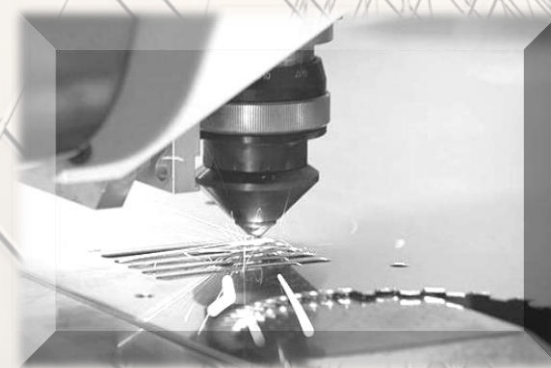


МГТУ им. И.И.Щадрякина

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ



ISBN 978-985-477-688-0



9 789854 776880

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Мозырский государственный педагогический университет
имени И. П. Шамякина»

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по профессионально-техническому обучению в качестве пособия
для студентов учреждений высшего образования, обучающихся
по специальности 1–08 01 01 «Профессиональное обучение (по направлениям)».
Направление специальности 1–08 01 01–05 «Профессиональное обучение
(строительство)»*

Мозырь
МГПУ им. И. П. Шамякина
2019

УДК 620.22
ББК 34.2
М12

Составитель **А. Л. Голозубов**, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры инженерно-педагогического образования
УО МГПУ им. И. П. Шамякина

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент, заместитель директора
по научно-технической работе УЧНПП «Технолит»
С. В. Галагаев;
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Технологии металлов»
ГУВПО «Белорусско-российский университет»
Д. И. Якубович

Печатается по решению редакционно-издательского совета
учреждения образования
«Мозырский государственный педагогический университет
имени И. П. Шамякина»

Материаловедение и технология сварки : пособие / сост.
М12 А. Л. Голозубов. – Мозырь : МГПУ им. И. П. Шамякина, 2019. –
62 с.

ISBN 978-985-477-688-0.

Пособие содержит лабораторные работы по курсу «Материаловедение
и технология сварки». Приведены сведения о методах измерения твердости
сталей, рассмотрены вопросы макро- и микроскопического анализа структур
сталей и сплавов в равновесном состоянии, уделено внимание термической
обработке сталей и строению зоны термического влияния сварных швов.

Издание предназначено для студентов, обучающихся по специальности
1-08 01 01-05 «Профессиональное обучение (строительство)».

УДК 620.22
ББК 34.2

ISBN 978-985-477-688-0

© Голозубов А. Л., составление, 2019
© УО МГПУ им. И. П. Шамякина, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
Лабораторная работа № 1. Испытания металлов на твердость	5
Лабораторная работа № 2. Микроскопический анализ металлов	28
Лабораторная работа № 3. Микроструктура железоуглеродистых сплавов в равновесном состоянии	35
Лабораторная работа № 4. Термическая обработка стали	43
Лабораторная работа № 5. Исследование строения сварного шва и зоны термического влияния	49
Список рекомендуемой литературы	60

МГТУ им. И.П.Шамякина

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Материаловедение и технология сварки» в соответствии со стандартом образования обеспечивает специальную подготовку педагогов-инженеров строительного профиля и является одной из ведущих дисциплин, формирующих инженерный подход к пониманию сущности процессов, происходящих в металлах и сплавах при термическом воздействии сварочной дуги. Знания по дисциплине необходимы для успешного освоения специального курса – «металлические конструкции».

Целью лабораторных работ является практическое закрепление полученных на лекциях теоретических знаний в области материаловедения и технологии сварки.

Для достижения поставленной цели в методических указаниях приведены лабораторные работы, позволяющие системно изучить основные вопросы измерения твердости сталей, макро- и микроскопического анализа структур сталей и сплавов в равновесном состоянии, термической обработки сталей и строения зоны термического влияния сварных швов.

Лабораторные работы выстроены в логической последовательности в соответствии с изучаемым теоретическим материалом. Лабораторные работы содержат теоретический раздел с дополнительными пояснениями (графики, рисунки, фотографии и т.д.), достаточный для понимания учебного материала, и практическую часть, которую студенты должны выполнять самостоятельно, разбившись на бригады из двух-трех человек. По каждой лабораторной работе студенты оформляют индивидуальный отчет, форма которого приведена в каждой лабораторной работе.

Основной задачей выполнения лабораторных работ является развитие самостоятельности и творческих способностей студентов при изучении учебного материала. Особое внимание необходимо уделить выводам, в которых каждый студент должен отразить свое понимание полученных экспериментальных результатов (проделанной работы) и высказать собственные суждения о сущности изучаемого явления, а также дать оценку степени решённости поставленных перед ним задач, а, возможно, и предложить пути более эффективного достижения нужного результата.

Для более полного и успешного выполнения и защиты лабораторных работ студентам рекомендуется перед выполнением работ ознакомиться с дополнительной литературой, что позволит расширить кругозор и значительно повысить качество обучения. Для повышения эффективности самостоятельной работы студентов по подготовке к занятиям представлен список основной и дополнительной литературы.

Лабораторная работа № 1

Испытания металлов на твердость

Цель работы: ознакомиться с существующими методами определения твердости, получить практические навыки в определении твердости конструкционных материалов и пересчете чисел твердости, определяемых различными методами (с привлечением аппарата математической статистики); научиться статистически достоверно оценивать величину временного сопротивления материала без разрушения образца. Освоить принципы работы твердомеров типа ТВ 5004 (Бринелль) и ТК (Роквелл) и приобрести навыки определения твердости материалов по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.

Приборы и оборудование

1. Прибор Бринелля (твердомер ТВ 5004).
2. Прибор Роквелла (твердомер ТК).

Содержание работы

Твердостью называется свойство материала оказывать сопротивление проникновению в него другого более твердого тела (индентора), не испытывающего остаточной деформации. Внедряемый (вдавливаемый) индентор имеет определенную форму и размеры и не должен получать остаточную деформацию от действия прикладываемых к нему статических или динамических нагрузок. Измерение твердости вследствие простоты и простоты осуществления, а также возможности без разрушения изделия судить о его свойствах получило широкое применение для контроля качества металла в металлических изделиях и деталях. Существует целый ряд методов измерения твердости, которые отличаются друг от друга формой используемого индентора, условиями приложения нагрузки, методикой расчета величины твердости, временем нагружения, твердостью испытываемого материала, размерами детали (образца), толщиной испытываемого слоя, твердость которого нужно измерить и т. п. По измеренной твердости можно охарактеризовать упругие и упруго-пластические свойства металла, его способность сопротивляться малым или большим деформациям, в том числе разрушению. Общим для всех способов является приложение нагрузки на индентор при контакте с испытываемым материалом. Методика определения твердости, требования к оборудованию, приборам и образцам и т. д. регламентируются государственными стандартами.

Оценивается твердость по *числам твердости*, размерность которых определяется принципом измерения. Числа твердости являются вторичными, производными характеристиками механических свойств, зависящими от первичных, основных – модуля упругости, временного

сопротивления и др., от продолжительности действия нагрузки, от способа испытаний и вычисления твердости. Поэтому сравнимые результаты, даже в пределах одного метода, получаются при строгой регламентации процедуры испытаний, которая часто определяется стандартом. Числа твердости для одного и того же материала, определяемые различными способами, получаются различным как по величине, так и по размерности. С помощью специальных таблиц, номограмм или эмпирических формул можно осуществлять пересчет чисел твердости.

В настоящее время существует около 30 разновидностей испытаний на твердость, но наибольшее распространение получили три из них – это методы измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, а также метод измерения микротвердости. Во всех случаях контакт осуществляется вдавливанием индентора определенной формы и размера со степенью деформации 30...40 %. При этом реализуется состояние всестороннего неравномерного сжатия с коэффициентом “мягкости” $\alpha > 2$, что позволяет производить оценку твердости практически любых, в том числе и очень хрупких материалов.

Учитывая неизбежный разброс значений твердости, обусловленный как ошибками измерения, так и неоднородностью механических свойств материала, испытаниям подвергается обычно несколько образцов, а на каждом образце делают несколько вдавливаний индентора. Затем проводят статистическую обработку результатов испытаний, без которой нельзя делать достоверные выводы. При этом число измерений принято называть «выборкой».

Испытание на твердость – простой метод неразрушающего контроля. Экспериментально доказано, что его результаты коррелируют со статистическими характеристиками механических свойств, например, можно статистически достоверно, т. е. с определенной статистической погрешностью – стандартной ошибкой, определять временное сопротивление σ_B . Она также служит для косвенного суждения с определенной точностью о других характеристиках материала – пределе текучести, временном сопротивлении, склонности к ползучести и др.

Измерение твердости получило широкое распространение как в заводской практике, так и при выполнении научных исследований. Такие испытания используются в следующих целях:

- для оценки твердости сплавов как характеристики, косвенно отражающей механические свойства;
- для контроля за качеством термических обработок, вызывающих изменение свойств в поверхностном слое, например, цементации, поверхностной закалки, электромеханической обработки и др.;
- для контроля за изменением механических свойств с течением времени эксплуатации (например, контроль за состоянием трубопроводов).

Испытания на твердость менее сложны и не дорогостоящи: они позволяют определять механические свойства и в небольших объемах, допускают текущий контроль изделий в процессе производства и эксплуатации, не влияют на их работоспособность и, что особенно ценно, относятся к неразрушающим методам механических испытаний.

Определение твердости по Бринеллю

Метод измерения твердости металлов, впервые описанный Бринеллем в 1900 году, заключается во вдавливании индентора (шарика) стального или из твердого сплава диаметром D в образец (изделие) под действием силы, приложенной перпендикулярно поверхности образца в течение определенного времени, и измерении диаметра отпечатка d после снятия силы (рисунок 1.1).

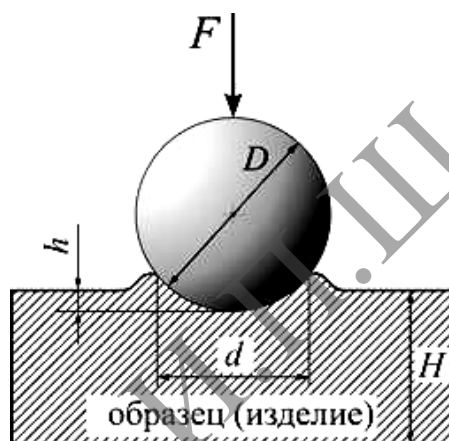


Рисунок 1.1. – Вид деформированного образца после вдавливания шарика

Измерение твердости по методу Бринелля осуществляется на твердомере типа ТВ 5004 в соответствии с ГОСТом 23677-79. В качестве индентора применяются шарики диаметром 1; 2,5; 5,0 и 10 мм, изготовленные из термически обработанной высокоуглеродистой стали с чистой поверхностью по двенадцатому классу (ГОСТ 2789-73). Выбор диаметра шарика, нагрузки и времени нагружения производится по таблице 1.1

Показателем твердости является число твердости по Бринеллю, обозначаемое HB и представляющее собой отношение усилия F к площади поверхности шарового сегмента A :

$$HB = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

$$A = \pi \cdot D \cdot h \quad (1.2)$$

где h – глубина отпечатка, мм,

D – диаметр шарика, мм.

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad (1.3)$$

где d – диаметр отпечатка, мм.

Отсюда

$$A = \frac{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2} \quad (1.4)$$

Тогда число твердости НВ рассчитывается по формуле:

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.5)$$

Твердость по Бринеллю выражается в кг/мм², но по стандарту размерность обычно не записывается. В то же время в системе СИ она указывается – МПа. Верхний предел измерения твердости этим методом составляет НВ 450, так как при испытании более твердых материалов происходит деформация шарика, превышающая стандартизированный допуск.

При испытаниях одного и того же металла шариками разных диаметров (для получения одинаковых значений твердости), необходимо соблюдать определенное соотношение между действующим на него усилием и диаметром шарика $K = F/D^2$. Значение K выбирают в зависимости от металла и его твердости в соответствии с ГОСТ 23677-79 таким образом, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах от 0,24 до 0,6 D , $K = 30$ для сталей и высокопрочных сплавов. Для цветных металлов и сплавов принимают $K = 10$, а для металлов с малой твердостью $K = 2,5$ (подшипниковые сплавы) или $K = 1$ (свинец, олово). На практике по диаметру d отпечатка находят число твердости HB , используя таблицы, составленные для каждого из рекомендуемых соотношений F и D . Современное оборудование позволяет находить твердость по-другому – определяя глубину h внедрения шарика (рисунок 1.1). Пластическое деформирование материала в окрестности внедряемого индентора связано со структурными изменениями, происходящими в металле. Длительность протекания этих изменений зависит от свойств материала. Для черных металлов достаточно 10...15 секунд выдержки под нагрузкой, для большинства цветных – 30 секунд. В некоторых случаях для завершения пластического течения устанавливают 180 секунд или особо оговаривают условия испытания. Когда твердость испытываемого металла соизмерима с твердостью индентора – стального шарика, то вследствие деформации шарика искажается форма отпечатка, что влияет на точность результатов. Во избежание существенных ошибок (из-за смятия шарика) обычно вводится ограничение на применение метода Бринелля: испытывают материалы с твердостью, не превышающей 450 HB . Для испытаний более твердых материалов используют либо шарик из твердого сплава, либо другие методы, например, Виккерса или Роквелла, где индентором служит алмаз – самый твердый материал из известных в природе. Для железа, стали, чугуна и других прочных сплавов рекомендуются следующие

условия испытаний: D = 1,0 мм, F = 294,2 Н; D = 2 мм, F = 1177 Н; D = 2,5 мм, F = 1839 Н; D = 5,0 мм, F = 7355 Н; D = 10,0 мм, F = 29420 Н. Минимальная толщина испытуемого образца – 0,09 мм. При этом испытания проводятся шариком диаметром 1,0 мм при нагрузке 49,03 Н. Наиболее часто определение твердости осуществляется шариком диаметром 10,0 мм при нагрузке 29420 Н и продолжительностью выдержки под нагрузкой 10 с. В этом случае твердость обозначается цифрами, характеризующими ее величину, и буквами HB, например: 170 HB. При других условиях испытаний после букв HB указываются условия испытания в следующем порядке D (мм), F (Н) и время выдержки под нагрузкой (с).

Твердость по Бринеллю обозначают символом *HB* (*Hardness Brinell*) или *HBW* (*Hardness Brinell Wolfram carbide*):

– *HB* – при применении стального шарика (твердость детали менее 450 единиц);

– *HBW* – при применении шарика из твердого сплава (твердость детали более 450 единиц, но не более 650 единиц).

Таблица 1.1. – Определение твердости различных материалов методом Бринелля

Материал	Интервал чисел твердости по Бринеллю, HB	Толщина испытуемого образца, мм	Диаметр шарика, мм	Нагрузка, кН	Выдержка под нагрузкой, с
Черные металлы	130...450	От 6 до 3 вкл.	10	29420	От 10 до 15
		От 4 до 2 вкл.	5	7355	
		Менее 2	2,5	1839	
	140 и менее	Более 6	10	9807	
		От 6 до 3 вкл.	5	2452	
Цветные металлы и сплавы (медь, латунь, бронза и т.д.)	130 и более	От 6 до 3 вкл.	10	29420	От 10 до 180
		От 4 до 2 вкл.	5	7355	
		Менее 2	2,5	1839	
	35...130	От 9 до 3 вкл.	10	9807	
		От 6 до 3 вкл.	5	2452	
Цветные металлы и сплавы (алюминий, подшипниковые сплавы и т.д.)	8...35	Более 6	10	2452	
Олово, свинец	4...20	Более 6	10	981	
Алюминий, магний и их сплавы	16...100	От 6,4 до 1 вкл.	10	4903	
				1226	
Титан губчатый	ГОСТ 9853.8-79		10	14710	

Символу *HB* (*HBW*) предшествует числовое значение твердости (с округлением до трех значащих разрядов), а после символа указывают диаметр шарика [мм], значение приложенной силы [кгс], продолжительность выдержки [с], если она отличается от 10 или 15 секунд.

Примеры обозначений:

– 250 *HB* 5/750 – твердость по Бринеллю 250, измеренная стальным шариком диаметром 5 мм, при нагрузке 750 кгс (7355 Н) и продолжительности выдержки 10–15 с;

– 575 *HBW* 2,5/187,5/30 – твердость по Бринеллю 575, измеренная шариком из твердого сплава диаметром 2,5 мм, при нагрузке 187,5 кгс (1839 Н) и продолжительности выдержки под нагрузкой 30 с.

При определении твердости стальным шариком (или шариком из твердого сплава) диаметром 10 мм при нагрузке 3000 кгс (29420 Н) и продолжительности выдержки 10...15 секунд твердость по Бринеллю обозначают только числовым значением твердости и символом *HB* или *HBW* (например, 300 *HB*).

Устройство и принцип работы прибора Бринелля

На рисунке 1.2 приведена принципиальная схема твердомера ТБ 5004.

