвлектоидные стали подвергаются полной закалке: оптимальной температурой нагрева является температура, на 30-50°C превышающая критическую точку  $A_{c3}$  (рис. 6). При таком нагреве исходная феррито-перлитная структура превращается в аустенит, а после охлаждения со скоростью больше критической образуется структура мартенсита. При нагреве дозввлектоидной стали до температуры выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$  в структуре наряду с аустенитом останется часть непревращенного феррита, который приводит при закалке к образованию мартенситно-ферритной структуры. Феррит, имеющий низкую твердость, снижает общую твердость закаленной стали и ухудшает ее механические свойства после отпуска.

Для дозввлектоидных сталей оптимальная температура закалки, наоборот, лежит в интервале между  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  и теоретически является неполной. При таком нагреве исходная структура - перлит и цементит - не будет полностью превращаться в аустенит, а часть вторичного цементита останется не растворенной и структура будет включать аустенит и цементит. После охлаждения со скоростью больше критической аустенит превратится в мартенсит. Структура закаленной стали будет состоять из мартенсита и цементита. Наличие в структуре

Феррит, имеющий низкую твердость, снижает общую твердость закаленной стали и ухудшает ее механические свойства после отпуска.

Для дозввлектоидных сталей оптимальная температура закалки, наоборот, лежит в интервале между  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  и теоретически является неполной. При таком нагреве исходная структура - перлит и цементит - не будет полностью превращаться в аустенит, а часть вторичного цементита останется не растворенной и структура будет включать аустенит и цементит. После охлаждения со скоростью больше критической аустенит превратится в мартенсит. Структура закаленной стали будет состоять из мартенсита и цементита. Наличие в структуре

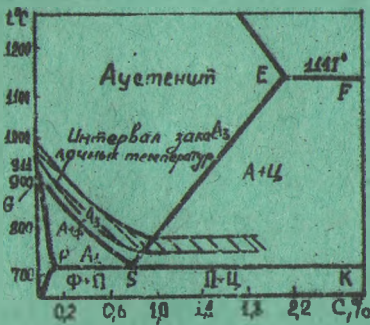


Рис. 6. Оптимальный интервал закалочных температур углеродистой стали

аустенит, а часть вторичного цементита останется не растворенной и структура будет включать аустенит и цементит. После охлаждения со скоростью больше критической аустенит превратится в мартенсит. Структура закаленной стали будет состоять из мартенсита и цементита. Наличие в структуре

Избыточного цементита повышает твердость, а следовательно, и износостойкость стали. Нагрев же выше  $A_{c3}$  не нужен и опасен, т.к. в этом случае твердость даже несколько падает вследствие растворения избыточного цементита и увеличения остаточного аустенита; при таком нагреве растет зерно аустенита, увеличивается возможность возникновения больших закалочных напряжений, интенсивнее обезуглероживается сталь с поверхности и т.д.

Нагрев под закалку производится в печах периодического и непрерывного действия, чаще - электрических или работающих на газообразном (жидком) топливе. Широко применяются печи-ванны, в которых изделие нагревается в расплавленных солях, например, в 100%  $BaCl_2$  или 78%  $BaCl_2$  и 22%  $NaCl$ , или в сильвините (естественный минерал, состоящий из  $NaCl + KCl$ ), реже - в металлах (обычно в свинце). Общая продолжительность нагрева, т.е. общее время  $T_{общ}$  пребывания деталей в нагревающей среде, состоит из времени  $T_H$  нагрева до заданной температуры и времени  $T_B$  выдержки при этой температуре:

$$T_{общ} = T_H + T_B.$$

Скорость нагрева зависит от химического состава стали, размера и формы обрабатываемых деталей, веса садки, характера расположения изделий в печи, типа нагревательного устройства, температуры нагрева и т.д.

При термической обработке в печах возможны три способа нагрева: 1) детали загружают в холодную или разогретую до невысокой температуры печь и нагревают до заданной температуры, время нагрева большое, но разность температур по сечению небольшая; этот способ применяют при нагреве деталей сложной формы и изготовленных из высоколегированных сталей; 2) детали загружают в печь, имеющую постоянную заданную температуру; время нагрева меньше, чем при первом способе, но разность температур по сечению больше; этот способ нагрева - самый распространенный; 3) детали загружают в печь, имеющую температуру выше заданной; по мере нагрева деталей температура печи снижается до заданной; при этом способе скорость нагрева, разность температур и возникающие внутренние напряжения - наибольшие; это - способ форсированного нагрева.

Время нагрева зависит от расположения деталей в печи и от их взаимного расположения. Детали нагреваются быстрее при всестороннем подводе тепла; самый медленный нагрев — при расположении нескольких деталей вплотную ( продолжительность нагрева увеличивается в четыре раза ) (см.табл.5).

При достижении заданной температуры нагрева проводят выдержку для полного прогрева изделия по сечению, завершения всех фазовых превращений и выравнивания состава аустенита по сечению. Время выдержки так же, как и температура нагрева, зависит от химического состава стали, формы и размеров изделия, а также от температуры нагрева. Чем выше температура нагрева, тем меньше требуется времени для полного прогрева детали и гомогенизации аустенита. Время выдержки при заданной температуре может быть принято равным 3 мин для углеродистых сталей и 5-6 мин для легированных сталей.

Т а б л и ц а 5

Примерные нормы нагрева деталей диаметром (толщиной) более 3 мм при нагреве для заковки до 750-900°С

Агрегат	:Время нагрева на 1 мм диаметра или наименьшей толщины для сталей, с	
	:углеродистых и низколегированных:	легированных
Электрическая печь	50-80	70-90
Соляная ванна	20-25	25-30
Свинцовая ванна	6-8	8-10

В процессе нагрева деталей в печах металл взаимодействует с атмосферой печи. Результатом такого взаимодействия являются окисление, ведущее к образованию окалины на поверхности нагреваемого металла, и обезуглероживание — частичное или полное выгорание углерода в поверхностных слоях стали.

Окисление приводит к потерям металла, усложняет обработку деталей, затрудняет получение высокой и равномерной твердости. Потери металла при нагреве составляют до 3% массы обрабатываемых деталей. В обезуглероженном слое появляются "мягкие пятна" и возникают растягивающие напряжения, что снижает прочность, износостойкость и предел выносливости, т.е. снижает срок службы деталей.