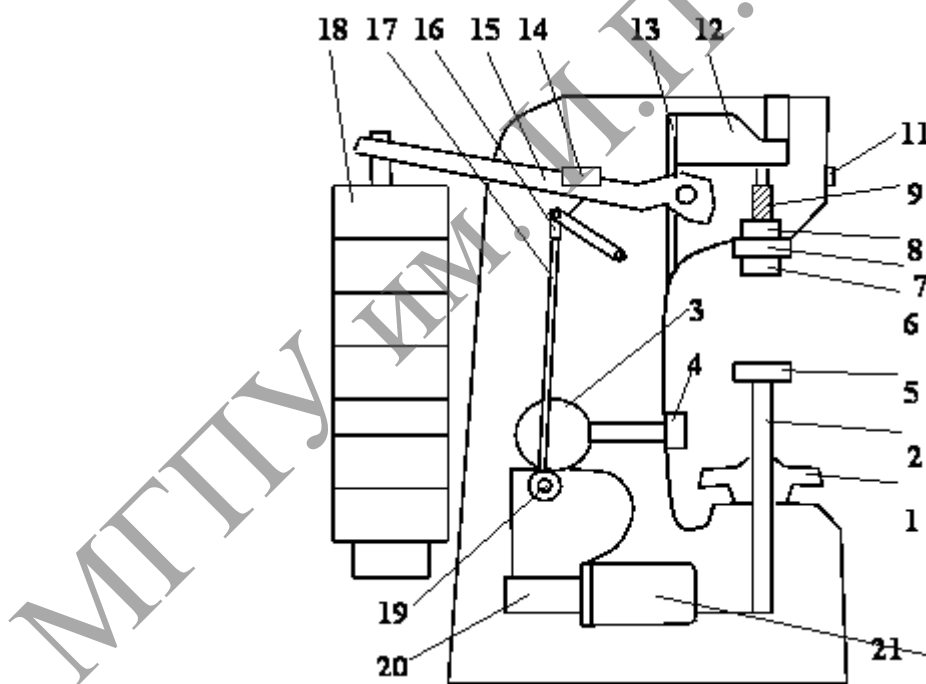


Рисунок 1.2. – Схема прибора для определения твердости по Бринеллю

Основными частями прибора являются:

1. Шпиндель 6, в который вставляются сменные инденторы с шариками разного диаметра.
2. Подвеска 18 с набором грузов.

3. Маховик 1, перемещающий опорный столик 5 с образцом в вертикальном направлении.

4. Система рычагов 12, 15, 17–19, передающих нагрузку на испытуемый образец.

5. Электродвигатель 21, обеспечивающий работу прибора.

6. Пульт управления с переключателями режима работы, сигнальными лампами “контроль”, “выдержка”, “сеть”, реле времени.

7. Кнопки “пуск” и “стоп”.

Требования к образцам и приборам при определении твердости оговариваются соответствующими ГОСТами.

Стандарты предусматривают следующие основные требования при измерении твердости.

1) Поверхность испытуемого образца должна быть тщательно подготовлена и свободна от окалины и других посторонних веществ. При подготовке поверхности надо принять меры предосторожности против возможного наклепа или нагрева поверхностного слоя в результате механической обработки.

2) Испытуемый образец должен быть без короблений и лежать на столике прибора устойчиво. Необходимо обращать особое внимание на качество поверхности образца не только со стороны внедрения индентора, но и с обратной стороны, которой он кладется на предметный столик прибора – она должна быть ровной, без местных выступов (например, не допускается с этой стороны наличие даже мелких отпечатков от шарика, конуса или пирамиды). Это объясняется тем, что под действием нагрузки выступы будут сминаться, что приведет к кажущемуся уменьшению твердости в результате увеличения размера h . Требования этого пункта имеют особое значение при определении твердости по Роквеллу.

На приборе Бринелля проводятся 5 замеров. Образец с нанесенными отпечатками снимается с предметного столика прессы Бринелля. Измерение диаметров отпечатков производится с помощью специального отсчетного микроскопа (лупа Бринелля) на лабораторном столе. На рисунке 1.3 показано изображение отпечатка, видимое в микроскоп (увеличение микроскопа обычно равно 24). Один из краев отпечатка необходимо совместить с нулевым штрихом шкалы и произвести отсчет по шкале с точностью до $1/2$ деления. Видимое в микроскоп расстояние между большими штрихами соответствует одному миллиметру. Полученный размер диаметра отпечатка записывают сразу в миллиметрах. Так, на рисунке 1.3 имеем: $d = 3,40$ мм. Результаты измерения диаметров отпечатков рекомендуется записать в таблицу 1.2.

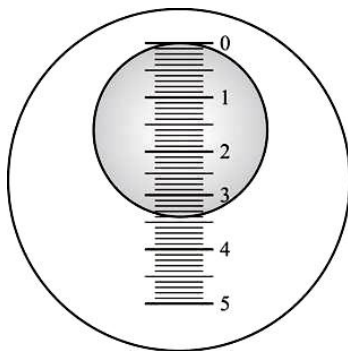


Рисунок 1.3. – Изображение отпечатка, видимое в микроскоп

Определение *HB* по диаметру отпечатка предлагается провести с помощью таблиц или рассчитать по формуле (1.5).

Определение твердости по Роквеллу

Назван по имени американского металлурга С. П. Роквелла (*S. P. Rockwell*).

Метод Роквелла был предложен в 1920 г. и в настоящее время получил самое широкое распространение. Это объясняется, во-первых, упрощенной процедурой определения твердости, когда число твердости считывается непосредственно со шкалы прибора, а во-вторых, его универсальностью – с его помощью можно испытывать массивные и тонкие образцы из твердых и мягких материалов. В качестве индентора используется алмазный конус с углом при вершине 120° и радиусом закругления 0,2 мм (шкалы А и С) и стальной шарик диаметром 1,5875 мм (1/16 дюйма) (шкала В).

Процесс нагружения осуществляется под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок – предварительной $F_0 = 98$ Н (10 кгс) и общей F_1 .

$$F = F_0 + F_1$$

Предварительная нагрузка подается вручную и не снимается до конца испытаний, что обеспечивает повышенную точность измерений, т. к. исключается влияние вибраций и поверхностного слоя.

Таблица 1.2. – Нагрузка на индентор и диапазоны измерений твердости

Шкалы Роквелла	Нагрузка на индентор, кгс			Диапазоны измерений
	Предварительная	Основная	Общая	
А	10	50	60	70...85 <i>HRA</i>
В	10	90	100	25...100 <i>HRB</i>
С	10	140	150	20...67 <i>HRC</i>

Измерение твердости по шкале С. Если индентор внедрится в материал на глубину $h=0,2$ мм, то твердость такого материала условно считается равной нулю. Если же под действием той же нагрузки F индентор не внедряется в материал (пластическая деформация равна нулю), то твердость такого материала принято считать равной 100 единицам Роквелла. Таким образом, за единицу твердости принята величина, соответствующая перемещению индентора на 0,002 мм. Применение такой «перевернутой» шкалы, представленной на рисунке 1.4), обосновано тем, что глубина внедрения индентора обратно пропорциональна твердости материала. Поэтому твердость материала будет характеризоваться величиной $(h-e, \text{ мм})$ или числом делений по шкале:

$$HRC = \frac{h-e}{h} \cdot 100 \quad (1.6)$$

Из формулы (1.6) очевидно, что «единица Роквелла» (в отличие от единиц Бринелля и Виккерса) оказывается величиной *безразмерной*.

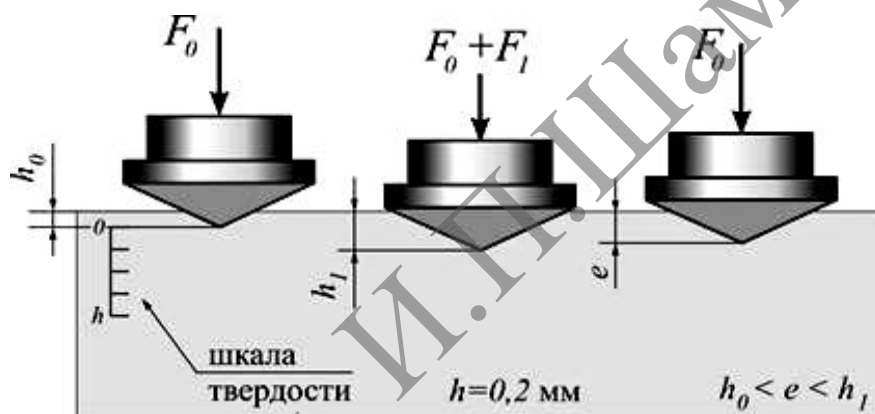


Рисунок 1.4. – Схема определения твердости методом Роквелла (шкалы А и С)

Измерение твердости по шкале А. Шкалу А (идентична шкале С) применяют для измерения твердости преимущественно листовых материалов. Из-за снижения нагрузки на индентор в 2,5 раза и уменьшения вследствие этого глубины проникновения индентора минимальную толщину испытуемого образца или изделия удастся снизить до 0,4...0,7 мм.

Измерение твердости по шкале В. Для многих мягких металлов и сплавов внедрение алмазного конуса может оказаться большим, чем 0,2 мм. В этом случае число твердости, вычисляемое по формуле (6), станет отрицательным (поскольку $h < e$), что лишено физического смысла и не может характеризовать твердость материала. В этих случаях применяют следующие меры:

- заменяют конический индентор на сферический;
- снижают нагрузку на индентор в 1,5 раза (со 150 кгс до 100 кгс);
- смещают шкалу на 30 единиц (шкала В красного цвета).

Число твердости определяется при этом по формуле:

$$HRC = \frac{h-e}{h} \cdot 100 + 30 \quad (1.7)$$

Шкала *B* применяется для измерения твердости не закаленной стали, бронзы, латуни и других нетвердых материалов. Для твердых – например, закаленные стали, используется шкала *C*, вдавливание осуществляется алмазным конусом под нагрузкой 1470 Н (150 кгс). Испытания очень твердых материалов и тонких поверхностных слоев также осуществляется алмазным конусом, но по шкале *A* под нагрузкой 588 Н (60 кгс). К достоинствам метода относится простота определения твердости, высокая производительность, возможность полной автоматизации процедуры испытаний. К недостаткам – многошкальность, отсутствие геометрического подобия отпечатков, условность и безразмерность величины HR, сравнительно низкая чувствительность. Все эти факторы делают метод Роквелла лишь средством быстрого упрощенного технического контроля.

Твердость указывается в единицах *HR* (*Hardness Rockwell*) с добавлением обозначения шкалы (*HRA*, *HRB*, *HRC*), которому предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр.

Пример обозначения: 61 *HRC* – твердость 61 единиц Роквелла по шкале *C*.

Замечание о переводе чисел твердости. Во всех упомянутых выше государственных стандартах указано, что *общего точного перевода чисел твердости, измеренных различными методами (или определения прочности по твердости), не существует.* Однако результаты проведенных многочисленных экспериментов указывают на то, что имеются, хотя и приближенные, но достаточно устойчивые зависимости, «теоретические линии» регрессии которых с определенной статистической достоверностью (доверительный интервал показан пунктиром) приведены на рисунке 1.5.

В приложении приведены сравнения средних значений твердости металлов и сплавов по различным шкалам, что позволяет производить пересчет твердости.

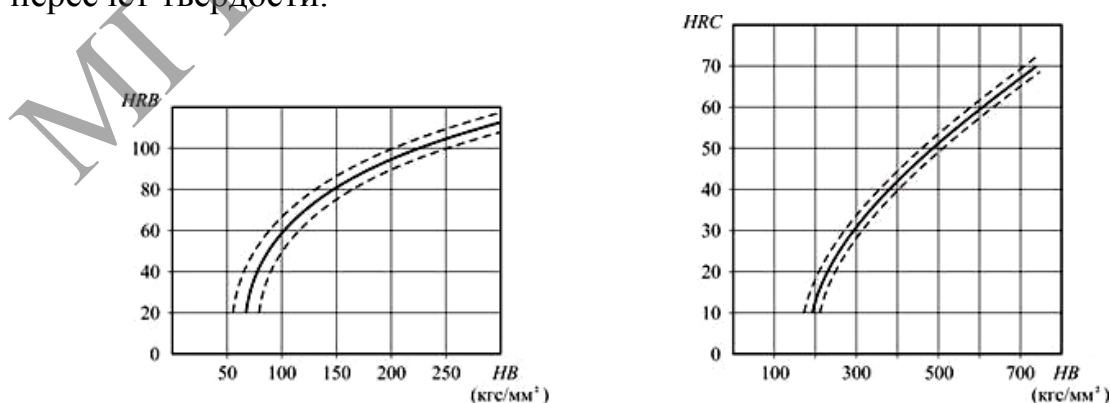


Рисунок 1.5. – Зависимости HRC и HRB от HB для сталей

Устройство прибора Роквелла

На рисунке 1.6 приведена принципиальная схема твердомера Роквелла. Основными его частями являются: поперечина 1, подвеска 2, шток амортизатора 3, рычаг 4, рукоятка 5, винт 6, крышка 7, рычажок 8, призма 9, шпиндель 10 с закрепленным на его конце индентором, маховик 11 для перемещения образца, шпонка 12, направляющая втулка 13, станина 14, грузы 15, стойка 16, подъемный винт 17, масляный амортизатор 18, пружина 19, индикатор с двумя шкалами – черной (С) и красной (В). При этом с большой стрелкой индикатора всегда совмещается нуль черной шкалы, и ни в коем случае – красной. Барабан для точной установки шкалы индикатора на нуль, электромотор, обеспечивающий работу прибора.

Перевод значений твердости HR в HV провести по таблице 1.3.

Таблица 1.3. – Сопоставление чисел твердости, измеренных различными методами: Бринелля, Виккерса, Роквелла

НВ, HV («единицы твердости» соответственно по Бринеллю и Виккерсу)	HRB («единицы твердости» по Роквеллу)	σ_B (МПа)	НВ, HV («единицы твердости» соответственно по Бринеллю и Виккерсу)	HRC («единицы твердости» по Роквеллу)	σ_B (МПа)
100	52,4	333	245	21,2	815
105	57,5	350	250	22,1	835
110	60,9	362	255	23,0	855
115	64,1	382	260	23,9	865
120	67,0	402	265	24,8	880
125	69,8	410	270	25,6	900
130	72,4	430	275	26,4	910
135	74,7	450	280	27,2	930
140	76,6	470	285	28,0	950
145	78,3	480	290	28,8	970
150	79,9	500	295	29,5	980
155	81,4	520	300	30,2	1000
160	82,8	530	310	31,6	1030
165	84,2	550	320	33,0	1060
170	85,6	565	330	34,2	1090
175	87,0	580	340	35,3	1120
180	88,3	600	350	36,3	1150
185	89,5	620	360	37,2	1180
190	90,6	640	370	38,1	1200
195	91,7	650	380	38,9	1230
200	92,8	665	390	39,7	1260
205	93,8	685	400	40,5	1290
210	94,8	695	410	41,3	1305

Продолжение таблицы 1.3

215	95,7	715	420	42,1	1335
220	96,6	735	430	42,9	1365
225	97,5	745	440	43,7	1385
230	98,4	765	450	44,5	1410
235	99,2	785	460	45,3	1440
240	100	795	470	46,1	1480

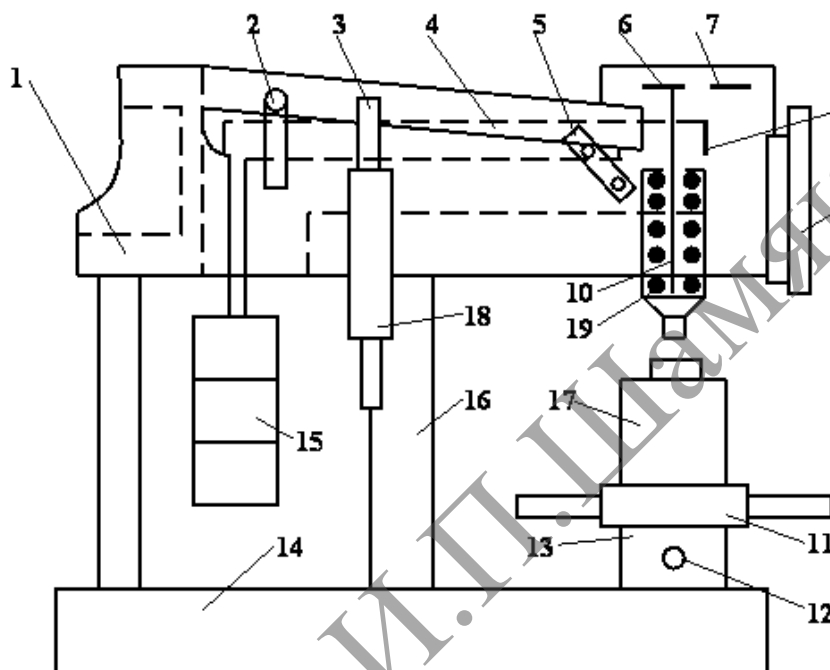


Рисунок 1.6. – Прибор для измерения твердости по Роквеллу

Определение твердости по Виккерсу (ГОСТ 2999-75)

Название от английского военно-промышленного концерна «Vickers Limited».