Для предохранения поверхности деталей от окисления и

обезуглероживания в рабочее пространство печи искусственно вводят защитную газовую среду, называемую контролируемой атмосферой, т.к. ее взаимодействие со сталью можно регулировать в желательном направлении. Для этой цели используют продукты диссоциации аммиака или частичного их сжигания ( $H_2 - H_2O - N_2$ ) или генераторный газ ( $CO - CO_2 - N_2$ ); предварительно очищаемый от  $CO_2$  и осушиваемый для предупреждения обезуглероживания. Для защиты от окисления могут применяться инертные газы - аргон, неон, азот. Предохранение деталей от окисления и обезуглероживания осуществляется также нагревом в хорошо раскисленных расплавленных солях.

В последнее время получает распространение нагрев с применением защитных покрытий - стекловидных эмалей. Для таких покрытий применяют механические смеси тонких порошков стекол с огнеупорными наполнителями. В процессе нагрева происходит плавление легкоплавких, а затем тугоплавких составляющих смеси, и тем самым обеспечивается получение стекловидной расплавленной пленки, изолирующей металл от печной атмосферы.

Наиболее ответственной операцией при закалке является охлаждение, цель которой - в большинстве случаев получение мартенситной структуры. Мартенситом называется перенасыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе с тетрагональной кристаллической решеткой. Содержание углерода в мартенсите вследствие отсутствия диффузионных процессов - такое же, как в исходном аустените. Твердость мартенсита зависит от содержания в нем углерода (рис.7).

Мартенсит в стали, содержащий 0,1% С, имеет твердость примерно HRC 30. При 0,7% С твердость мартенсита достигает максимального значения (HRC 64) и при дальнейшем увеличении содержания углерода она существенно не увеличивается.

Для превращения аустенита в мартенсит скорость охлаждения должна быть больше критической скорости,  $V_{кр}$  (рис.8). Критической скоростью закалки называется наименьшая скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается до мартенситного превращения. Если скорость охлаждения будет меньше  $V_{кр}$ , аустенит распадается на феррито-цементитную смесь (лейнит, сорбит, троостит).

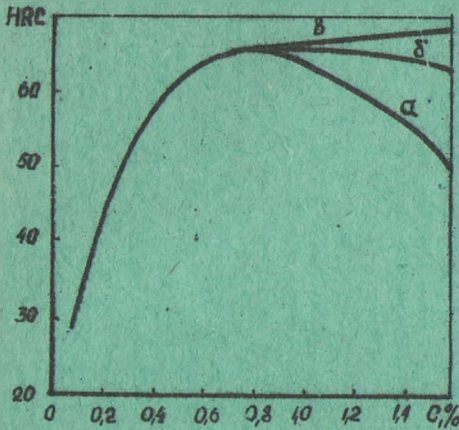


Рис. 7. Изменение твердости закаленной стали в зависимости от содержания углерода и температуры закалки: а - нагрев выше  $A_c$ , б - твердость мартенсита; в - нагрев только выше  $A_{c1}$  ( $770^\circ C$ )

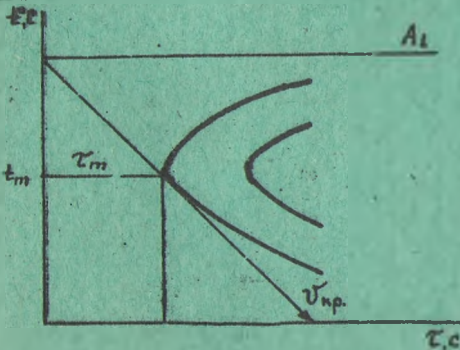


Рис. 8. Определение критической скорости закалки по диаграмме изотермических превращений

мартенситного превращения зависит от содержания углерода в аустените стали (рис. 9). При содержании в стали углерода больше 0,6% температура конца мартенситных превращений снижается в область отрицательных температур, поэтому при охлаж-

Бейнит (игольчатый троостит) - высокодисперсная смесь феррита и цементита игольчатого строения. Имеет твердость HB 4500-5500 МПа. Наряду с высокой твердостью обладает некоторой вязкостью.

Троостит представляет собой высокодисперсную смесь феррита и цементита, легко травится. Троостит закалки имеет пластинчатое строение и твердость HB 3500-4500 МПа. Обладает вязкостью с высоким пределом пропорциональности.

Сорбит - механическая смесь феррита и цементита, но более грубого строения, чем троостит. Частицы цементита в сорбите различимы под микроскопом при увеличении в 500 раз.

Мартенситное превращение реализуется в интервале температур  $M_n - M_k$ . Температуры начала  $M_n$  и конца  $M_k$

лении этих сталей до комнатных температур со скоростью больше критической в них остается повышенное количество остаточного аустенита (рис. 10). Скорость охлаждения не влияет на положение температур начала и конца мартенситного превращения. Однако скорость охлаждения в интервале температур мартенситного превращения (точек  $M_n$  и  $M_k$ ) влияет на количество остаточного аустенита. Немного ниже точки  $M_n$  более медленное охлаждение вызывает большую степень превращения.

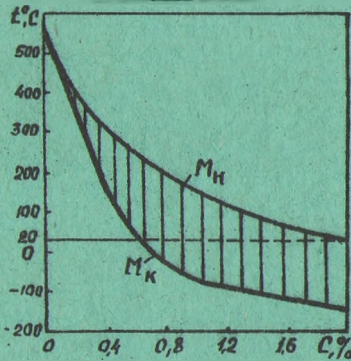


Рис. 9. Влияние содержания углерода на положение мартенситных температур — точек  $M_n$  и  $M_k$ .

Величина критической скорости закалки неодинакова для разных сталей и зависит от устойчивости аустенита. Чем больше его устойчивость (а следовательно, чем больше смещены вправо линии превращений на диаграмме изотермического распада аустенита), тем меньше критическая скорость закалки. Факторы, повышающие устойчивость аустенита, — следующие.

I. Лимический состав стали. Легирующие элементы ( $Mo$ ,  $Ni$ ,  $Cr$ ,  $Mn$  и др.), находящиеся в твердом растворе, обычно увеличивают устойчивость аустенита и понижают критическую

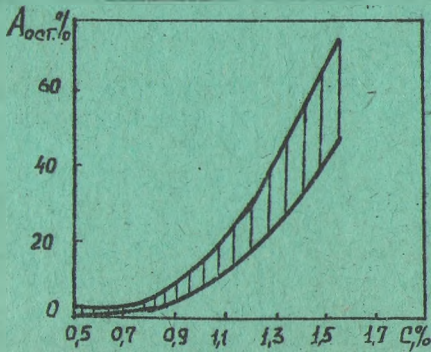


Рис. 10. Влияние содержания углерода на количество остаточного аустенита в закаленной стали

скорость закалки. Исключение составляет кобальт, который уменьшает устойчивость аустенита, увеличивая при этом критическую скорость закалки. Если элементы находятся в виде различных соединений (карбиды, интерметаллиды), то они могут создавать дополнительные центры кристаллизации и уменьшать устойчивость аустенита, а следовательно, повышать

критическую скорость закалки. В углеродистой стали наиболее низкую критическую скорость закалки имеет эвтектоидная сталь. Понижение содержания углерода, по сравнению с эвтектоидным составом, приводит к повышению критической скорости закалки. В заэвтектоидной стали с повышением содержания углерода при охлаждении с межкритического интервала критическая скорость закалки также повышается.

2. Металлургическая природа стали, т.е. способ раскисления. Например, раскисление только кремнием и марганцем повышает устойчивость аустенита, а раскисление титаном и алюминием, образующими дисперсные частицы оксидов и нитридов, может уменьшать устойчивость аустенита. В первом случае критическая скорость закалки меньше, чем во втором.

3. Исходная структура аустенита. Увеличение размера зерна приводит к повышению устойчивости вследствие уменьшения суммарной протяженности границ зерна, где происходит зарождение новой фазы, а следовательно, — к снижению критической скорости закалки.

В зависимости от состава стали скорость охлаждения при закалке должна быть достаточной, чтобы предотвратить распад аустенита, а для легированных сталей — и возможность бейнитного превращения. Однако быстрое охлаждение требуется не во всем интервале температур (от температуры нагрева до комнатной температуры), а только в пределах  $650-400^{\circ}\text{C}$ , т.е. в том интервале температур, в котором аустенит менее всего устойчив и быстрее всего превращается в феррито-цементитную смесь. Выше  $650^{\circ}\text{C}$  скорость превращения аустенита мала, поэтому сталь при закалке можно охлаждать в этом интервале температур медленно, но, конечно, не настолько, чтобы началось выпадение феррита или превращение аустенита в перлит. Интервал  $650-400^{\circ}\text{C}$  должен быть пройден быстро. В углеродистой стали ниже  $400^{\circ}\text{C}$  вновь начинается зона относительной устойчивости аустенита. Наконец, в мартенситном интервале, начиная с  $200-300^{\circ}\text{C}$ , особенно желательно замедленное охлаждение, чтобы к значительным структурным напряжениям не прибавились термические напряжения, возникающие в результате быстрого охлаждения. Практически таких охлаждающих сред нет.

Механизм охлаждения стали в жидкости заключается в следующем: в первый момент охлаждения образуется тонкая пленка

перегретого пара, которая является плохим проводником тепла и снижает скорость охлаждения. Первый этап относительно медленного охлаждения называется стадией пленочного кипения. Когда количество теплоты, отнимаемой жидкостью, больше количества теплоты, излучаемой нагретым телом, пленка разрывается и дальнейшее охлаждение происходит парообразованием на поверхности металла (стадия пузырьчатого кипения). Поскольку на парообразование расходуется большое количество теплоты, то поверхность изделия охлаждается очень интенсивно и температура ее быстро падает. Когда температура поверхности достигает температуры кипения жидкости, охлаждение происходит теплоотдачей и значительно замедляется (стадия конвективного теплообмена).

В качестве охлаждающих сред применяют воду, водные и другие масла, расплавленные соли и металлы, в ряде случаев - воздух (табл.6).

Т а б л и ц а 6

Охлаждающая способность различных зналочных сред в интервалах температур перлитного превращения и около мартенситной точки стали

Охлаждающая среда	Скорость охлаждения, град/с в интервале температур, °С	
	: 650-450	: 300-200
Вода при 18°C .....	600	270
Вода при 28°C .....	500	270
Вода при 50°C .....	100	270
Вода при 74°C .....	30	20
Вода + 10% едкого натра при 18°C	1200	300
Вода + 10% поваренной соли при 18°C	1100	300
Вода + 10% серной кислоты при 18°C	750	300
Вода мыльная при 18°C .....	30	200
Вода дистиллированная.....	250	300
Эмульсия масла в воде .....	70	200
Машинное масло .....	150	30
Керосин .....	160-180	40-60
Медные плиты .....	60	20
Железные плиты .....	35	15
Спокойный воздух .....	18	



В качестве охлаждающей среды при закалке углеродистых сталей, содержащих больше 0,3% углерода, применяется вода. Углеродистые стали, содержащие меньше 0,3% углерода, практически не закаливаются, т.к. при охлаждении в любой реальной среде нельзя получить скорость охлаждения больше критической, поэтому аустенит частично или полностью будет распадаться на феррито-цементитную смесь. Только в малых сечениях деталей из малоуглеродистых сталей, содержащих меньше 0,3% углерода, можно получить закаленную структуру (мартенсит).

Положительным свойством воды является быстрое охлаждение в районе наименьшей устойчивости аустенита ( $650-500^{\circ}\text{C}$ ); основные ее недостатки — большая скорость охлаждения в районе мартенситного превращения ( $300-200^{\circ}\text{C}$ ) и резкое снижение охлаждающей способности с повышением температуры воды. В то же время она неизменна в мартенситной области. Поэтому при закалке значительного количества металла в ванне с неподвижной водой охлаждающая способность ее с течением времени ухудшается. Важное значение имеет относительное движение изделия и охлаждающей жидкости. Чем больше относительная скорость движения детали и охлаждающей жидкости, тем легче разветвится флок и быстрее охлаждается деталь.

Охлаждающую способность воды при температуре  $650-450^{\circ}\text{C}$  можно изменять в широких пределах, вводя различные добавки. Однако в области мартенситного превращения она во всех случаях остается высокой. Для повышения охлаждающей способности в воду вводят поваренную соль  $\text{NaCl}$ , едкий натр  $\text{NaOH}$  и др. Они уменьшают возможность образования паровой пленки и способствуют более быстрому ее разрушению. Процесс кипения происходит более равномерно, чем в воде без добавок. С повышением температуры воды с добавками скорость охлаждения снижается менее интенсивно.