Испытание твердости по Виккерсу (ГОСТ 2999-75) применяется для измерения твердости черных и цветных металлов и сплавов и производится путем вдавливания четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине $\alpha=136^\circ$ под действием силы, приложенной в течение определенного времени, и измерения длин обеих диагоналей отпечатка, оставшегося на поверхности образца после снятия нагрузки.

В зависимости от твердости и толщины металла применяют нагрузки 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 кгс. Поверхность образца должна быть отполирована.

Метод Виккерса является одним из наиболее совершенных и распространенных в лабораторной практике методов определения твердости. Высокая твердость и недеформируемость алмаза обеспечивает большую точность определения твердости.

Это особенно важно при испытании твердых материалов (более $500 \text{ кгс/мм}^2 \approx 4904 \text{ Н}$). Ценность метода состоит также в том, что вследствие малых нагрузок вдавливания удастся испытывать тонкие образцы, а также определять твердость непосредственно поверхностных слоев (например, поверхности азотированной стали). Можно определять твердость мелких готовых изделий, не разрушая и не портя их вследствие малой величины отпечатка.

Твердость по Виккерсу указывается в единицах *HV* (*Hardness Vickers*) и определяется как частное от деления нагрузки F [кгс], приложенной к пирамиде, на площадь поверхности отпечатка A [мм²], т. е. к поверхности углубления в форме пирамиды

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \left[\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \right] \quad (1.8)$$

где d [мм] – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки. Измерение диагоналей производят с помощью микроскопа. Число твердости находят по специальным таблицам.

Твердость по Виккерсу при силовом воздействии 30 кгс (294,2 Н) и времени выдержки под нагрузкой 10...15 секунд обозначают цифрами, характеризующими величину твердости и буквами *HV*. При этом окончательный результат принято округлять до трех значащих разрядов (как и по Бринеллю).

Пример обозначения: 500 *HV* – твердость по Виккерсу, измеренная при нагрузке 30 кгс и времени выдержки 10...15 секунд.

При других условиях испытания после букв *HV* указывают нагрузку и время выдержки.

Пример обозначения: 220 *HV* 10/40 – твердость по Виккерсу, измеренная при нагрузке 10 кгс (98,07 Н) и времени выдержки 40 секунд.

Числа твердости по Бринеллю и по Виккерсу имеют одинаковую размерность (кгс/мм²) и до *HV* 350...400 их величины совпадают между собой. При *HV* больше 400 твердость по Бринеллю оказывается заниженной. Для получения точных результатов при измерении твердости по Виккерсу необходимо строго соблюдать следующие условия:

1. Отношение толщины образца к диагонали отпечатка должно быть не менее 1,5;
2. Отношение глубины отпечатка к его диагоналям – 1/7;
3. Расстояние между центром и краем образца, а также краем соседнего отпечатка должно быть не менее 2,5 диагоналей отпечатка;
4. Испытания проводить на тщательно отшлифованной или полированной поверхности.

На приборе Виккерса можно измерять твердость образцов толщиной до 0,3...0,5 мм или поверхностных слоев толщиной до 0,03...0,05 мм. Однако следует учитывать, что при небольшой нагрузке (1 кгс), отпечаток

пирамиды может быть недостаточно отчетливым. Поэтому при измерении твердости очень тонких поверхностных слоев, например, цианированного слоя толщиной 0,04...0,06 мм, лучше применять нагрузку 5 кгс, а для измерения твердости азотированного слоя стали толщиной до 0,05 мм – нагрузку 5 или 10 кгс. При обозначении твердости по Виккерсу указывают величину применяемой нагрузки: HV5, HV10 и т. д. При испытании твердых и других слоев (азотированного, цианированного) около углов отпечатка иногда появляются трещины, по виду которых можно судить о хрупкости исследуемого слоя.

Несмотря на преимущество метода Виккерса, дающего возможность измерять как мягкие, так и твердые материалы различной толщины, измерение твердости занимает много времени и требует тщательной подготовки поверхности. Указанный недостаток препятствует широкому применению данного метода в условиях массового контроля.

Существуют и другие методы определения твердости.

Твердость при царапании

Определение твердости этим методом производят царапанием поверхности алмазным конусом с углом при вершине 90° . Мерой твердости в этом случае является величина, обратная ширине царапины при определенной постоянной нагрузке. На каждом образце измеряют ширину большого числа царапин, так как точное измерение ширины царапины затруднено вследствие нерезких ее краев.

Твердость при царапании характеризует уже не сопротивление пластической деформации, как в предыдущих методах, а сопротивление разрушению, так как при царапании происходит местное разрушение.

Н.Н. Давиденков установил, что твердость при царапании, вычисленная как величина, обратная ширине царапины при нагрузке на алмаз 50 г, тесно связана с сопротивлением разрушению при разрыве. У большинства металлов при царапании происходит разрушение путем среза. Поэтому метод царапания, широко распространенный при изучении минералов, может представлять большой практический интерес и при изучении металлов, давая возможность определять сопротивлением разрушению и связанных с ним характеристик, по данным испытаний очень малого участка поверхности.

Упругий отскок шарика (метод Шора)

Мерой твердости в данном методе является высота отскока бойка, падающего с определенной высоты. На испытуемый образец «1» (рисунок 1.7) с высоты H падает груз «2» весом Q с алмазным шариком «3» на конце. Диаметр шарика $D = 2,5$ мм. Если при ударе бойка по испытуемому образцу возникла бы только упругая деформация, то он отскочил бы на ту же высоту, с которой падал (если, конечно, не

учитывать потери части энергии на вредное сопротивление – трение, сопротивление воздуха, колебание прибора и др.).

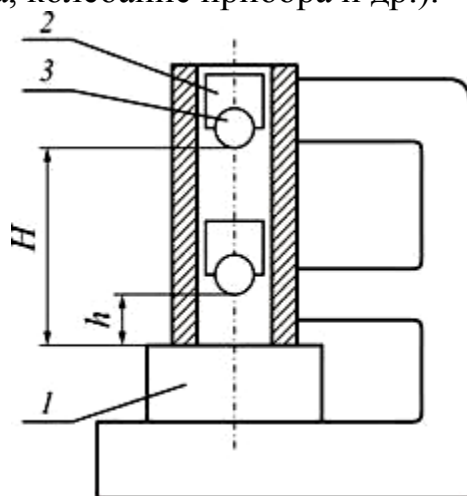


Рисунок 1.7. – Схема прибора Шора

При этом способе критерием твердости служит высота h упругого отскока бойка весом q , падающего на плиту с определенной высоты h . Если работа удара бойка

$$W_0 = H \cdot q \quad (1.9),$$

а работа отскока бойка

$$W_1 = h \cdot q_1 \quad (1.10),$$

то разность

$$W = W_0 - W_1 = q \cdot (H - h) \quad (1.11)$$

является мерой твердости.

Чем больше W , тем меньше твердость. Испытания производятся на специальных переносных приборах (склероскопах). Шкала твердости в этих приборах принята условно так, что высота отскока бойка от поверхности твердой инструментальной стали принята за 100 равных делений. Образцы для испытания должны быть либо массивными – весом порядка 2 кг и выше, либо жестко зажаты в опору во избежание значительных ошибок.

Принцип данного метода состоит в том, что измеряется поглощенная при отскоке работа W . У идеального твердого тела вся работа возвращается бойку, т. е. $H=h$ и $W=0$, и твердость максимальна. Чем ниже сопротивление пластической деформации, тем больше поглощенная материалом работа деформации, тем больше разность $H-h$, тем меньше твердость.

Поскольку величина работы зависит от модуля упругости, материал с меньшим модулем может казаться значительно более твердым вследствие большой величины работы упругой деформации и относительно меньшей величины работы пластической деформации.

Например, при испытании по Шору, резина и стекло оказываются более твердым, чем закаленная сталь.

При этом данный метод принципиально неприменим для сравнения между собой материалов с резко различными модулями упругости.

Метод упругого отскока широко применяется для контроля отливок, поковок, при изучении материала в различных состояниях и т. д.

Между величинами твердости, определяемой при упругом отскоке, и при статическом вдавливании шарика наблюдается почти линейная зависимость. В диапазоне значений твердости до HB 400...500. Метод отличается высокой производительностью (несколько сот измерений в час).

Между твердостями при упругом отскоке (HSh) и при статическом вдавливании шарика (HB) наблюдается достаточно устойчивая регрессионная зависимость, близкая к линейной, а именно для стали:

$$HB \cong 7 \cdot H \cdot S \cdot h \quad (1.12)$$

Метод Польди (двойного отпечатка)

Данным методом производится оценка твердости испытуемого материала в сравнении с твердостью эталона. Испытание производится путем ударного вдавливания стального шарика одновременно в образец «1» и эталон «3» (рисунок 1.8). Шарик «2» диаметром D помещается между образцом «1» и эталоном «3». Удар по бойку «4» наносится ручным молотком «5». Пусть сила удара оказалась равной P_d (динамическая сила), а диаметры отпечатков на образце и эталоне равны, соответственно, d и d_e .

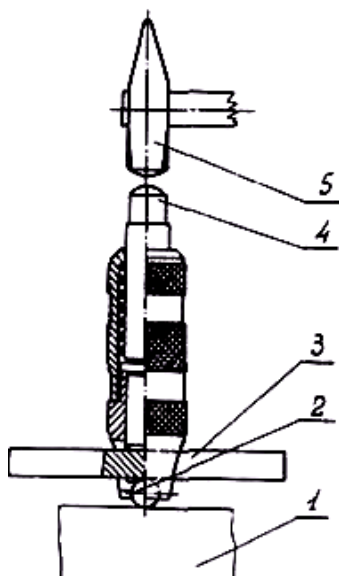


Рисунок 1.8. – Схема прибора Польди

Тогда твердость по Бринеллю образца:

$$HB = HB_3 \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d_3}{D}\right)^2}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}} \quad (1.13)$$

Таким образом, твердость образца можно определить по формуле (7), если известна твердость по Бринеллю эталона HB_3 и диаметры отпечатков d_3 и d . На практике HB определяется по специальным таблицам, которые составлены после предварительного вычисления HB по уравнению (7) для различных значений HB_3 , d_3 и d .

Динамическая твердость, определяемая данным методом, обычно больше статической. Отношение ударной твердости к HB для отожженных сталей близко к 1,7 и растет с увеличением твердости материала.

Основное применение метода – определение твердости при повышенных температурах, чему способствует простота метода и кратковременность соприкосновения шарика с нагретым образцом.

Общие замечания к статистическому анализу результатов

Как уже указывалось, результаты измерения твердости имеют достаточно значительный экспериментальный разброс (причины которого здесь не анализируются). Поэтому для предоставления статистически достоверных результатов обычно проводят серии замеров твердости с последующей статистической обработкой [7, 17] выборки (n – число измерений). Для промышленных и научных целей объем выборки принимается значительной величины ($n \geq 50$). В учебных целях этот объем может быть уменьшен в разумных пределах, например, $n=5$. Далее вычисляют следующие статистики (Для упрощения записи формул величину твердости здесь обозначим буквой H (независимо от метода измерения)):

а) среднее арифметическое (размерная величина)

$$H_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i \quad (1.14)$$

где H_i – результат, полученный в одном опыте (если опыт предусматривает определение двух величин (например, измерение двух диагоналей отпечатка по методу Виккерса), то H_i – это среднее арифметическое из двух полученных результатов);

б) среднее квадратическое отклонение (размерная величина)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - H_{cp})^2}{n - 1}} \quad (1.15)$$

в) статистическая ошибка абсолютная (размерная величина)

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.16)$$

(из последней формулы очевидно, что статистическая ошибка уменьшается с увеличением объема выборки, т. е. числа измерений);

г) статистическая ошибка относительная (безразмерная величина)

$$S = \frac{S}{H_{cp}} \quad (1.17)$$

В формулах (14) – (17) речь идет, очевидно, о выборочных (выборка объемом n) значениях рассмотренных величин.

В технических отчетах принято приводить итоги измерения с указанием диапазона статистически достоверного результата. При этом используется абсолютная статистическая ошибка. Такая «интервальная» оценка записывается в виде $H = H_{cp} \pm S$, либо $H_{cp} - S \leq H \leq H_{cp} + S$, что указывает на статистическую достоверность полученных значений.

Относительная статистическая ошибка может применяться, например, для сравнительного анализа экспериментальной точности двух (или более) методов измерения. Этот анализ, в частности, необходим для выбора оптимального метода исследования. При этом, естественно, одной из значимых характеристик метода (но далеко не единственной) является его точность.

При большом объеме выборки ($n > 100$) для анализа результатов обычно используют правило «трех сигм». При этом ошибки измерения рассматриваются как взаимонезависимые случайные величины, подчиняющиеся закону нормального распределения (закону Гаусса). Из математической статистики известно [7, 17], что в этом случае в интервал $H_{cp} \pm 3\sigma$ попадает 99,7 % от общего числа результатов. То есть, если проведено 1000 измерений, то в интервале $H_{cp} \pm 3\sigma$ будет находиться в среднем 997 результатов. Иногда выгодно применять более узкие интервалы: $H_{cp} \pm 2\sigma$ или $H_{cp} \pm \sigma$. При этом процент попадания в эти интервалы ниже: 95,4 % или 68,3 % соответственно.

Порядок выполнения работы

Проведение измерений и обработка результатов испытаний.

Требования к образцам для измерения твердости

1. Поверхность образца должна быть плоской т. к. на выпуклой поверхности индентор вдавливается в материал на большую глубину, чем на плоской.

2. Поверхность образца должна быть горизонтальной и не иметь каких-либо дефектов (окалина, выбоины, грубые царапины, посторонние

покрытия). Чем меньше глубина вдавливания, тем выше требования к чистоте поверхности.

3. При подготовке образца недопустим разогрев или наклеп поверхностных слоев при шлифовании или полировке.

Требования к режиму нагружения.

1. Нагрузку необходимо прикладывать плавно, чтобы исключить возникновение динамических эффектов, что особенно важно при измерении микротвердости.

2. Время выдержки под нагрузкой не должно превышать определенной величины, чтобы избежать проявления эффектов ползучести.

3. Минимальная толщина образца должна быть не меньше десятикратной глубины отпечатка, чтобы исключить продавливание образца насквозь.

4. Расстояние до краев образца и между соседними отпечатками должно быть таким, чтобы не допустить влияния краевых эффектов и пластически деформированных зон вокруг отпечатков друг друга.

5. Величина нагрузки должна быть такой, чтобы размер отпечатка превышал размер элементов структуры материала – зерен, колоний, включений фаз и др. (кроме микротвердости).

Порядок выполнения работы на приборе Бринелля:

1. Изучить устройство и принцип работы твердомера ТБ 5004.

2. Ознакомиться с образцами для испытания (размер зерен, черные, цветные металлы, толщина образцов, и др.) и подготовить их для испытания.

3. Выбрать по таблице 1.4 диаметр шарика, величину нагрузки и время нагружения.

4. Снять оправку со шпинделя и установить необходимый индентор.

5. С помощью наборов грузов подобрать требуемую нагрузку.

6. На опорный столик установить испытуемый образец так, чтобы центр отпечатка располагался от края образца на расстоянии не меньше $2,5 d$.

7. С помощью маховика подвести образец до касания с индентором (должен включиться тормоз).

8. Нажав кнопку “пуск”, произвести нагружение.

9. По истечении установленного времени нагружения нажать кнопку “стоп”.

10. С помощью маховика отвести столик с образцом от индентора.

11. Операции по п. п. 6–11 повторить не менее пяти раз на каждом образце.

12. Измерить диаметры отпечатков в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью отсчетного микроскопа.

13. Рассчитать НВ по формуле (1.5).

14. Результаты испытаний занести в таблицу 1.4.

Тип прибора _____ Марка материала _____

Диаметр шарика _____ Термическая обработка _____

Нагрузка на индентор _____

Таблица 1.4. – Определение твердости по Бринеллю

№ опыта	Диаметр отпечатка, d_i [мм]		Средний диаметр, $(d_{cp})_i$, [мм]	Число Твердости HVi	Интервал числа твердости $HV_{cp} \pm S$
	Первое измерение	Второе измерение			
1					
2					
..					

Число твердости HVi для каждого $(d_{cp})_i$ определяется по формуле (1.1) или по специальной таблице (выдается преподавателем). Среднее число твердости HV_{cp} определяется по формуле (1.14); S – по формуле (1.16).

Порядок работы на приборе Роквелла:

Порядок работы на приборе следующий:

1. Установить соответствующий индентор и выбрать необходимую нагрузку.

Поместить образец на столик и вращением маховика вдавить индентор в образец предварительной нагрузкой, при этом малая стрелка индикатора должна стать против красной точки, а большая – на ноль черной шкалы (A , C) индикатора или на 30 красной шкалы (B).

2. Нажать пусковую педаль и произвести нагружение основной нагрузкой в течение 3...6 секунд.

3. Опустить пусковую педаль и снять основную нагрузку через 1...3 секунды после остановки большой стрелки.

4. Считать число твердости с точностью до половины цены деления шкалы.

5. Повторить испытания не менее 3...5 раз, выдерживая расстояние между отпечатками не менее 3 мм.