Масло как охлаждающая среда применяется при закалке легированных сталей. Масло в районе наименьшей устойчивости аустенита охлаждает примерно в 3 раза, а в районе мартенситных превращений в 10-15 раз медленнее, чем вода. Это — основное его преимущество. Закалывающая способность масла слабо меняется с повышением его температуры. Основным недостатком масла является малая скорость ох-

охлаждения в районе температур наименьшей устойчивости аустенита, что не позволяет применять масло в качестве закалочной среды при закалке средне- и высокоуглеродистых сталей, т.к. для этих сталей оно не обеспечивает скорость охлаждения больше критической. К недостаткам масла как закалочной среды также относятся: огнеопасность (при нагреве выше  $250-300^{\circ}\text{C}$  оно может загореться); постепенное загустение (вызывает снижение закалывающей способности) и пригорание масла на детали.

Таким образом, все применяемые реальные охлаждающие среды не могут полностью удовлетворить требования, предъявляемые к идеальному охладителю. В зависимости от состава стали, формы и размеров детали и требуемых в термически обработанной детали свойств следует выбирать оптимальный способ закалки, наиболее просто осуществимый одновременно обеспечивающий нужные свойства.

Чем сложнее форма термически обрабатываемой детали, тем тщательнее следует выбирать условия охлаждения, потому что чем сложнее деталь, тем большие внутренние напряжения возникают в ней при охлаждении.

Чем больше углерода содержит сталь, тем больше объемные изменения при превращении, тем при более низкой температуре происходит превращение аустенита в мартенсит; больше опасность возникновения деформаций, трещин, напряжений и других закалочных пороков; тщательнее следует выбирать условия закалочного охлаждения для такой стали.

#### Основные способы закалки

I. Закалка в одном охладителе (рис. II, режим 2) - наиболее простой способ. Для закалки мелких деталей сечением до 5 мм из углеродистых сталей и деталей из легированных сталей применяют масло. Для более крупных, но простых по форме деталей из углеродистой стали в качестве закалывающей среды применяют воду или водные растворы солей и щелочей. В качестве закалочных сред при этом способе рекомендуются: в инструментальном производстве 5-15%-ный раствор  $\text{NaCl}$  в воде; для изделий сложной формы, склонных к короблению и трещинообразованию - 40-50%-ный раствор  $\text{NaOH}$  в воде. Эти растворы обеспечивают скорость охлаждения при температурах  $650-450^{\circ}\text{C}$  до  $1400^{\circ}\text{C}$ ; при тем-

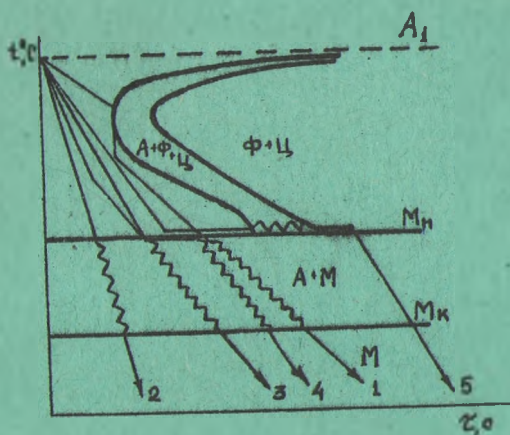


Рис. II. Схема охлаждения при различных способах закалки: 1 - идеальный режим охлаждения; 2 - непрерывная закалка в одном охладителе; 3 - прерывистая закалка в двух средах; 4 - ступенчатая закалка; 5 - изотермическая закалка

температурах 300–200°C скорость их охлаждения приближается к скорости охлаждения в масле.

Для крупных изделий сложной формы, изготовленных из легированных сталей с большой устойчивостью вустенита, типичными закалочными средами являются чистые минеральные масла или их смеси.

2. Прерывистая закалка в двух средах (рис. II, режим 3). Этот метод заключается в предварительном охлаждении детали в быстро охлаждающей среде (например, в воде) до температуры 300°C с последующим охлаждением в более мягкой среде (например, в масле). При закалке в масле крупных изделий целесообразно производить также прерывистое охлаждение с окончательным охлаждением на воздухе.

Прерывистая закалка в двух средах обеспечивает приближение к оптимальному режиму охлаждения I (рис. II). Недостатком ее является трудность установления момента переноса изделия из одной среды в другую для разностепенных изделий. Этот способ требует от термиста высокой квалификации.

3. Ступенчатая закалка (рис. II, режим 4). При этом способе деталь после нагрева переносят в расплавы солей, имеющие температуру немногим более высокую, чем температура начала мартенситного превращения (точка  $M_n$ ) для данной стали. После выдержки при данной температуре в течение времени необходимого для выравнивания температуры по всему сечению, деталь вынимают из соляной ванны и охлаждают на воздухе. Мартенситное превращение в этом случае происходит на воздухе.

В качестве охлаждающей среды при ступенчатой закалке применяют смеси легкоплавких солей, например: смесь, состоящую из 55% азотнокислого калия ( $KNO_3$ ) и 45% азотистокислого натрия ( $NaNO_2$ ) – температура плавления  $137^{\circ}C$ ; смесь, состоящую из 73% едкого калия ( $KOH$ ) и 25% едкого натрия ( $NaOH$ ) – температура плавления  $150^{\circ}C$  и др.

По сравнению с обычной закалкой в одной среде при ступенчатой закалке возникает значительно меньшее внутреннее напряжение, уменьшается коробление и возможность возникновения трещин. Используя возникающий при распаде аустенита в мартенсит эффект "сверхпластичности", в это время производят правку (рихтовку) изделий. Применение ступенчатой закалки ограничивается размерами деталей: до 10–12 мм для деталей из углеродистой стали и до 20–30 мм для деталей из легированных сталей.

4. Изотермическая закалка (рис. II, режим 5). Отличием этого вида закалки от ступенчатой является длительность выдержки выше точки  $M_n$  в нижней части области промежуточного превращения. Время выдержки должно быть достаточным для превращения аустенита в нижний бейнит. При промежуточном превращении легированных сталей наряду с бейнитом сохраняется остаточный аустенит (10–20%). Такая структура обеспечивает высокую прочность, пластичность и вязкость стали, т.е. ее высокую конструктивную прочность. Значительно снижается деформация изделий вследствие ликвидации термических напряжений. Фазовые (структурные) напряжения также уменьшаются в связи с тем, что превращение аустенита в бейнит происходит постепенно, в течение длительного времени. Изотермической закалке на бейнит подвергают обычно

среднеуглеродистые легированные стали, от которых требуется повышенная вязкость (ударно-режущий инструмент).