Результаты измерений занести в таблицу 5.

Тип прибора _____ Марка материала _____

Шкала прибора _____ Термическая обработка _____

Нагрузка на индентор _____ Тип индентора _____

Таблица 1.5. – Определение твердости по Роквеллу

№ опыта	Число твердости HRC_i	Число твердости HRB_i	Интервал числа твердости	
			$HRC_{cp} \pm S$	$HRB_{cp} \pm S$
1				
2				
...				

Числа твердости HRC_i и HRB_i сразу читаются по шкалам индикатора прибора и заносятся в таблицу 5.

Средние числа твердости и статистические ошибки также определяются по формулам (14) и (16).

Статистическая обработка результатов. Сравнительный анализ (принимая гипотезу нормального распределения ошибок измерения)

Полученные результаты в виде чисел твердости соответствующих методов (HB , HRB , HRC) необходимо подвергнуть статистическому анализу. Для этого предлагается заполнить таблицу 1.6, содержащую в себе все необходимые для статистического анализа параметры. После этого производится сравнительный статистический анализ точности двух выбранных методов измерения твердости (по заданию преподавателя).

Таблица 1.6. – Сравнительный анализ твердости

Статистики	Метод измерения твердости		
	Бринелль (HB)	Роквелл (HRB)	Роквелл (HRC)
Формула (1.15)			
Формула (1.16)			
Формула (1.17)			

Перевод чисел твердости

Произведите пересчет полученных средних значений твердости HRC_{cp} и HRB_{cp} в числа твердости по Бринеллю HB_{cp} . В дальнейшем, во избежание путаницы, будем понимать под твердостью ее среднее значение, т. е. $H = H_{cp}$.

Воспользуйтесь для этого номограммами $HRB = f_1(HB)$ и $HRC = f_2(HB)$, представленными для средних значений на рис. 1.5 или используйте таблицу 3. Приведенные здесь данные были получены на основании статистической обработки результатов измерения твердости на различных марках сталей.

Связь твердости по Бринеллю с основными механическими характеристиками конструкционных материалов

По известному числу твердости материала можно ориентировочно определить его механические характеристики. Так, например, как показывают результаты многочисленных экспериментов, между числом твердости по Бринеллю и временным сопротивлением σ_B для металлов существуют приближенные регрессионные зависимости, простейшая из которых имеет вид:

$$\sigma_B = k \cdot HB \text{ [МПа]} \quad (1.18)$$

где k [МПа / ед. Бринелля] – коэффициент, определяемый опытным путем. Ниже приведены значения этого коэффициента для некоторых материалов.

Таблица 1.7. – Значение коэффициента k

Материал	Коэффициент k [МПа/ед. Бринелля]
Сталь (при $HB \leq 175$)	3,33
Сталь (при $HB > 175$)	3,53
Алюминий	3,92
Дюралюминий	3,63
Медь холоднокатаная	3,43
Медь отожженная	4,51

Для серого чугуна регрессионная зависимость $\sigma_B = f(HB)$ менее надежна и более сложна:

$$\sigma_B \cong 1,7 \cdot HB - 67 \text{ [МПа]} \quad (1.19)$$

Для цветных металлов обычно отношение предела прочности от твердости находится в широких пределах и существенно зависит от степени предварительного наклепа:

$$\sigma_B \cong (3,5...5)HB \text{ [МПа]} \quad (1.20)$$

В формулах (18), (19), (20) временное сопротивление σ_B имеет размерность МПа, твердость HB – единицы Бринелля [кгс/мм²].

В выводах по выполненной лабораторной работе необходимо указать расхождение в процентах действительного и пересчитанного чисел твердости (используя рисунок 1.5 или таблицу 1.3); отметить, какие характеристики прочности определены и соответствие средней величины твердости данной марке стали; оценить, какой метод измерения дал меньшую статистическую ошибку.

Форма отчета по лабораторной работе

1. Цель работы.
2. Основные положения.
3. Краткие характеристики методов Бринелля, Роквелла и Виккерса.
4. Способы определения твердости HB, HV и HR.
5. Таблицы с полученными результатами.
6. Статистическая обработка результатов
7. Вывод по работе.

Контрольные вопросы

- Дайте определение понятию «твердость материала».
- Перечислите способы определения твердости материала.
- Имеется ли связь между числами твердости, найденными различными методами? Приведите ориентировочно эти зависимости.
- Имеется ли связь между твердостью материала и его механическими характеристиками? Укажите эти зависимости.
- Расскажите последовательность операций и основные требования стандартов при определении твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.
- К каким методам относятся испытания на твердость?
- В каких единицах измеряется твердость по Бринеллю, Виккерсу и Роквеллу?
- В чем состоят достоинства и недостатки обоих методов?
- Как определяется твердость по Бринеллю, Виккерсу и Роквеллу?
- Почему используются разные инденторы?
- Для чего применяется предварительное нагружение в методе Роквелла?
- Как работает индикатор твердомера Роквелла?
- Расскажите, пользуясь схемой, устройство прибора Бринелля.
- Каковы форма, размеры и материал индентора (наконечника) при определении твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.
- Каковы размерности чисел твердости, найденных методами Бринелля, Роквелла и Виккерса.
- Приведите зависимость между временным сопротивлением для углеродистой стали и ее твердостью по Бринеллю.
- Приведите зависимость между σ_b и HB для цветных металлов.
- Что понимается под твердостью по Роквеллу?
- Пользуясь схемой, расскажите устройство прибора Роквелла.
- Приведите ориентировочно твердость среднеуглеродистой отожженной и закаленной стали по HRB , HRC и HB .
- Укажите размерности всех изучаемых чисел твердости.
- По какой формуле подсчитывается твердость по Виккерсу? Какую форму имеет индентор при определении твердости этим методом?
- В чем заключается метод определения твердости по Шору?
- В чем сущность определения твердости методом Полюди?

Правила по технике безопасности и эксплуатации оборудования

1. Запрещается приступать к работе до получения инструктажа по технике безопасности и росписи в журнале.
2. Необходимо помнить, что напряжение в сети 220...380 Вольт. Поэтому не следует касаться металлических частей оборудования, не убедившись перед началом работы в надежности заземления прибора.
3. При создании предварительной нагрузки в 9,87 Н (10 кгс) на приборе Роквелла запрещается переводить малую стрелку индикатора за черный штрих, что может повлечь за собой выход прибора из строя.

Лабораторная работа № 2

Микроскопический анализ металлов

Цель работы: ознакомление с микроскопическим анализом металлов и сплавов, с устройством и возможностями металлографического микроскопа, освоение одной из стандартных методик микроскопического анализа сплавов.

Содержание работы

Основными методами изучения строения металлов и сплавов являются микро- и макрокопические анализы.

При макроанализе можно одновременно наблюдать большую поверхность заготовки (детали). Это дает представление об общем строении металла. При помощи микроскопического анализа более подробно изучается строение в том месте изделия, которое интересует исследователя.

Микроскопический анализ металлов заключается в исследовании структуры металла при больших увеличениях (более 30 крат).

Микроструктура – это строение (взаимное расположение, форма и размеры зерен) металлов и сплавов, видимое при помощи микроскопа.

Структурная составляющая – это участок микроструктуры, имеющий свое строение и свойства и отдаленный от остальных участков поверхностью раздела (границей).

Промышленные металлы и сплавы представляют собой конгломерат кристаллов неправильной формы, т. е. имеют поликристаллическое строение. Так как кристаллы должны иметь геометрически правильную огранку, то кристаллы неправильной формы в поликристаллическом агрегате принято называть зернами.

В задачи микроскопического анализа входит:

- а) определение количества и типа структурных составляющих металлов и сплавов;
- б) оценка формы, размера и характера расположения зерен;
- в) определение характера и качества предшествующей обработки (термической обработки, литья, обработки давлением, сварки);
- г) приблизительное определение содержания углерода в углеродистой и низколегированной стали по структуре в равновесном состоянии;
- д) установление наличия неметаллических включений и оценка их формы, размеров, характера расположения;
- е) установление наличия микродефектов;
- ж) определение глубины слоя, образовавшегося на поверхности после цементации, азотирования и других видов химико-термической обработки, глубины обезуглероживания и т. п.

Приготовление микрошлифа

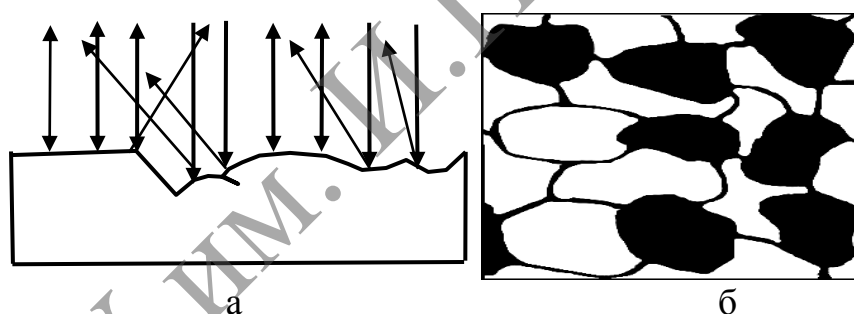
Образец металла, специально приготовленный для исследования его структуры под микроскопом, называется микрошлифом. Поверхность шлифа необходимого качества получают за счет трех технологических операций:

- а) заторцовка на шлифовальном станке;
- б) шлифовка на 4–5 номерах наждачной бумаги;
- в) полировка высокодисперсными пастами.

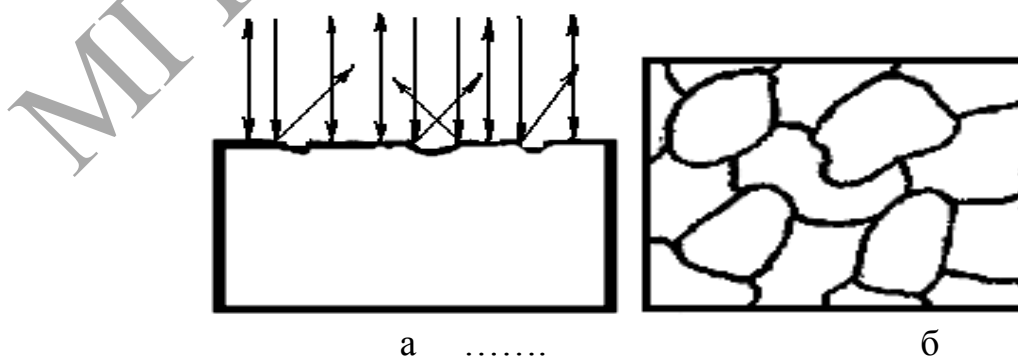
Для выявления внутреннего строения металла шлиф подвергают травлению, погружая его в реактив (водный или спиртовой раствор кислоты) и выдерживают определенное время. В результате травления на поверхности шлифа образуются выступы и впадины, характеризующие микроструктуру сплава (рисунки 2.1, 2.2).

Для травления шлифов наиболее распространенными являются следующие реактивы:

- для сталей и чугунов – 4 %-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте;
- для алюминиевых сплавов – фтористая кислота 1,5 см³, азотная кислота – 2,5 см³, вода – 95 см³;
- для меди и медных сплавов – солянокислый раствор хлорного железа.



а – отражение лучей от травленного шлифа; б – вид в микроскопе
Рисунок 2.1. – Формирование изображения структуры многофазного сплава



а – отражение лучей от травленного шлифа; б – вид в микроскопе
Рисунок 2.2. – Формирование изображения структуры однофазного сплава

При работе с микрошлифом следует помнить:

- нельзя прикасаться пальцами к поверхности микроскопа;
- нельзя протирать полированную поверхность;
- при хранении микрошлиф ставят полированной поверхностью вверх;
- на столик микроскопа шлиф ставят полированной поверхностью вниз, но при этом нельзя двигать его по столику, чтобы не нанести царапин.

Микроскопы металлографические

Для исследования микроструктуры металлов используются металлографические микроскопы.

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать непрозрачные тела в отраженном свете. В этом основное его отличие от биологического микроскопа.

Изображение предмета увеличивается в микроскопе дважды: в объективе и окуляре. Поэтому общее увеличение микроскопа N_n равно произведению увеличения объектива $n_{об}$ на увеличение окуляра $n_{ок}$: $N_n = n_{об} \cdot n_{ок}$.

Главное увеличение или максимально полезное увеличение микроскопа обеспечивается объективом. Оно определяется разрешающей способностью объектива. Разрешающая способность объектива – минимальное расстояние, на котором две близлежащие точки ещё видны отдельно.

Окуляры предназначены для увеличения изображения, полученного объективом, а также для исправления оптических недостатков объективов. Общее увеличение современных металлографических микроскопов может быть от 60^x до 1500^x при визуальном наблюдении и от 100^x до 2000^x при фотографировании.

Существуют металлографические микроскопы следующих марок: МИМ-7, ММР-2Р, ММР-4 и др.

Микроскоп МИМ-7 (рисунок 2.3) состоит из осветителя, нижнего корпуса с фотокамерой, верхнего корпуса, визуального тубуса, осветительного тубуса, предметного столика.

Осветительная лампа питается через трансформатор, понижающий напряжение в пределах 6–18,5 В. Секционный переключатель служит для изменения напряжения на зажимах лампы. Контроль за режимом работы лампы ведётся по вольтметру.

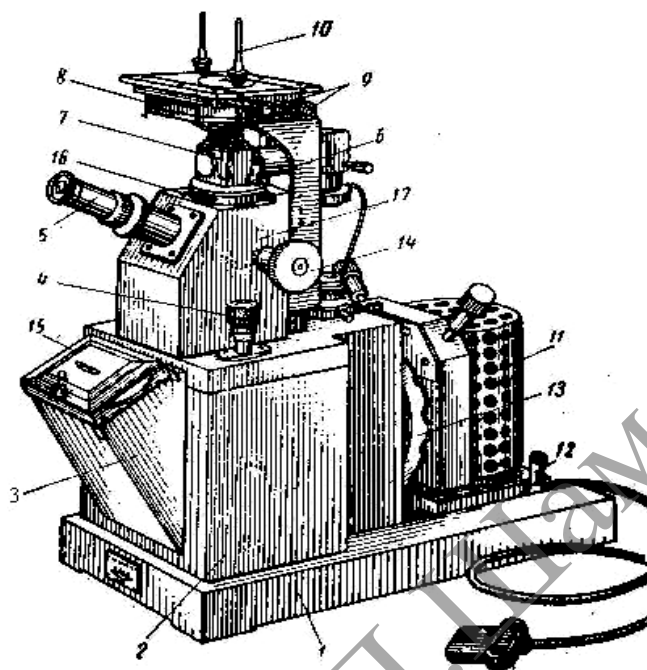
Справа в корпусе выведен барашек микроскопической фокусировки микроскопа на объект. На верхнем корпусе укреплен визуальный тубус, который при визуальном наблюдении вдвигается в корпус до упора, при фотографировании выдвигается до отказа.

На корпусе укреплен осветительный тубус, в верхнем срезе которого в посадочное отверстие вставляется объектив.

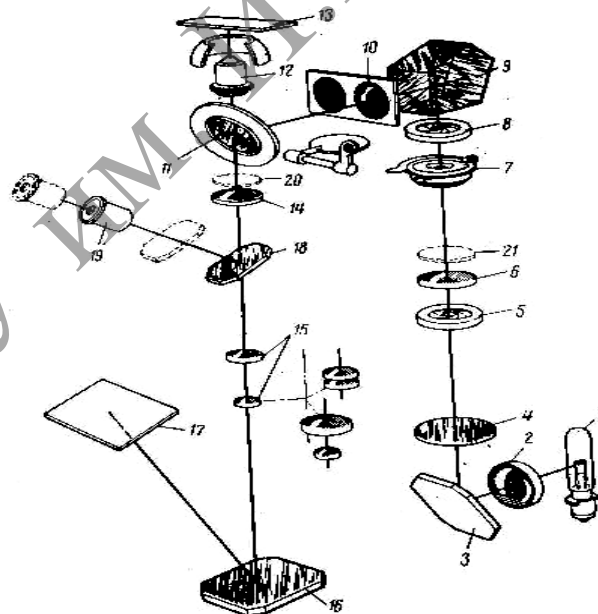
Предметный квадратный столик перемещается в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях вращением рукояток.

Рабочая высота предметного столика устанавливается совмещением

рисок на кронштейне и на корпусе вращением рукоятки механизма грубой наводки на резкость. Для фиксации выбранного положения предметного столика служит рукоятка.



а)



б)

а – вид микроскопа; б – оптическая схема микроскопа

Рисунок 2.3. – Микроскоп МИМ-7

Порядок выполнения работы

1. Подготовка микроскопа к визуальному наблюдению

- установить объектив и окуляр соответственно выбранному увеличению;
- подключить трансформатор к сети и переключателем установить на лампе напряжение 8–18 В, контролируя режим по вольтметру;
- винтами установить отверстие съёмной шайбы над объективом;
- над отверстием съёмной шайбы установить микрошлиф полированной поверхностью вниз;
- поворотом рукоятки освободить механизм грубой подачи; вращая рукоятку, совместить риски на кронштейне и корпусе, найти изображение микрошлифа и застопорить механизм грубой подачи;
- с помощью барашка произвести фокусировку микроскопа на объект.

2. Определение цены деления

Величину зерна, глубину слоя (азотирования, цементации), размер микродефектов можно определить при помощи окулярмикрометра. Окулярмикрометр – это окуляр, в который вставлена стеклянная пластинка с нанесенной на ней шкалой. Цена деления окулярмикрометра зависит от увеличения объектива. Для определения цены деления окулярмикрометра используют объектмикрометр. Объектмикрометр – это металлическая пластинка с полупрозрачным стеклом в центре.

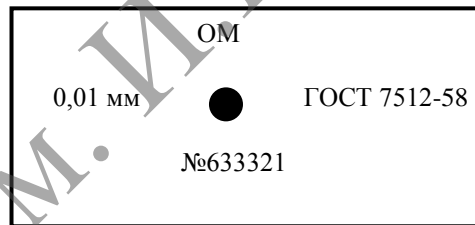


Рисунок 2.4. – Объектмикрометр

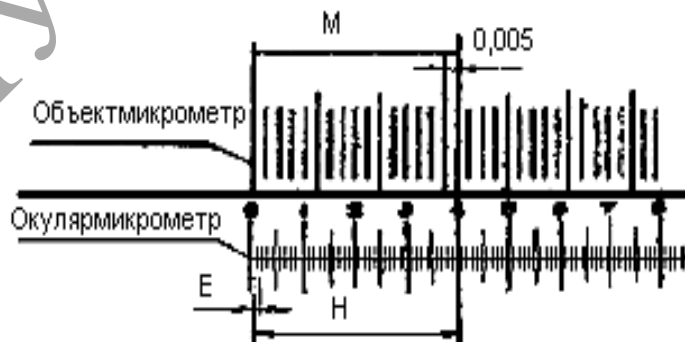


Рисунок 2.5. – Схема определения цены деления окулярмикрометра

На стекло нанесена шкала длиной 1 мм, разделённая на 100 частей (цена деления 0,01 мм) (рисунок 2.4). Для определения цены деления окулярмикрометра (рисунок 2.5) необходимо:

- подготовить микроскоп к наблюдению;

– установить объектмикрометр на столик микроскопа следующим образом:

а) стекло со шкалой направлено в сторону объектива,

б) большая сторона объектмикрометра параллельно передней грани предметного столика,

в) пучок света проходит через центр стекла;

– изображение шкалы объектмикрометра отыскать в поле зрения окуляра, для чего, удерживая рукоятки грубой подачи, освободить стопор этого механизма; непрерывно наблюдая в окуляр, плавно и медленно вращая рукоятку, добиться появления шкалы в поле зрения окуляра.

Добившись изображения шкалы объектмикрометра в поле зрения окуляра, необходимо:

а) установить шкалы объектмикрометра и окулярмикрометра параллельно друг другу (поворотом окуляра вокруг оси);

б) винтами предметного столика добиться частичного наложения шкал и совмещения в одну линию начальных или любых других штрихов обеих шкал;

в) не меняя положения столика, отыскать другую пару штрихов, принадлежащих разным шкалам, совмещающихся в одну линию;

г) подсчитать число делений шкалы объектмикрометра M и окулярмикрометра N , находящихся между двумя парами совмещенных в линию штрихов;

д) определить цену деления окулярмикрометра E по формуле

$$E = 10^3 \cdot \frac{M \cdot 0,01}{N},$$

где 0,01 – цена деления шкалы объектмикрометра, мм; 10^3 – коэффициент перевода миллиметров в микрометры.

3. *Определение величины зерна стали (рисунок 2.6):*

– микрошлиф поместить на столик микроскопа;

– добиться четкого изображения структуры;

– просмотреть несколько участков шлифа; выбрать участок с наиболее крупными зернами;

– установить шкалу окулярмикрометра горизонтально;

– совместить нулевую риску шкалы с границей любого зерна (двигая столик микровинтами);

– не меняя положения столика, отыскать границу любого зерна, совмещенного с риской шкалы окулярмикрометра;

– между рисками, совмещенными с границами зёрен, подсчитать количество делений, шкалы окулярмикрометра K и количество зёрен, пересекаемых центральной линией шкалы Π ;

– определить диаметр зерна по горизонтали:

$$D_{гор} = 10^3 \cdot \frac{K \cdot E}{\Pi} \quad (2.1)$$

где E – цена деления окулярмикрометра;
 – установить шкалу окулярмикрометра вертикально (поворотом окуляра);

– определить диаметр зерна по вертикали по формуле

$$D_{\text{верт}} = 10^3 \cdot \frac{K \cdot E}{\Pi} \quad (2.2)$$

– горизонтальный и вертикальный размеры зерна усреднить по формуле

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{гор}} + D_{\text{верт}}}{2} \quad (2.3)$$

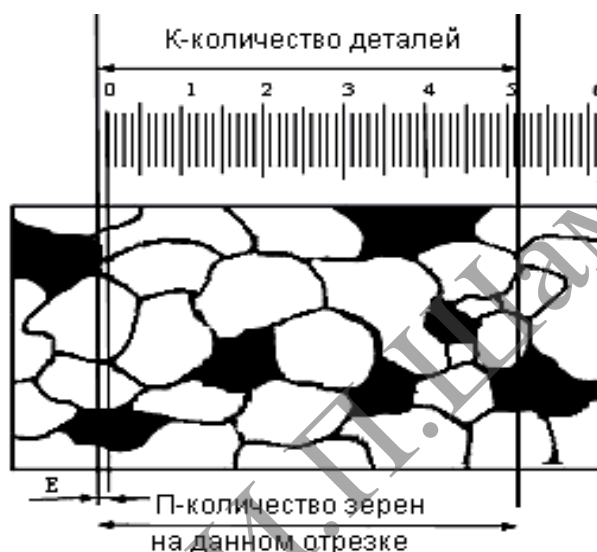


Рисунок 2.6. – Схема определения размера зерна при помощи окулярмикрометра

– площадь зерна определить по формуле площади круга

$$\Phi = \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}^2}{4} \quad (2.4)$$

Если экспериментальное и табличное значения расходятся, то нужно брать меньший балл зерна. По табл. 2.1 (ГОСТ 5639-65) определить балл зерна стали.

Таблица 2.1. – Определение балла зерна стали

№ зерна	Средняя площадь зерна Φ , мкм ²	№ зерна	Средняя площадь зерна Φ , мкм ²
1	64000	5	4000
2	32000	6	2000
3	16000	7	1000
4	8000	8	500

Контрольные вопросы

1. Задачи микроскопического анализа.
2. Приготовление объекта исследования и правила обращения с ним.
3. Укажите травитель для сталей и чугунов.
4. Принцип работы металлографического микроскопа.
5. Укажите на микроскопе и объясните назначение предметного столика.
6. Порядок настройки микроскопа на визуальное наблюдение.
7. Объясните, с какой целью осуществляется смена оптики.
8. Как определить увеличение микроскопа?
9. Цель и порядок определения цены деления окулярмикрометра.
10. Как определить размер зерна стали окулярмикрометром?

Лабораторная работа № 3

Микроструктура железоуглеродистых сплавов в равновесном состоянии

Цель работы: изучить микроструктуру сталей и чугунов в равновесном состоянии и установить связь между структурой и свойствами.

Содержание работы

Под равновесным состоянием понимается состояние, при котором все фазовые превращения в сплаве полностью закончились в соответствии с диаграммой состояния. Это наступает только при медленном охлаждении. Основой для определения фазовых и структурных составляющих железоуглеродистых сплавов в равновесном состоянии является диаграмма состояния железо – цементит (рисунок 3.1). В сплавах железа с углеродом образуются следующие фазы:

1. Феррит-твёрдый раствор внедрения углерода в α – железе. Максимальная растворимость углерода в α – железе составляет 0,006 % при 0 °С и 0,02 % при 727 °С. Кристаллическая решетка – объемноцентрированный куб. Магнитен, имеет небольшую твёрдость НВ 80. На диаграмме занимает область GPQ.

2. Аустенит-твёрдый раствор внедрения углерода в γ – железе. Максимальная растворимость углерода в γ – железе составляет 2,14 % при 1147 °С. Кристаллическая решетка – гранцентрированный куб. Аустенит не магнитен. На диаграмме занимает область NJESG. Существует в сплавах железо – углерод только при температурах выше 727 °С.

3. Цементит (карбид железа) – химическое соединение, отвечающее формуле Fe_3C . Цементит содержит 6,67 % углерода. Твёрдый (НВ 800) и хрупкий, слабо магнитен. Кристаллическая решетка ромбическая.

4. Графит – аллотропическая модификация углерода. Имеет гексагональную решетку. Твёрдость и прочность графита очень малы.

Классификация железуглеродистых сплавов

Структура сплавов в равновесном состоянии определяется содержанием углерода. По содержанию углерода на диаграмме железо – цементит все сплавы принято делить на три группы: техническое железо, стали и чугуны.

Техническим железом называются сплавы с содержанием углерода от 0 % до 0,02 %.

При концентрации углерода до 0,006 % сплавы являются однофазными и имеют структуру феррита.

Сплавы с содержанием углерода от 0,006 % до 0,02 % являются двухфазными. Это объясняется тем, что концентрация углерода в сплавах превышает его растворимость в феррите при комнатной температуре. В процессе охлаждения феррит любого сплава, имеющего концентрацию углерода выше 0,006 %, оказывается перенасыщенным. Равновесного состояния феррит достигнет за счёт выделения цементита. Растворимость углерода в феррите определяется линией PQ (рисунок 3.1).

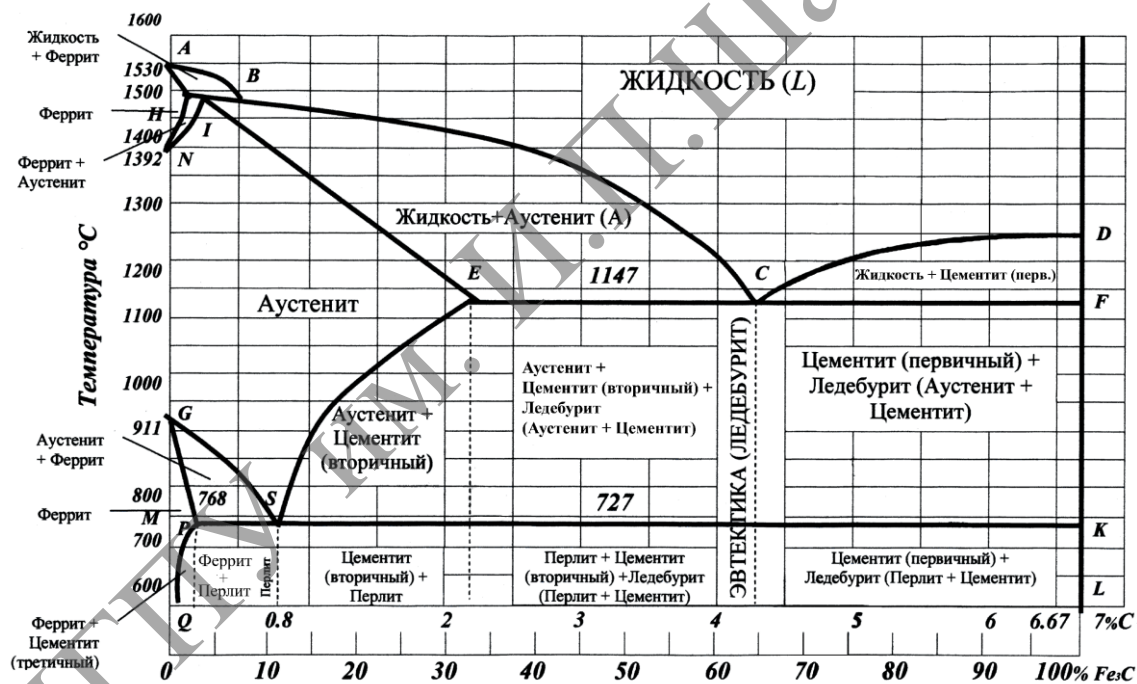


Рисунок 3.1. – Диаграмма состояния железо – цементит

Стальми называются сплавы железа с углеродом, концентрация которого находится в пределах от 0,02 % до 2,14 %.

Процессы, протекающие при первичной кристаллизации, на структуру сталей влияния не оказывают. Окончательная структура сталей формируется из аустенита. При 727 °с (рисунок 3.1, линия PSK) все стали претерпевают эвтектоидное превращение:



Продуктом данного превращения является перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита.

По структуре в равновесном состоянии стали делятся:

- на доэвтектоидные стали (концентрация углерода от 0,02 % до 0,8 %), при комнатной температуре состоящие из двух фаз – феррита и цементита, структура таких сталей – феррит и перлит;
- эвтектоидные стали (концентрация углерода 0,8 %), также состоящие из двух фаз – феррита и цементита, структура – перлит;
- заэвтектоидные стали (концентрация углерода от 0,8 % до 2,14 %) и имеющие структуру перлит и цементит, образованную из двух фаз: феррита и цементита.

Чугунами называются железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14 % углерода. Если весь углерод находится в химически связанном состоянии, то такой чугун называется белым. Своим названием такой чугун обязан цвету излома.

Для белых чугунов характерно эвтектическое превращение при температуре 1147 °С (рисунок 3.1, линия ECF), в результате которого образуется ледебурит – эвтектическая смесь аустенита и цементита: $\text{Ж}_{4,3\% \text{C}} \rightarrow \text{Л} (\text{А}_{2,14\% \text{C}} + \text{Ц}_{6,67\% \text{C}})$.

При температуре 727 °С происходит превращение аустенита в перлит, и после этого ледебурит будет состоять из перлита и цементита.

По структуре в равновесном состоянии чугуны делятся:

- на доэвтектические чугуны (2,14 % – 4,3 % углерода). Фазовый состав – феррит и цементит; структурный состав – ледебурит, перлит, цементит вторичный;
- эвтектические чугуны (4,3 % углерода). Фазовый состав – феррит и цементит; структурный состав – ледебурит;
- заэвтектические чугуны (4,3–6,67 % углерода). Фазовый состав – феррит и цементит, структурный состав – ледебурит, цементит первичный.

Рассматриваемые выше сплавы состоят из одинаковых фаз – феррита и цементита, но имеют разную структуру, а именно структура определяет свойства сплавов.

По мере увеличения концентрации углерода в сплаве увеличивается доля цементита в структуре и возрастает твёрдость сплава. Так, при концентрации углерода в стали 0,4 % твёрдость составляет НВ 160–180 (6 % цементита и 94 % феррита), а при концентрации углерода в чугуне 4 % твёрдость составляет НВ 600 – 650 (60 % цементита и 40 % феррита).

Белые чугуны обладают хорошими литейными свойствами, но высокая твёрдость исключает их механическую обработку. Поэтому белые чугуны не являются конструкционным материалом. Высокие литейные свойства обеспечиваются углеродом, и в то же время углерод, соединяясь с железом, образует твёрдый цементит.

Чтобы сохранить высокие литейные свойства и понизить твёрдость

чугуна, нужно, не уменьшая концентрации углерода, добиться резкого уменьшения цементитной составляющей в структуре. Для этого необходимо, чтобы весь или большая часть углерода выделилась в свободном виде в форме графита. Эту задачу решают введением в сплав кремния и медленным охлаждением отливки.

Серыми чугунами называются сплавы железа с углеродом, в которых весь или большая часть углерода находится в структурно-свободном состоянии в виде пластинчатого (лепесткового) графита. Поскольку серые чугуны – трёхкомпонентный, как минимум, сплав, то диаграмма железо – цементит для определения структуры сплавов не пригодна. В серых чугунах различают металлическую основу и графитовые включения.

По металлической основе серые чугуны подразделяется:

- на ферритные серые чугуны со структурой феррит и графит пластинчатый;
- феррито-перлитные серые чугуны со структурой феррит, перлит, графит пластинчатый;
- перлитные серые чугуны со структурой перлит и графит пластинчатый.

Серые чугуны имеют хорошие литейные свойства, прекрасно обрабатываются резанием, но имеют низкую прочность и плохо сопротивляются ударным нагрузкам. Низкая прочность серого чугуна объясняется формой графита. Пластинчатый графит служит концентратором напряжения, выполняя роль надреза.

Чтобы сохранить достоинства серого чугуна и повысить его прочность, нужно изменить форму графита – пластины превратить в глобулы. Эту проблему решают модифицированием – введением в расплав малых количеств магния или церия.

Высокопрочными чугунами называются сплавы железа с углеродом, в которых весь углерод или большая его часть находится в структурно-свободном состоянии в форме шаровидного графита.

По металлической основе высокопрочные чугуны делятся:

- на ферритные высокопрочные чугуны со структурой феррит и графит шаровидный;
- феррито-перлитные высокопрочные чугуны со структурой феррит, перлит и графит шаровидный;
- перлитные высокопрочные чугуны со структурой перлит и графит шаровидный.

Ковкими чугунами называются сплавы железа с углеродом, в которых весь или большая часть углерода находится в структурно-свободном состоянии в виде графита хлопьевидного. Получают ковкие чугуны путём отжига белых чугунов.