Средой для охлаждения при изотермической закалке обычно являются расплавленные соли и щелочи разных составов. Охлаждение в расплавах щелочей, если предварительно детали нагревались в жидких солях, позволяет получить чистую поверхность светло-серого цвета. Такой способ закалки называется "светлой закалкой".

5. Закалка с самоотпуском применяется для инструментов типа зубил, пуансонов, у которых рабочая часть должна иметь высокую твердость, а нерабочая - более низкую. Эту закалку выполняют двумя способами. 1) Сначала охлаждают только рабочую часть инструмента, затем производят отпуск ее по цветам побежалости. После достижения требуемого цвета побежалости инструмент полностью охлаждают в воде. 2) Изделие полностью охлаждают, затем нагревают нерабочую часть в соляной или в песочной ванне. За счет теплопроводности происходит нагрев рабочей части. Когда цвет побежалости на ней достигнет заданного, весь инструмент быстро охлаждают. Твердость постепенно снижается от рабочей к нерабочей части.

6. Струйчатая закалка заключается в охлаждении рабочей части изделия интенсивной струей воды. Ее применяют в том случае, когда требуется закалить часть детали.

Как уже указывалось, в закаленной стали, особенно содержащей более 0,6% С, всегда присутствует остаточный аустенит. Аустенит понижает твердость, износостойкость и нередко приводит к изменению размеров деталей, работающих при низких температурах, в результате самопроизвольного превращения аустенита в мартенсит.

Для уменьшения количества остаточного аустенита в закаленной стали применяют обработку холодом, заключающуюся в охлаждении закаленной стали до температур ниже нуля. Обработку холодом применяют для сталей, температура окончательного мартенситного превращения  $M_k$ , которых лежит ниже  $0^{\circ}C$ . При технической охлаждении проводится до температур  $-20...-100^{\circ}C$ , что вызывает превращение остаточного аустенита в мартенсит и повышает твердость сталей на 1-4 ед.

Выдержка стали после закалки при комнатной температуре более 3-4 ч стабилизирует аустенит, в результате чего он

менее полно превращается в мартенсит при дальнейшем охлаждении и уменьшает эффект обработки холодом. Поэтому обработку холодом выполняют сразу после закалки.

Обработку холодом применяют для режущего инструмента с целью повышения его твердости, стойкости и производительности; для измерительного инструмента - с целью достижения возможно более полной стабилизации размеров.

Неправильно проведенная закалка может вызвать различные дефекты. Наиболее распространенные из них: закалочные трещины, деформация, коробление, повышенная хрупкость, недостаточная твердость, мягкие пятна.

Закалочные трещины являются результатом резкого охлаждения или нагрева вследствие возникающих при этом внутренних напряжений - как термических, так и структурных. Трещины - неисправимый брак. Для предупреждения их образования рекомендуется избегать при конструировании деталей резких переходов от толстых сечений к тонким, острых углов, резких выступов; обеспечивать медленное охлаждение в области мартенситного превращения. Предотвращение деформации (изменение объема) и коробления (изменение внешней формы) обеспечивается медленным охлаждением в интервале мартенситного превращения. В этом случае необходимо применять ступенчатую и изотермическую закалки. Уменьшение коробления достигается также правильным способом погружения детали в охлаждающую жидкость; например, длинные стержневые детали необходимо охлаждать в вертикальном положении.

Повышенная хрупкость получается в том случае, если сталь была нагрета до температуры, немного выше критической, или при оптимальной температуре была дана очень большая выдержка. При перегреве происходит рост зерна аустенита, а после закалки образуется крупногольчатый мартенсит, который характеризуется чрезмерной хрупкостью. Устраняют дефект отжигом и последующей закалкой с соблюдением заданного режима.

Недостаточная твердость закаленной детали объясняется недогревом (низкая температура в печи, недостаточная выдержка при правильной температуре в печи) или недостаточно интенсивным охлаждением. В первом случае мартенсит не обладает достаточной твердостью (не содержит достаточно

углерода); во втором - не переохлаждается до мартенситного превращения, и структура полностью или частично состоит из продуктов перлитного распада аустенита (троостит, сорбит).

Повышение температуры печи или увеличение выдержки в первом случае устраняет пониженную твердость закаленных деталей. Во втором случае следует применять более интенсивное охлаждение, т.е. во время закалки энергично перемещать деталь в закалочной жидкости или применять вместо простой воды соленую или подкисленную.

При наличии на поверхности детали окислы или загрязнения, соприкосновении деталей друг с другом в процессе охлаждения, неравномерном охлаждении, неоднородной структуре стали (полосчатость, скопления феррита), загрязнении стали немаetalлическими включениями в некоторых зонах детали вместо мартенсита образуется троостит или сорбит и твердость детали получается неравномерной (возникнут мягкие пятна). Избежать этого дефекта можно путем выбора правильного способа охлаждения, проведения предварительной термической обработки и т.д.

#### Порядок выполнения работы

Для выполнения работы студентам предоставляются образцы различных марок углеродистых сталей (сталь 40, У8, У10), печи для нагрева образцов и баки с охлаждающими средами. Твердость образцов в исходном состоянии измерить на приборе Бринеля шариком 10 мм при нагрузке 30 000 Н, а после закалки - на приборе Роквелла алмазным конусом при нагрузке 1500 Н (шкала С). Перед определением твердости зачистить две параллельные стороны образца. Для построения кривых зависимости твердости от различных параметров данные измерения твердости по Роквеллу перевести в единицы Бринеля. Для более интенсивного и равномерного охлаждения в закалочной среде необходимо производить перемещение образцов.

При выполнении работы следует:

- 1) зарисовать часть диаграммы  $Fe - Fe_3C$  и указать на ней температурные интервалы нагрева под закалку;
- 2) замерить твердость образцов в исходном состоянии на приборе Бринеля;
- 3) провести закалку образцов в воде с температурами нагрева  $650^{\circ}C$ ,  $750^{\circ}C$ ,  $850^{\circ}C$ ;

4) измерить твердость закаленных образцов на приборе Роквелла;

5) по данным измерения твердости установить оптимальную температуру нагрева под закалку, обеспечивающую наибольшую твердость;

6) определить влияние скорости охлаждения на твердость термически обработанной стали. Нагрев образцов производить до установленной оптимальной температуры, образцы охлаждать в воде, масле и на воздухе;

7) по данным всей группы построить графики влияния содержания углерода на твердость закаленной стали, влияния температуры нагрева и скорости охлаждения при закалке на твердость стали. Скорость охлаждения в интервале температур 650-450°C равна: в воде 400°/с; в масле 50°/с; на воздухе 2°/с;

8) произвести закалку ударного инструмента (зубило) по способу закалки с самоотпуском и измерить твердость по Роквеллу рабочей части, в центре и в хвостовой части инструмента.

#### Содержание отчета

При составлении отчета необходимо дать краткое описание теоретических основ процесса закалки стали, характеристику строения и свойств полученных структур, привести экспериментальные и графические данные, результаты занести в табл. 7.

Т а б л и ц а 7.

Протокол исследования термической обработки стали

Номер образ-ца	Твердость до термообработки	Температура нагрева, °C	Охлаждающая среда	Твердость после термообработки
:	НВ : НРС	: °C	:	: НРС : НВ

#### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Закалка стали и ее назначение. Структура закаленной стали и причина ее высокой твердости.
2. Температура нагрева под закалку и ее влияние на структуру и свойства закаленной стали.
3. Критическая скорость закалки. Выбор охлаждающих сред.
4. Основные способы закалки.
5. Дефекты при закалке.



### Лабораторная работа № 3 ОТПУСК СТАЛИ

Цель работы: изучение влияния различных видов отпуска на структуру и механические свойства закаленной стали.

#### Теоретическая часть

Заключительной операцией термической обработки является отпуск стали, который включает в себя: нагрев закаленной стали до температур, лежащих ниже критической точки  $A_1$ , выдержку при данной температуре и последующее охлаждение с заданной скоростью.

При отпуске формируется окончательная структура и свойства изделия. Кроме того, отпуск полностью или частично устраняет внутренние напряжения, возникающие при закалке. Эти напряжения снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска.

Наиболее интенсивно напряжения снимаются в результате выдержки в течение 15-30 мин. После выдержки в течение 1,5 ч напряжения снижаются до минимальной величины, которая может быть достигнута отпуском при данной температуре.

Скорость охлаждения после отпуска не изменяет структуру стали, однако во избежание получения термических напряжений охлаждение ведут замедленное (на воздухе). Охлаждение на воздухе дает напряжения на поверхности в 7 раз меньше, а охлаждение в масле - в 2,5 раза меньше по сравнению с напряжениями при охлаждении в воде. Однако изделия из легированных сталей, склонных к обратной ступенчатой хрупкости, после отпуска при температуре 500-650°C следует охлаждать быстро.

Структура стали после закалки состоит из мартенсита и остаточного аустенита. Обе структурные составляющие являются неустойчивыми и при нагреве будут стремиться перейти в более устойчивое состояние, т.е. в структуру феррито-цементитной смеси. Мартенсит является структурой, обладающей наибольшим объемом, а аустенит - структурой с минимальным объемом, поэтому превращения должны совершаться с большим применением. При превращении мартенсита объем будет уменьшаться (слабые образцы), а при превращении аустенита - увеличиваться (резкие образцы).

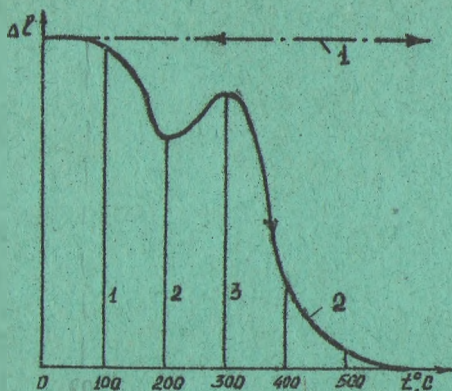


Рис. 12. Дилатометрическая кривая отпуска углеродистой стали: 1 - отожженной; 2 - закаленной

Преобразования при отпуске хорошо видны на дилатометрической кривой, показывающей изменение длины образца в зависимости от температуры нагрева (рис. 12). В соответствии с объемными изменениями, происходящими при отпуске углеродистых сталей, выделяют три температурных интервала (три превращения). Температурные границы превращений условны, положение их зависит от скорости нагрева,

длительности, выдержки и состава стали.

Нагрев мартенсита до  $80^{\circ}\text{C}$  не вызывает заметных изменений в структуре и на дилатометрической кривой. Начиная от  $80^{\circ}\text{C}$  и до  $200^{\circ}\text{C}$  наблюдается сокращение длины. Это будет, так называемое, первое превращение при отпуске. Рентгеновский анализ показал, что в этом интервале температур постепенно уменьшается параметр  $c$  решетки мартенсита; соотношение параметров решетки (отношение  $c/a$ ) стремится к единице. Уменьшение степени тетрагональности мартенсита происходит за счет выделения углерода из мартенсита в виде карбидных частиц, когерентно связанных с твердым раствором. Решетка мартенсита ( $\alpha$ -раствора) сопряжена с решеткой карбида по определенной кристаллографической плоскости, т.е. пограничный слой атомов железа принадлежит и мартенситу и карбиду. Выделяющиеся карбидные частицы имеют форму тонких пластинок толщиной в несколько атомных слоев и длиной в несколько сот ангстрем. Состав частиц точно не установлен; предполагают, что это карбид  $\text{Fe}_2\text{C}$ , который обозначают как  $\epsilon$  - карбид. В сталях с содержанием углерода менее 0,2% выделение метастабильного карбида не наблюдается. Привращение объема расширяющегося мартенсита происходит непрерывным увеличением числа частиц  $\epsilon$  - карбида с образованием вокруг них участков  $\alpha$  - твердого раствора.

Объединенных углеродом. Роста частиц  $\epsilon$  - карбидов не происходит из-за низкой скорости диффузии. Скорость процесса при первом превращении характеризуется временем полураспада, т.е. временем, необходимым для распада половины исходного мартенсита с высокой концентрацией углерода в мартенсит с меньшим содержанием углерода. Время полураспада высокоуглеродистой закаленной стали составляет при комнатной температуре несколько лет, при  $80^{\circ}\text{C}$  - 3 месяцев, при  $100^{\circ}\text{C}$  - 50 мин, при  $120^{\circ}\text{C}$  - 8 мин, при  $165^{\circ}\text{C}$  - 45 с.

В результате первой стадии образуется структура, называемая отпущенным мартенситом. Кристаллы отпущенного мартенсита сохраняют ту же морфологию, что и исходный мартенсит, но плотность дефектов в них меньше. По микроструктуре распад мартенсита при первом превращении выявляется потемнением игл мартенсита.