По металлической основе ковкие чугуны подразделяются:

- на ферритные ковкие чугуны со структурой феррит и графит хлопьевидный;
- феррито-перлитные ковкие чугуны со структурой феррит, перлит и графит хлопьевидный;
- перлитные ковкие чугуны со структурой перлит и графит хлопьевидный.

Порядок выполнения работы

Изучение микроструктуры железо-углеродистых сплавов производить при необходимых увеличениях. Просмотреть шлифы под микроскопом, выбрать наиболее характерные участки и зарисовать в журнал.

Техническое железо (образец 1)

Структура технического железа с концентрацией углерода 0,012 % (рисунок 3.2) состоит из светлых полиэдрических зёрен феррита и цементита третичного, который расположен в виде светлых включений по границам зёрен феррита.

Феррит является пластичной и мягкой составляющей (НВ 80, $\delta= 40\%$). Цементит - твёрдый и хрупкий (НВ 800, $\delta= 0\%$). Наличие на границах зёрен прожилок цементита третичного понижает пластичность и вязкость сплава.

В процессе охлаждения из аустенита доэвтектоидных сталей выделяется феррит. Температура, при которой начинает выделяться феррит, определяется линией GS (рисунок 3.1).

Выделение феррита приводит к обогащению аустенита углеродом. При 727 °С концентрация углерода в аустените достигает 0,8 %, и в этих условиях имеет место эвтектоидная реакция $A_S \rightarrow П (Ф_P + Ц_K)$.

Таким образом, структура доэвтектоидных сталей при комнатной температуре состоит из феррита, выделившегося в интервале температур Ar_3-Ar_1 (линии GS и PS), и перлита, образовавшегося при 727°С (рисунок 3.3). В структуре образца 2 цементита много больше, чем в образце 1, и это повышает твёрдость стали до НВ170.

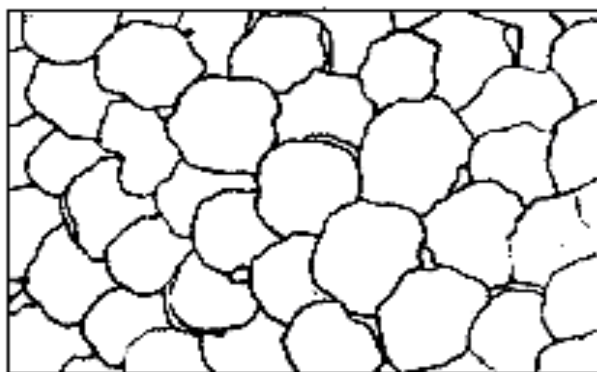


Рисунок 3.2. – Техническое железо

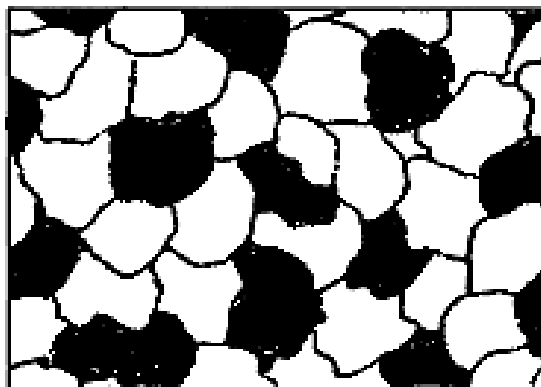


Рисунок 3.3. – Доэвтектоидная сталь (0,45 % С), образец 2 – феррит и перлит



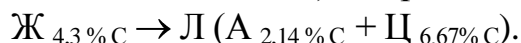
Рисунок 3.4. – Заэвтектоидная сталь (1,2 % С), образец 3 – перлит и цементит

Окончательная структура заэвтектоидной стали формируется из аустенита. При этом в интервале температур $A_{\text{гст}} - A_{\text{г1}}$, (рисунок 3.1, линии SE и SK) из аустенита выделяется цементит вторичный, который, как правило, располагается по границам зёрен. При 727°C концентрация углерода в аустените будет соответствовать точке S и он распадается с образованием перлита: $A_S \rightarrow \text{П} (\text{Ф}_\text{п} + \text{Ц}_\text{к})$. Линия SE показывает снижение растворимости углерода в железе с понижением температуры. Критические точки на этой линии обозначают $A_{\text{ст}}$.

Таким образом, структура заэвтектоидной стали при комнатной температуре – перлит и цементит вторичный (рисунок 3.4). Доля цементитной составляющей возросла в сравнении с образцом 2. Теперь цементит не только входит в перлит (эвтектоид), но и твёрдость стали составляет HB 230.

Чугуны (образцы 4, 5, 6, 7) (рисунки 3.5, 3.6, 3.7, 3.8).

Белый эвтектический чугун кристаллизуется при 1147°C (рисунок 3.1, линия ECF) с образованием ледебурита:



Охлаждение до 727°C приводит к уменьшению концентрации углерода в аустените до 0,8 %. При 727°C аустенит превращается в перлит.

Таким образом, образец 4 при комнатной температуре имеет структуру ледобурита, состоящего из перлита и цементита (рисунок 3.5). Основной фазой в белом чугуна является цементит и поэтому белый чугун твёрдый (НВ 650).



Рисунок 3.5. – Белый эвтектический чугун (4,3 % С), образец 4 – ледобурит

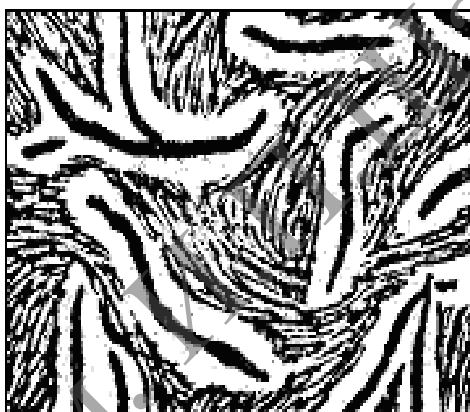


Рисунок 3.6. – Серый чугун СЧ15, образец 5 – феррит, перлит и графит пластинчатый

Зависимость свойств серых чугунов от структуры значительно сложнее, чем у стали, так как серые чугуны состоят из металлической основы и графитовых включений.

Поэтому для характеристики структуры серого чугуна необходимо определить размеры, форму, распределение графита, а также структуру металлической основы.

Чем меньше графитовых включений, тем они мельче и сильнее изолированы друг от друга, тем выше прочность чугуна при одной и той же металлической основе.

Структура серого чугуна СЧ 15 (рисунок 3.6).

Металлическая основа состоит из феррита (белая составляющая) и перлита (тёмная составляющая). Графитовые включения в виде тёмных полос разрезают металлическую основу. Поэтому такой серый чугун имеет

низкую прочность при работе на растяжение и практически нулевую пластичность: $\sigma_B = 150$ МПа, $\delta = 0,5$ %. Твёрдость определяется строением металлической основы и соответствует НВ 200.

Высокопрочный чугун, в отличие от серого, имеет включения графита шаровидной формы, а не пластинчатой. Такой чугун имеет более высокие механические свойства. Структура ВЧ 45 состоит из феррита (светлая составляющая), перлита (тёмная составляющая) и графита шаровидной формы (тёмные округлые включения) (рисунок 3.7). Прочность при растяжении $\sigma_B = 450$ МПа, относительное удлинение $\delta = 5$ %. Твёрдость определяется металлической основой и соответствует НВ 200.

Ковкий чугун имеет графит хлопьевидной формы. Это обеспечивает хорошие механические свойства. Структура КЧ 35 – 10 состоит из светлых зёрен феррита и хлопьевидного графита (рисунок 3.8).

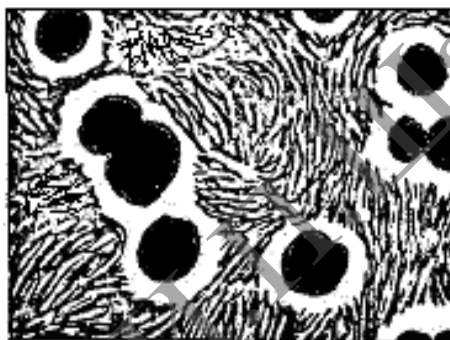


Рисунок 3.7. – Высокопрочный чугун ВЧ45, образец 6 – феррит, перлит и графит шаровидный

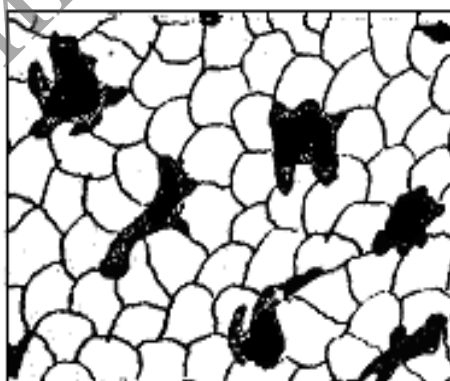


Рисунок 3.8. – Ковкий чугун КЧ 35 – 10, образец 7 – феррит и графит хлопьевидный

Ферритная металлическая основа обеспечивает низкую твёрдость (НВ 120). Прочность чугуна 350 МПа, относительное удлинение $\delta = 10$ %.

Контрольные вопросы

1. Определение феррита, аустенита, цементита, графита.
2. Что такое техническое железо, сталь, чугун?
3. Каково отличие в структуре чугуна белого от серого, высокопрочного, ковкого?
4. Как получают чугун серый, ковкий, высокопрочный?
5. Как и почему меняется твёрдость сплавов по мере увеличения концентрации углерода?
6. По микрофотографии, предложенной преподавателем, укажите тип сплава (техническое железо, сталь, чугун), структурный и фазовый состав, пределы содержания углерода.
7. По диаграмме железо - цементит опишите процессы, протекающие в сталях и белых чугунах при кристаллизации.

Лабораторная работа № 4 Термическая обработка стали

Цель работы: ознакомиться с практикой выполнения отжига, нормализации, закалки и отпуска на примере конструкционной стали 40х (0,4 % углерода, 1 % хрома). Изучить влияние режимов термической обработки на твёрдость стали.

Содержание работы

Свойства стали зависят от химического состава и структуры. Термической обработкой, изменяя структуру, можно получить требуемые свойства конкретной детали.

Различают основные виды термической обработки стали: отжиг, нормализацию и закалку.

Любая обработка стали состоит из нагрева, выдержки при температуре нагрева и охлаждения. Нагрев и выдержка необходимы для превращения исходной структуры в однородный аустенит. Охлаждение с различной скоростью от аустенитного состояния приводит к образованию различных структур и определяет получение требуемых свойств стали.

Основные виды термической обработки стали и их назначение

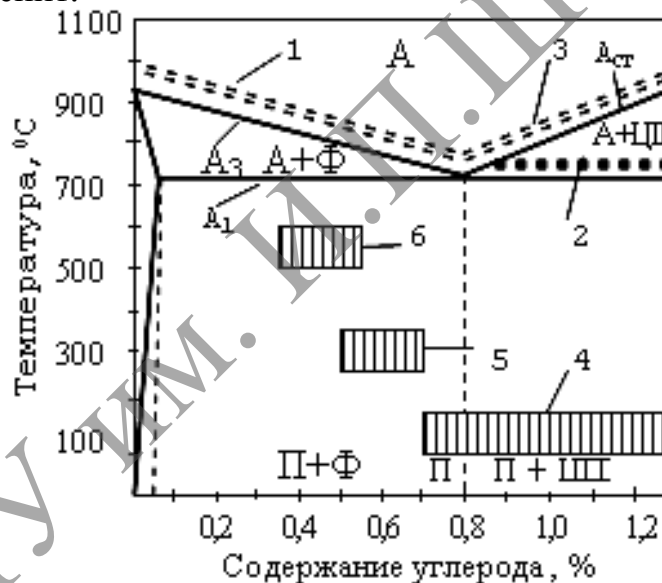
Отжиг – нагрев стали выше линии A_3 (рисунок 4.1) дозвтектоидной, или A_1 заэвтектоидной на $30-50^{\circ}C$, выдержка при этой температуре и последующее охлаждение вместе с печью. Весьма медленное охлаждение приводит сталь в равновесное состояние, снижает её твёрдость. Выполняется для исправления структуры или улучшения обрабатываемости резанием конструкционных и инструментальных сталей.

Нормализация – нагрев стали выше линии A_3 (доэвтектоидной) или $A_{ст}$ (заэвтектоидной) на 30–50 °С, выдержка при этой температуре и последующее охлаждение – на спокойном воздухе. Более ускоренное охлаждение при нормализации несколько повышает прочность и твёрдость стали. Выполняется для исправления структуры или придания большей прочности и повышенной вязкости, конструкционным и инструментальным сталям.

Закалка – нагрев стали выше линии A_3 (доэвтектоидной) или A_1 (заэвтектоидной) на 30–50 °С, выдержка при этой температуре и последующее охлаждение – в воде. Максимально повышается твёрдость и прочность конструкционных и инструментальных сталей.

Процессы нагрева стали

Температура нагрева определяется положением критических точек A_1 и A_3 на диаграмме железо-цементит (рисунок 4.1). Для правильного выполнения термической обработки сталей температуры нагрева должны соответствовать указанным областям, в которых основное фазовое состояние – аустенит.



1 – доэвтектоидных при отжиге, нормализации, закалке;
 2 – заэвтектоидных при закалке; 3 – заэвтектоидных при нормализации;
 4 – при низком отпуске; 5 – при среднем отпуске; 6 – при высоком отпуске

Рисунок 4.1. – Температурные области нагрева сталей

Если же по какой-либо причине температура нагрева окажется ниже линии A_1 , то исходная структура сохраняется, и свойства сталей после охлаждения не изменяются.

В случае нагрева доэвтектоидных сталей выше линии A_1 , но ниже линии A_3 , не весь феррит превратится в аустенит. Присутствие нерастворённого феррита, имеющего низкую твёрдость в структуре, обуславливает пониженную твёрдость стали. Такая закалка считается неполной.

У заэвтектоидных сталей при закалке растворение цементита вторичного в аустените нежелательно из-за охрупчивания стали. Поэтому нагрев выполняется выше линии A_1 , но ниже $A_{ст}$.

Время выдержки в печи складывается из времени прогрева изделия до заданной температуры и длительности выдержки при данной температуре, необходимой для превращения исходной структуры в аустенит. Время нагрева зависит от типа нагревающего устройства, способа укладки изделий, температуры нагрева, формы, размеров изделия и от других факторов. Нормы времени нагрева изделий различной формы в лабораторных печах приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Нормы нагрева изделий

Температура нагрева, °С	Форма изделия		
	Круг	Квадрат	Пластина
	Продолжительность нагрева в минутах		
	На 1 мм диаметра	На 1 мм толщины	На 1 мм толщины
600	2,0	3,0	4,0
700	1,5	2,2	3,0
800	1,0	1,5	2,0
900	0,8	1,2	1,6
1000	0,4	0,6	1,8

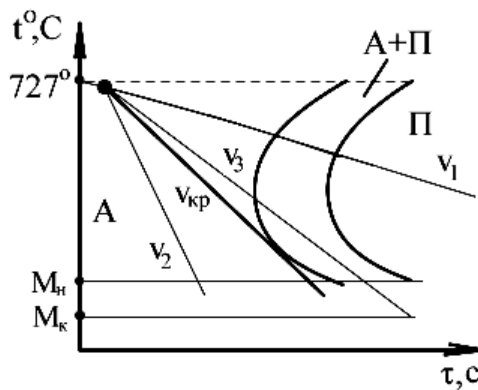
Процессы охлаждения стали

Охлаждающая среда обеспечивает определённую скорость охлаждения и назначается, исходя из требуемых структуры и свойств стали. Получаемую структуру можно определить при наложении векторов скоростей охлаждения на термокинетическую диаграмму (рисунок 4.2) распада аустенита. В зависимости от скорости охлаждения превращение аустенита может быть диффузионным и бездиффузионным.

Критерием превращения является критическая скорость закалки $V_{кр}$.

Критическая скорость охлаждения – минимальная скорость охлаждения стали, при которой подавляется диффузия атомов углерода и не происходит распада аустенита с образованием перлита ($t = 727^\circ\text{C}$). У углеродистых и низколегированных сталей $V_{кр} = 250 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$.

При охлаждении со скоростью $v_{кр}$ кривая охлаждения касательна к линии начала распада А. При скорости $v_1 < v_{кр}$ – низкая скорость охлаждения – идет процесс распада А, закалки не происходит. При $v_2 > v_{кр}$ – происходит закалка с образованием мартенсита. При $v_3 < v_{кр}$ происходит неполная закалка, часть кристаллов А распадается, часть – превращается в мартенсит.



$V_1, V_2, V_3, V_{кр}$ – векторы скоростей охлаждения; M_n, M_k – линии начала и конца мартенситного превращения

Рисунок 4.2. – Термокинетическая диаграмма распада аустенита в стали

Превращение аустенита при отжиге

Скорость охлаждения $V_1 = 0,03^\circ\text{C}/\text{с}$, т. е. менее $V_{кр}$. Аустенит превращается в феррит и цементит:



При превращении перестраивается решетка с диффузионным перераспределением углерода между фазами. Образовавшаяся структура называется перлит-грубодисперсная (т. е. крупная) феррито-цементитная смесь пластинчатой формы. Твёрдость стали невысокая (HRC_{30} 10), что объясняется наличием в смеси фазы с низкой твёрдостью – феррита.