Дальнейший нагрев выше  $200^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению объема, что связано с превращением остаточного аустенита в отпущенный мартенсит. Это, так называемое, второе превращение при отпуске захватывает интервал температур  $200-300^{\circ}\text{C}$ . Выделение углерода уменьшает тетрагональность кристаллической решетки мартенсита, в результате чего остаточный аустенит получает возможность увеличить объем и превратиться в мартенсит отпуске. Это превращение - диффузионное и по своей природе похоже на бейнитное превращение первичного аустенита. К концу второго превращения  $\alpha$  - твердый раствор (мартенсит) содержит еще около 0,15-0,20% углерода, т.к. в температурном интервале второго превращения продолжается распад мартенсита.

При температуре  $300-400^{\circ}\text{C}$  в углеродистых сталях происходит третье превращение. При этих температурах обеспечивается уже диффузионное перераспределение углерода, которое происходит путем растворения мелких неустойчивых карбидных частичек в мартенсите, диффузии углерода через  $\alpha$  - твердый раствор (мартенсит) к более крупным устойчивым частицам карбида и последующего роста этих обособленных крупных частиц за счет непрерывного притока углерода. При этом также происходит превращение карбида  $\text{Fe}_2\text{C}$  в  $\text{Fe}_3\text{C}$ , т.е. в цементит. Частички цементита, как правило, выделяются по границам зерен и иглам мартенсита.

Полное выделение углерода из  $\alpha$  - твердого раствора (мартенсита) способствует снятию внутренних напряжений (напряжений второго рода), возникших в стали в связи с объемными изменениями, вызванными распадом мартенсита и остаточного аустенита. Структуру, образующуюся после отпуска при 300-400°C, называют трооститом отпуска.

дальнейший нагрев выше 400°C приводит к коагуляции цементитных частиц и укреплению блоков мозаичной структуры феррита. При температурах 500-600°C структура феррито-цементитной смеси имеет зернистое строение средней степени дисперсности, которая называется сорбитом. При температурах 650-700°C феррито-цементитная смесь имеет грубодисперсное зернистое строение и называется перлитом.

Превращения при отпуске протекают в очень малых объемах (внутри мартенситных игл), поэтому обычный микроструктурный анализ не позволяет выявить происходящих структурных изменений до температур отпуска порядка 550°C.

Структуру троостита и сорбита отпуска при обычном рассмотрении в микроскоп с увеличением в 500-600 раз трудно отличить от структуры мартенсита, т.к. эти структуры сохраняют мартенситную ориентировку, и только при увеличении в 1000 и более раз отчетливо видно строение сорбита. При нагреве выше 550°C мартенситная ориентировка пропадает.

Следует указать на существенное различие феррито-цементитных смесей, полученных в результате распада аустенита или мартенсита. В феррито-цементитной смеси (троостит закалки или сорбит закалки), получающейся при распаде аустенита, цементит имеет пластинчатую форму, а в получающейся при распаде мартенсита этой же смеси при температуре 400°C и выше цементит имеет зернистую форму. Различная форма цементита в феррито-цементитной смеси предопределяет и различие в свойствах. При одинаковых твердости, пределе прочности и относительном удлинении сталь с зернистой структурой имеет более высокие значения предела текучести, относительного сужения и ударной вязкости.

На диффузионные процессы, происходящие при отпуске закаленной стали, оказывают существенное влияние легирующие элементы. Они не только сами обладают малой диффузионной подвижностью, но и уменьшают диффузионную подвижность атомов железа, углерода и дефектов кристаллической решетки.

На процесс образования промежуточных карбидов и на обедненные вокруг них участки мартенсита, т.е. на процесс двухфазного распада, легирующие элементы существенного влияния не оказывают.

На вторую стадию распада мартенсита легирующие элементы могут существенно влиять, сохраняя пересыщенность мартенсита и замедляя рост карбидных частиц.

В углеродистой стали после отпуска при температуре  $300^{\circ}\text{C}$  тетрагональность  $\alpha$ -раствора почти полностью исчезает. При содержании в  $\alpha$ -растворе молибдена 2,0% температура распада повышается на  $100^{\circ}\text{C}$ , при легировании 1,9% V и 1,4% Ti - на  $150^{\circ}\text{C}$ , при совместном легировании хромом и вольфрамом - на  $200^{\circ}\text{C}$ . Значительно задерживают распад кобальт, кремний.

Легирующие элементы особенно значительно влияют на процесс коагуляции при температурах выше  $450^{\circ}\text{C}$ . При значительном легировании стали карбидообразующими элементами (Cr, W, Mo, V) возможно образование специальных карбидов ( $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_2C$ ). Специальные карбиды значительно дисперснее, чем цементит, поэтому выделение их является главной причиной появления вторичной твердости при отпуске.

Большинство легирующих элементов повышают температурную область распада остаточного аустенита до  $500-600^{\circ}\text{C}$ .

В высоколегированных сталях (высокохромистых, быстрорежущих) распад остаточного аустенита происходит не при температуре отпуска, а во время охлаждения. Причиной этого является выделение карбидов во время выдержки при температуре отпуска, в результате чего устойчивость аустенита и температура мартенситного превращения понижаются. Поэтому распад остаточного аустенита происходит во время охлаждения до комнатной температуры. Продуктом распада является мартенсит.

Таким образом, в зависимости от температуры нагрева в процессе отпуска формируются следующие структуры: отпущенного мартенсита, троостита и сорбита; при этом соответственно изменяются механические свойства стали (рис.13).

Как видно из рис.13, с повышением температуры отпуска предел прочности и твердость понижаются, а пластичность и ударная вязкость повышаются.

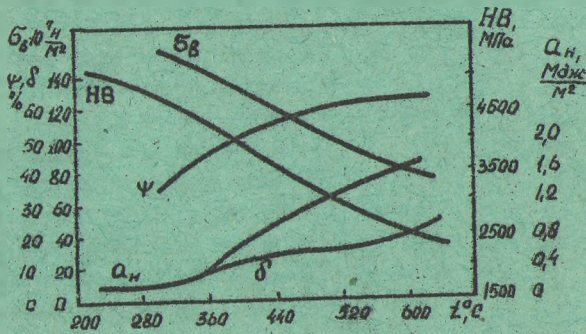


Рис. 13. Механические свойства стали 40 в зависимости от температуры отпуска

В соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к изделиям, применяют следующие виды отпуска: низкий, средний и высокий.

Низкий отпуск — нагрев закаленной стали до 150–200°C. Время выдержки при этом рекомендуется 2,0–3,0 ч. Выдержка должна обеспечить получение стабильной структуры для данной температуры отпуска.

Низкий отпуск применяется для частичного снятия внутренних напряжений, повышения вязкости и пластичности стали без заметного снижения твердости. Этому виду отпуска подвергают детали, для которых требуется высокая твердость и износоустойчивость (измерительный и режущий инструмент, изделия из цементуемых сталей).

Структура стали — отпущенный мартенсит, твердость HRC 56–64.

Средний отпуск — нагрев закаленной стали до 300–400°C. Время выдержки рекомендуется 1,0 – 2,0 ч. При этом отпуске обеспечивается относительно высокая твердость изделия (HRC 40 – 45) и максимальный предел упругости при достаточном пределе прочности. Этот вид отпуска чаще всего применяют при изготовлении рессор и пружин.

После среднего отпуска получает структуру троостита отпуска.

Высокий отпуск — нагрев закаленной стали до 500–600°C. Время выдержки рекомендуется 0,5–1 ч. Структура стали после высокого отпуска — сорбит отпуска, твердость HRC 30–32. Высокий отпуск обеспечивает более полное снятие напряжений и дает наилучшее сочетание прочности, пластичности и ударной вязкости. Этот отпуск применяют при изготовлении шатунов, ответственных крепежных изделий и деталей машин, изготовляемых из конструкционных сталей.

Двойная термическая обработка, состоящая в закалке с последующим высоким отпуском, существенно улучшающая общий комплекс механических свойств, является основным видом термической обработки конструкционных сталей и называется улучшением.

Отпуск некоторых легированных сталей при температурах 250–400°C и 500–650°C может снизить ударную вязкость (рис. 14). Такое снижение вязкости получило название отпускной хрупкости. Первый вид отпускной хрупкости, называемой от-

пускной хрупкостью первого рода, наблюдается в результате отпуска при температуре 250–400°C.

Причиной отпускной хрупкости первого рода является распад мартенсита с неоднородным выделением карбидов по границам и в объеме зерна; больше карбидов выделяется в пограничных слоях, что и вызывает хрупкое разрушение с характерным межкристаллитным изломом по границам бывших аустенитных зерен. Отличительной особенностью

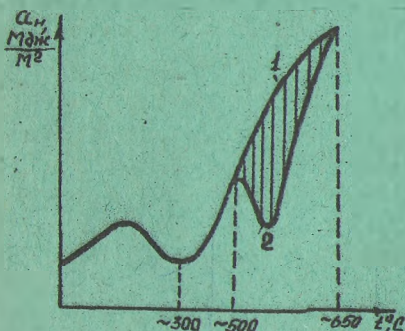


Рис. 14. Изменение ударной вязкости легированной стали от температуры отпуска:  
1 — при быстром охлаждении;  
2 — при медленном охлаждении

хрупкости первого рода является ее необратимый характер; повторный отпуск при этой же температуре не улучшает вязкости. При увеличении температуры выше 400°C распад мартенсита распространяется и в глубь зерна, в результате чего структура выравнивается и хрупкость устраняется, но при этом снижается твердость. Повторный нагрев при 250–400°C отпускной хруп-

кости не вызывает. Кроме легированных сталей, отпускная хрупкость первого рода свойственна и углеродистым сталям.

Отпускная хрупкость второго рода при температуре 500–650°C возникает только в том случае, если охлаждение после нагрева – медленное (в печи или на воздухе). Причиной хрупкости является выделение по границам зерен каких-либо фаз (фосфидов, карбидов, нитридов и др.). При быстром охлаждении после нагрева (в воде или масле) эти фазы выделиться не успевают и хрупкости не наблюдается. Характерной особенностью отпускной хрупкости второго рода является ее обратимость. Хрупкость, возникшая в результате медленного охлаждения с температур 500–650°C, может быть устранена повторным отпуском с последующим быстрым охлаждением или может быть вызвана вновь дополнительным отпуском определенной длительности при температуре 500–550°C.

Наиболее восприимчивы к отпускной хрупкости второго рода стали, содержащие повышенное количество фосфора или марганца, а также хромомарганцевые и хромоникелевые стали. Введение в сталь небольшого количества (0,2–0,3%) молибдена или вольфрама (0,5–0,7%) значительно уменьшает склонность стали к отпускной хрупкости второго рода.

#### Порядок выполнения работы

Для выполнения работы студентам предоставляют образцы закаленных сталей, печи для нагрева образцов.

Студенты должны:

- 1) измерить твердость закаленных образцов на приборе Роквелла;
- 2) выбрать режимы отпуска закаленной стали с целью:
  - а) снятия внутренних напряжений без снижения твердости;
  - б) получения твердости НРС 40–45; в) получения твердости НРС 28–32;
- 3) произвести по выбранным режимам отпуск закаленных образцов;
- 4) измерять твердость образцов после отпуска на приборе Роквелла; результаты занести в табл. 8;
- 5) построить график зависимости твердости от температуры отпуска;



### Содержание отчета

В отчете необходимо описать структурные превращения, протекающие в стали в зависимости от температуры отпуска, привести экспериментальные и графические данные, дать характеристику строения и свойств получения структур.

Т а б л и ц а 8

#### Протокол исследования отпуска закаленной стали

Номер образца:	Твердость после закалки НРС:	Температура отпуска, °С:	Время выдержки при отпуске, мин:	Твердость после отпуса НРС:	Предполагаемая микроструктура:
----------------	------------------------------	--------------------------	----------------------------------	-----------------------------	--------------------------------

#### К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы

1. Теория отпуска стали.
2. Назначение и виды отпуска стали.
3. Различия в строении продуктов аустенита и мартенсита.
4. Улучшение стали.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

Гуляев А.П. Металловедение. - М., 1977. - 646 с.  
Блантер М.Э. Металловедение и термическая обработка. - М., 1963. - 416 с.  
Ляхтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка. - М., 1976. - 407 с.  
Тылкин М.А. Справочник термиста ремонтной службы. - М., 1981. - 648 с.  
Филипов С.А., Сиргер Н.В. Справочник термиста. - М., 1975. - 352 с.  
Термическая обработка в машиностроении. Справочник под ред. Ю.М.Ляхтина и А.Г.Рахштадта. - М., 1980. - 783 с.

#### О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение .....	3
Лабораторная работа № 1. Определение твердости металлов .....	3
Лабораторная работа № 2. Закалка стали.....	16
Лабораторная работа № 3. Отпуск стали .....	32