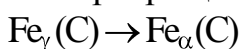
Превращение аустенита при нормализации

Скорость охлаждения $V_2 \approx 30^\circ\text{C}/\text{с}$ также меньше критической. Превращение диффузионное. Образующаяся структура называется сорбит закалки – дисперсная (т. е. мелкая) феррито-цементитная смесь пластинчатой формы. За счёт увеличения дисперсности фаз твёрдость стали возрастает до HRC_{30} 30.

Примечание: при охлаждении в масле ($V_3 \approx 150^\circ\text{C}/\text{с}$) обработка называется "закалка в масло". Поскольку $V_3 < V_{кр}$, то термин "закалка" в данном случае следует считать неудачным. Превращение диффузионное. Получаемая структура – троостит закалки. Это весьма дисперсная (т. е. очень мелкая) феррито-цементитная смесь пластинчатой формы. Увеличение дисперсности фаз повышает твёрдость стали до HRC_{30} 40.

Превращение аустенита при закалке

Скорость охлаждения $V_4 \approx 600^\circ\text{C}/\text{с}$, т. е. превышает критическую. Аустенит превращается в мартенсит закалки:



Превращение является бездиффузионным, т. к. перемещение атомов не превышает межатомного расстояния. Содержание углерода в исходном и образовавшемся твёрдых растворах не изменяется.

Поэтому мартенсит закалки – пересыщенный твёрдый раствор углерода в α – железе. Гранецентрированная кубическая решетка аустенита перестраивается в тетрагональную решетку мартенсита – искажённую кубическую решетку α -Fe.

Степень искажения решетки зависит от содержания углерода в стали и определяет понятие "закаливаемость стали" – способность упрочняться при закалке (рисунок 4.3).

Мартенсит обеспечивает сталям наибольшую твердость при конкретном содержании углерода не только за счёт искажений кристаллической решетки железа внедрёнными атомами углерода, но и за счёт значительной измельчённости кристаллов мартенсита.

Однако увеличение содержания углерода снижает ударную вязкость стали до минимальных значений ($KCU \leq 0,1$ МДж/м²), т.е. сталь становится хрупкой.

Поэтому после закалки на мартенсит выполняется операция термической обработки для повышения вязкости стали – отпуск.



Рисунок 4.3. – Зависимость твёрдости мартенсита от содержания углерода в стали

Отпуск стали – это нагрев стали до температуры ниже линии A_1 (рисунок 4.1), выдержка при этой температуре и последующее охлаждение на спокойном воздухе до комнатной температуры.

В процессе отпуска неравновесное состояние – мартенсит закалки – претерпевает диффузионное превращение и переходит в более устойчивое состояние.

Выбор режимов при отпуске

Температура нагрева при отпуске зависит от назначения стали. При нагреве до различных температур могут быть получены различные сочетания твердости и вязкости. Выполнение одного из видов отпуска закалённой на мартенсит стали является обязательной операцией.

Низкий отпуск (150–200 °С) назначается для инструментальных сталей

(0,7–1,3 % углерода) для повышения вязкости ($KCU \approx 0,2 \text{ МДж/м}^2$) при сохранении твёрдости ($HRC_{\Sigma} 60$). Отпуску подвергаются режущий, мерительный, слесарный и штамповый инструмент.

Среднему отпуску (300–400 °С) подвергаются изделия типа рессоры и пружины из конструкционных сталей с содержанием углерода 0,5–0,7 % для получения твёрдости $HRC_{\Sigma} 40$, повышенных значений ударной вязкости ($KCU \approx 0,4 \text{ МДж/м}^2$) и предела упругости.

Высокий отпуск 500–600 °С выполняется для конструкционных сталей с содержанием углерода 0,3–0,5 % для получения твердости $HRC_{\Sigma} 25$ и наивысшей ударной вязкости ($KCU \approx 0,3 \text{ МДж/м}^2$), исключая хрупкое разрушение изделий типа валов, шатунов. Время выдержки при отпуске назначается примерно в 2 раза больше, чем время выдержки при закалке.

Это обусловлено, во-первых, тем, что прогрев изделий при температурах отпуска происходит медленнее, чем при температурах нагрева при закалке, и, во-вторых, значительной длительностью диффузионного процесса распада мартенсита на феррито-цементитную смесь при пониженных температурах отпуска.

Скорость охлаждения существенного влияния на структуру и свойства сталей не оказывает, поскольку все превращения должны завершиться в процессе выдержки при температуре отпуска. Обычно охлаждение выполняется на спокойном воздухе.

Влияние температуры отпуска на превращение мартенсита закали

При нагреве до 250 °С (низкий отпуск) частично снимаются внутренние напряжения, так как внутри твёрдого раствора незначительное количество углерода, взаимодействуя с железом, образует ϵ – карбид (Fe_xC , где $X = 2,0–2,4$), а содержание углерода в основном объёме мартенсита снижается. Это приводит к повышению вязкости стали практически без разупрочнения, т. е. без снижения прочности и твёрдости. Полученную структуру называют мартенситом отпуска.

При повышении температуры до 250 °С – 450 °С (средний отпуск) мартенсит закали распадается на феррит и цементит. Наличие феррита – фазы с весьма низкой твёрдостью разупрочняет сталь, но повышает её вязкость. Структура, полученная средним отпуском, называется трооститом отпуска – весьма дисперсная феррито-цементитная смесь зернистой формы. В этой смеси цементит имеет форму, близкую к округлой (зернистой).

Дальнейшее повышение температуры до 450–650 °С (высокий отпуск) приводит к коагуляции (укрупнению) цементитных частиц за счёт растворения более мелких, что обуславливает дальнейшее разупрочнение стали и повышение вязкости. Структура, полученная при высоком отпуске, называется сорбитом отпуска – дисперсная (т. е. мелкая) феррито-цементитная смесь зернистой формы.

Порядок выполнения работы

1. Получить образцы конструкционной стали 40Х.
2. Назначить режим термической обработки, указанный в табл. 4.1.
3. Замерить твёрдость подготовленных образцов на приборе ТК-2 по шкале "С" и их значения вписать в таблицу лабораторного журнала.
4. Установить закономерности изменения твёрдости стали от температуры нагрева при закалке, скорости охлаждения, температуры отпуска.
5. Объяснить полученные закономерности фазовыми превращениями и свойствами фаз.
6. Оформить отчёт.

Контрольные вопросы

1. Определение отжига, нормализации, закалки, отпуска стали.
2. Цели выполнения этих видов термообработки.
3. Основные принципы выбора температуры нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения для указанных видов термообработки сталей.
4. Физический смысл критической скорости закалки.
5. Что такое закаливаемость стали?
6. Основные превращения при выполнении указанных видов термообработки.
7. Объяснить зависимость твёрдости стали от температуры нагрева при закалке; от скорости охлаждения (вода, масло, воздух, охлаждение с печью); от температуры отпуска.
8. Назначить режимы закалки и отпуска для изделий из указанной стали (30, 50, 60, У8).

Лабораторная работа № 5

Исследование строения сварного шва и зоны термического влияния

Цель работы: изучить особенности микроструктуры сварного соединения. Познакомиться с основными дефектами шва и способами их выявления металлографическим путём. Изучить влияние дефектов шва на прочность сварной конструкции.

Содержание работы

Современная технология машиностроительного производства в большинстве случаев включает в себя различные способы сварки. При любом способе сварки протекают металлургические процессы, которые включают в себя:

- 1) взаимодействие расплавленного металла с газами и со сварным шлаком;

2) взаимодействие остывающего (твёрдого) металла с жидким и твёрдым шлаком.

Эти процессы имеют свои особенности. Объем сварной ванны невелик и охлаждается быстро. Это приводит к тому, что химические реакции идут не до конца. Малое время взаимодействия жидкого металла шва со шлаком не позволяет полностью удалить оксиды (они просто не успеют всплыть в шлак). Высокая температура и активное взаимодействие жидкого металла со шлаком приводят к перенасыщению шва газами и шлаковыми включениями.

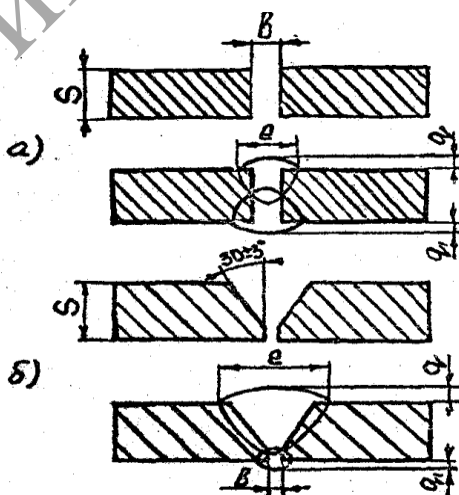
Наиболее часто применяются стыковые, угловые и валиковые швы. Поскольку металлургические процессы в них протекают идентично, достаточно ознакомиться с конструктивными элементами стыкового шва. Два варианта стыковых швов показаны на рисунке 5.1.

Конструктивными элементами сварного шва являются: e – ширина шва; B – зазор между кромками; g – высота усиления шва (верхний мениск); g_1 – высота подварки (нижний мениск); S – толщина свариваемого металла. Значения e , g , g_1 зависят от толщины S и условий эксплуатации.

Кристаллизация шва

Первичная кристаллизация металла сварочной ванны схематично представлена на рисунке 5.2.

Кристаллизация шва начинается от частично оплавленных зёрен основного металла за счёт образования дендритов, которые растут в направлении, обратном отводу теплоты.



а – без обработки кромок; б – с V-образной разделкой кромок

Рисунок 5.1. – Конструкция сварного стыкового шва

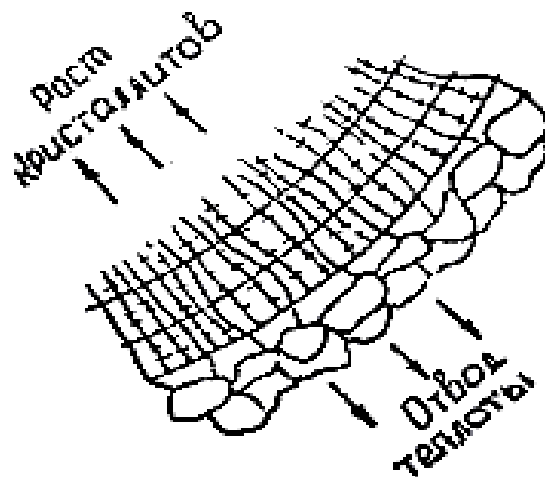


Рисунок 5.2. – Схема кристаллизации сварного шва

Первичная кристаллизация носит дискретный характер, вызванный выделением скрытой теплоты плавления кристаллизации на разделе жидкой и твёрдой фаз. Это приводит к образованию слоистой структуры шва. Теплота, выделяемая при сварке, отводится в тело основного металла.

Близлежащие объёмы металла подвергаются термическому циклу, т. е. нагреву до определённой температуры с различной скоростью и последующим охлаждением. Другими словами, объёмы основного металла, подвергнутого температурно-временному воздействию, проходят вполне определённую термическую обработку.

На свойства сварного соединения наряду с химическим составом металла шва значительное влияние оказывает структура металла шва и околошовной зоны. В зависимости от химического состава и скорости охлаждения структура металла шва может быть самой разнообразной, поэтому рассмотрим частный случай сварки самого распространённого материала для сварных конструкций – низкоуглеродистой стали с содержанием углерода до 0,2 %.

В процессе первичной кристаллизации металла шва этой стали получают столбчатые кристаллы с неоднородным химическим составом. При аллотропическом превращении железа кристаллиты распадаются, и образуется структура, состоящая из зерен феррита и небольшого количества перлита. Происходящее в результате перекристаллизации измельчение зерен оказывает благоприятное влияние на механические свойства металла шва.

Рассмотрим характерные микроструктуры металла шва, выполненного различными способами сварки на низкоуглеродистой стали. Сварной шов, выполненный электродом с тонким покрытием, имеет мелкозернистую структуру. В структуре преобладает феррит; перлита очень мало, потому что углерод, как и другие легирующие примеси, выгорает. В структуре металла имеются нитриды в виде игл или

пластинок, а также оксиды и другие включения. При сварке электродами с толстым покрытием в связи с меньшей скоростью охлаждения металл шва имеет более крупнозернистую столбчатую структуру, состоящую из зерен феррита и перлита.

Хорошая защита металла при сварке и легирование его через покрытие способствуют получению достаточно чистого (без включений) металла шва заданного химического состава. Структура металла шва, выполненного под слоем флюса, имеет более грубое столбчатое строение и состоит из зерен перлита и феррита. Высокая чистота и большая однородность химического состава металла шва обеспечивают его высокие механические свойства.

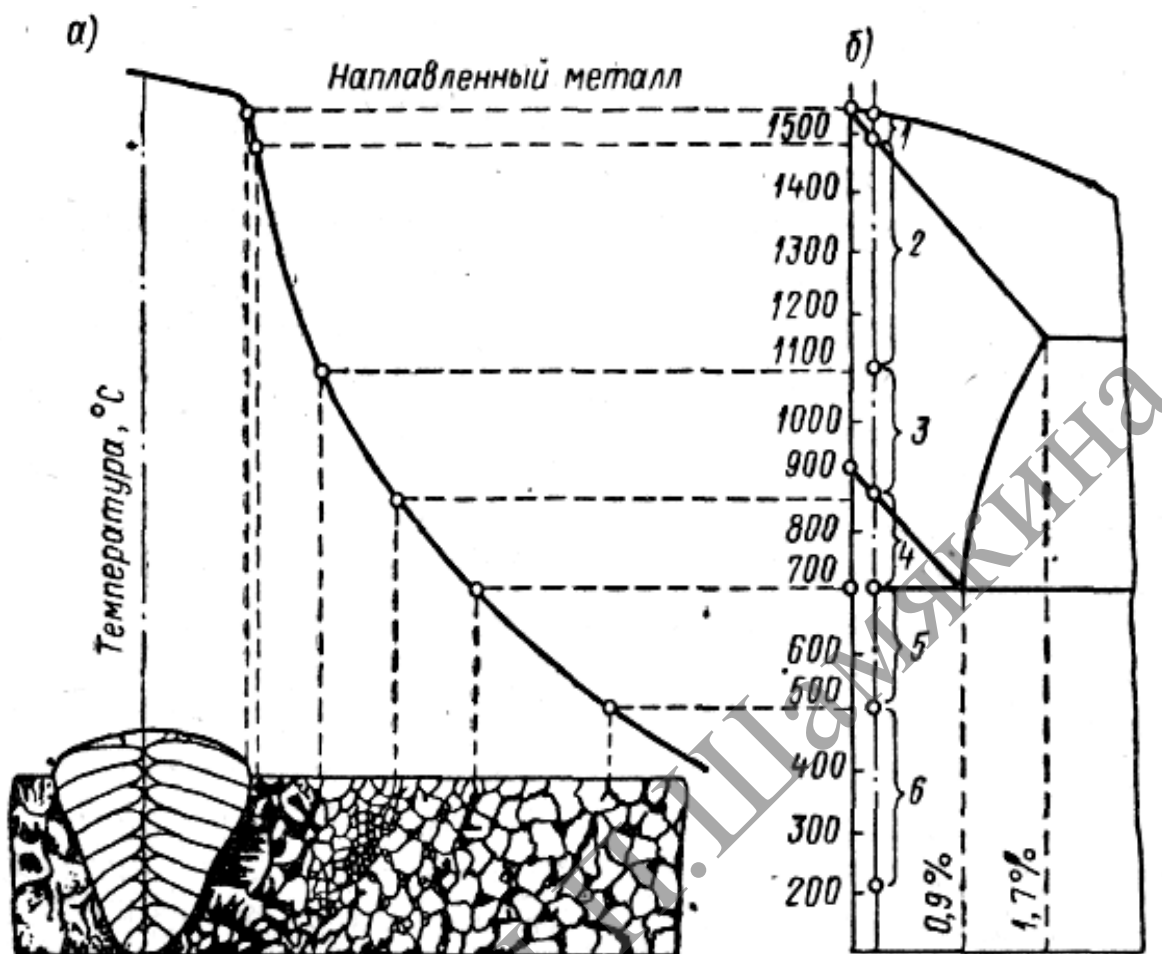
Структура сварного шва заданного химического состава определяется условиями охлаждения, влияющими на процессы вторичной кристаллизации и на диффузионные процессы.

Участок основного металла, подвергшийся в процессе сварки нагреву до температуры, при которой в нем происходят изменения структуры металла, называют *околошовной зоной* или зоной термического влияния (ЗТВ). Температура, до которой нагреваются отдельные точки ЗТВ, изменяется от температуры плавления до окружающей, а структура ЗТВ зависит от его химического состава, теплофизических свойств и от термического цикла сварки.

Структурные изменения в ЗТВ рассмотрим на однопроходном стыковом соединении. При этом над сечением соединения строим кривую распределения максимальных температур и в том же масштабе, рядом, размещаем часть диаграммы железо-углерод. Проецируя с диаграммы Fe—C на сварное соединение границы участков одинаковой микроструктуры, можем с небольшой погрешностью определить в сварном соединении границы отдельных участков зоны термического влияния (рисунки 5.3).

В зависимости от температуры нагрева и, следовательно, структурных и физико-механических изменений в ЗТВ различают следующие участки: 1 – неполного расплавления; 2 – перегрева; 3 – нормализации; 4 – неполной перекристаллизации; 5 – рекристаллизации; 6 – синеломкости.

Участок неполного расплавления является переходным от наплавленного металла к основному, его часто называют переходной зоной; он представляет собой узкую полоску основного металла, которая при сварке находится при температурах ниже линии ликвидуса, но выше солидуса. В процессе сварки этот участок нагревается до температуры, несколько превосходящей температуру плавления, и находится в твердо-жидком состоянии, что способствует протеканию диффузии некоторых элементов между твердой и жидкой фазой переходной зоны; поэтому переходная зона отличается по своему химическому составу, как от основного, так и от наплавленного металла.



а – температурные границы ЗТВ; б – связь структуры ЗТВ с диаграммой состояния Fe – С

Рисунок 5.3. – Схема изменения структур околошовной зоны (ЗТВ) однопроходного шва

Ширина участка неполного расплавления зависит от характера источника нагрева и состава металла и изменяется от 0,1 до 0,4 мм. Свойства этого участка оказывают подчас решающее влияние на работоспособность сварной конструкции.

Участок перегрева ограничивается температурными границами: со стороны шва температурой участка неполного расплавления, а со стороны основного металла температурой примерно 1100° С. На этом участке металл при сварочном нагреве претерпевает аллотропическое превращение из α - в γ -железо, и в связи с тем, что металл этого участка нагревается значительно выше точки A_{c3} , наблюдается перегрев и рост аустенитного зерна.

В процессе остывания вторичная структура на этом участке зависит от состава металла и термического цикла сварки. Так, в некоторых случаях ручной сварки при значительном перегреве в сталях с повышенным содержанием углерода, а при электрошлаковой

сварке даже в низкоуглеродистой стали образуется крупнозернистая видманшtedтовaя структура (рисунок 5.4), которая незначительно влияет на прочность металла, но заметно снижает его пластичность. Ударная вязкость при этом падает на 25 % и более.

Ширина этого участка изменяется от 1 до 3 мм.



Рисунок 5.4. – Видманшtedтовaя структура

Участок н о р м а л и з а ц и и охватывает металл, нагретый в процессе сварки от температуры несколько выше критической точки A_{c3} до температуры 1100°C . На этом участке создаются благоприятные условия для образования мелкозернистой вторичной структуры. Механические свойства металла на участке нормализации обычно выше свойств основного металла, не подвергнутого нагреву при сварке. Ширина этого участка в зависимости от способа и режима сварки изменяется от 0,6 до 4 мм.

Участок н е п о л н о й п е р е к р и с т а л л и з а ц и и охватывает металл, подвергшийся нагреву в интервале температур точек от A_{c1} до A_{c3} . Для низкоуглеродистой стали этот интервал температур составляет немногим более 100°C (от 725 до 850°C). Металл на этом участке подвергается только частичной перекристаллизации. Поэтому здесь наряду с зернами основного металла, не изменившимися при нагреве, присутствуют зерна, образовавшиеся при перекристаллизации.

Участок р е к р и с т а л л и з а ц и и наблюдается при сварке стали, подвергавшейся пластической деформации. На этом участке в интервале температур 450 – 700°C из обломков зерен зарождаются и растут новые равноосные зерна. Если до сварки металл не подвергался пластической деформации (например, литые сплавы), процесс рекристаллизации не имеет места.

Участок с и н е л о м к о с т и охватывает температурный интервал 200 – 400°C , при котором появляются синие цвета побежалости на поверхности металла. Характеризуется тем, что при сварке

низкоуглеродистых сталей, содержащих более 0,005 % O₂, 0,005 % N₂ и 0,0005 % H₂, на участке наблюдается резкое падение ударной вязкости. Оно, вероятно, вызывается старением металла, при котором из пересыщенного твердого раствора выпадают избыточные составляющие, в данном случае азот, углерод, которые в виде тонкодисперсных нитридов и карбидов скапливаются вокруг дефектных участков кристаллической решетки, повышая прочность и снижая пластичность.

Сравнительные средние размеры участков зоны термического влияния по опытным данным для некоторых видов и способов сварки приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. – Средние размеры участков зоны термического влияния при различных способах сварки

Вид сварки	Средние размеры участков, мм			Общая паротяженность указанных участков ЗТВ, мм
	перегрева	нормализации	неполной перекристаллизации	
Дуговая сварка электродами тонкопокрытыми	1,2	0,6	0,7	2,7
Толстопокрывыми	2,2	1,6	2,2	6,0
Под флюсом	0,8–1,2	0,8–1,7	0,7–0,8	2,5–3,7
В среде углекислого газа	0,7–1,0	0,6–1,5	0,5–0,7	1,8–3,2
Электрошлаковая	4,0–5,0	3,0–4,0	4,0–5,0	11,0–14,0
Газовая	21	4	2	27

Размеры отдельных участков зоны термического влияния (ЗТВ) и общая ее ширина зависят от условий нагрева и охлаждения, определяемых погонной энергией сварки, толщиной и теплофизическими характеристиками свариваемого металла, а также температурой окружающей среды.

Дефекты сварного шва

В сварном соединении может возникнуть по разным причинам большое количество дефектов, которые резко снижают конструктивную прочность изделия. В связи с этим сварные швы подвергаются тщательному контролю. При этом контроль зачастую в несколько раз дороже по материальным затратам, чем затраты непосредственно на сварку.

Ниже рассматриваются только те дефекты, которые выявляются методами металлографии.

Макроскопическое исследование выполняется при изучении темплетов с помощью лупы 5...30х или невооруженным глазом.

Подрезы

Подрезы представляют собой канавки в основном металле вдоль шва (рисунок 5.5). Подрезы являются концентраторами напряжений и могут быть причиной разрушения при эксплуатации конструкции.

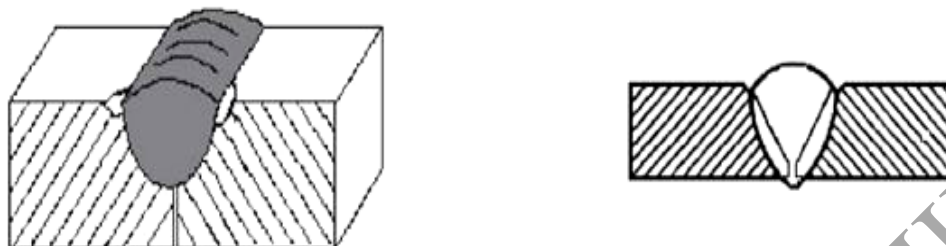
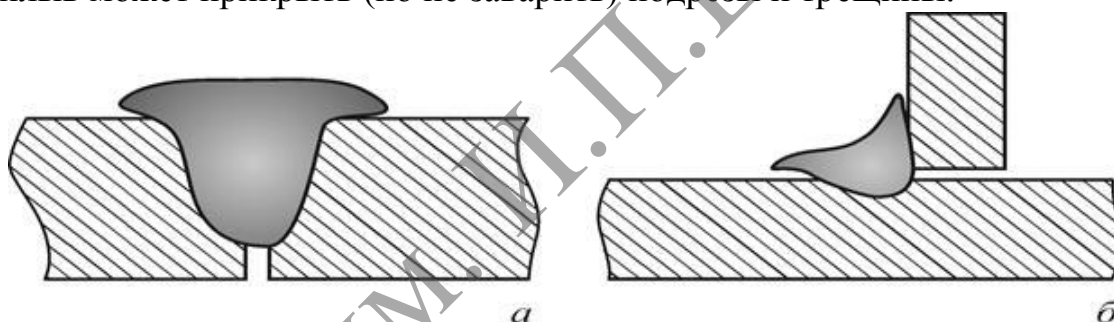


Рисунок 5.5. – Подрез

Наплывы

Наплывы образуются в результате стекания расплавленного металла электрода на твёрдый металл без сплавления с ним. Наплыв оказывает местное температурное воздействие на основной металл и искажает информацию о конструктивных элементах шва (рисунок 5.6). Кроме того, наплыв может прикрыть (но не заварить) подрезы и трещины.



а – стыковой шов, б – угловой шов

Рисунок 5.6. – Наплывы

Поры

Пора – полость округлой формы, заполненная газом. Концентратор напряжений. Образуются поры из-за загрязнённости кромок свариваемых конструкций, влажного флюса, отсыревших электродов. Иногда могут образоваться сквозные поры – свищи.

Поры в шве располагаются в определённой закономерности. Если поры распределены равномерно, то причинами их появления явились постоянно действующие факторы: грязные кромки, ржавчина на свариваемом металле, сырые электроды, неравномерная по толщине обмазка электродов.

Местное скопление пор вызывается случайными факторами (местное загрязнение, колебание токов в источниках питания, нарушение сплошности обмазки электродов).

Строчные поры возникают при сварке ржавого металла, при подсосе воздуха вдоль корня шва (рисунок 5.7).

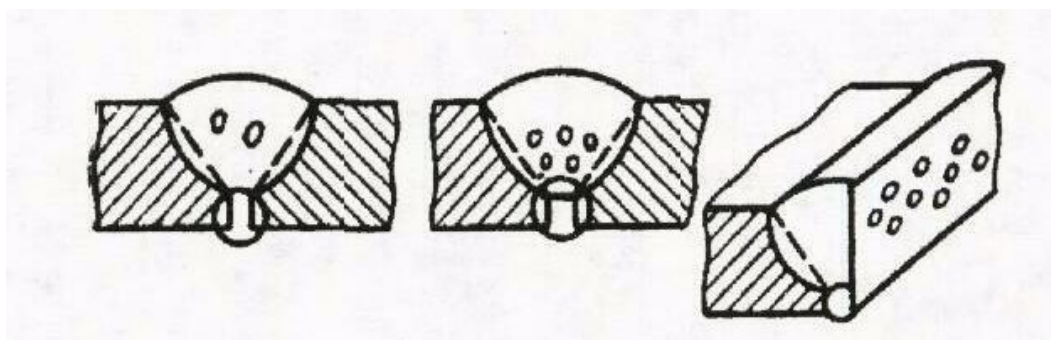


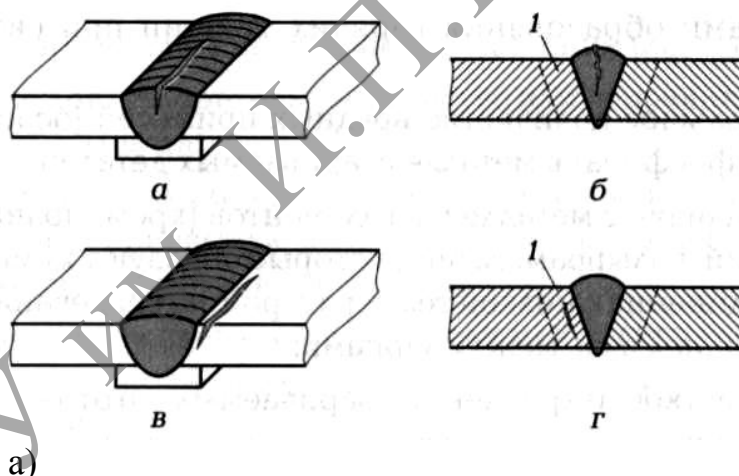
Рисунок 5.7. – Пористость в шве

Шлаковые включения

Шлаковые включения – это объёмы, заполненные неметаллическими соединениями. Чаще всего появляются из-за неправильно выбранного электрода или флюса. Форма включений округлая или вытянутая с "хвостами".

Трещины

Трещина – местное разрушение сварного соединения в виде разрыва. Трещины могут возникать как в наплавленном металле, так и в околошовной зоне (рисунок 5.8).



а) – продольная горячая трещина в наплавленном металле;
б) – холодная трещина в околошовной зоне

Рисунок 5.8. – Трещины в сварных швах

Трещины возникают в жестко закрепленных конструкциях, при сварке сталей и сплавов с плохой теплопроводностью, при сварке сплавов закаливающихся на воздухе, при очень быстром охлаждении и некоторых других причинах.

Непровары

Непровары – это дефект в виде местного несплавления в сварном соединении вследствие неполного расплавления кромок или поверхностей ранее выплавленных валиков. Непровары в виде несплавления основного металла с наплавлениями представляют собой тонкую прослойку оксидов,

а в некоторых случаях – грубую шлаковую прослойку между основным и наплавленным металлом (рисунок 5.9).

Причинами образования непровара являются: плохая зачистка кромок свариваемых деталей от окалины, масла, краски, шлака и т. д.; высокая скорость сварки; использование легкоплавких электродов; смещения электродов к одной из свариваемых кромок.

Разновидностью макроанализа является фрактография – изучение изломов. По излому можно судить о характере разрушения – вязком или хрупком. Волокнистый серый излом характеризует высокую пластичность и ударную вязкость; блестящий, крупнозернистый излом указывает на пониженную ударную вязкость. В изломах хорошо просматриваются поры, шлаки. Светло-серые пятна – оксидные плёнки – опасный дефект, который практически невозможно выявить любым другим методом.

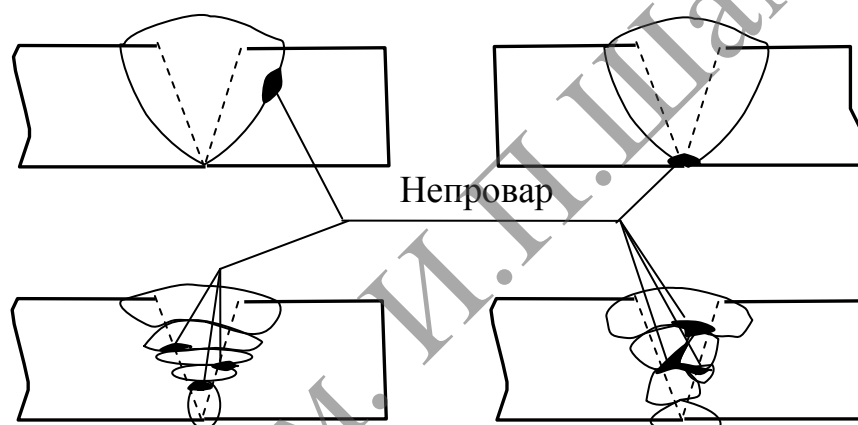


Рисунок 5.9. – Непровары

Микроскопический анализ

Использование микроскопа позволяет детально изучить микроструктуру наплавленного металла и околошовной зоны. Есть возможность определить распределение углерода по сечению шва. По структуре шва можно сделать коррективы в технологии сварочного процесса.

Наконец, только под микроскопом выявляются опасные участки видманштеттовой структуры, выявляются мелкие поры, трещины, шлаковые включения. Очень важным является и то, что, имея чёткие представления обо всех отклонениях в микроструктуре шва, можно назначить последующую термообработку с целью исправления сварного соединения и придания ему соответствующего комплекса механических свойств.

Порядок выполнения работы

Прежде чем приступить к выполнению работы, внимательно ознакомьтесь с теоретическим материалом настоящих указаний.

Оценка микроструктуры и различных дефектов в настоящей работе выполняется без привлечения соответствующих стандартов. Это делается по следующим соображениям: каждый студент, опираясь на накопленные знания по изучаемой дисциплине, должен проявить самостоятельность в своих суждениях и выводах.

Бригада студентов, состоящая из двух человек, получает для работы два образца: макро- и микрошлиф. Эти образцы вырезаны из изделия таким образом, что имеют общую поверхность раздела. Одна из сопряженных поверхностей служит для изготовления макрошлифа, другая – для микрошлифа.

Вначале следует изучить макрошлиф. Зарисовать в отчете сварное соединение и дать ему полное описание, включающее:

- 1) условия проведения сварки (по предварительно разделанным кромкам или без таковой подготовки);
- 2) конструктивные элементы шва (ширину, усиление, подварку);
- 3) имеющиеся дефекты, возможные причины их возникновения и влияние, которое окажут обнаруженные дефекты на механические свойства шва.

После этого изучить структуру шва на микрошлифе под микроскопом при увеличении $100\times$. Сначала исследуется непротравленный образец. Просмотреть шлиф последовательно от оси шва до основного металла, выявить и зарисовать микродефекты (трещины, поры, шлаковые включения, непровары).

После этого шлиф изучается микроструктура протравленного образца. Выявить все характерные зоны шва, измерить их протяженность с помощью окулярмикрометра или пользуясь нониусом предметного столика. Описать условия возникновения каждой зоны.

Если микроструктура шва неудовлетворительная, то указать режим термической обработки для устранения отмеченных недостатков.

Контрольные вопросы

1. Укажите схему кристаллизации сварочной ванны.
2. Что такое околошовная зона?
3. Какие характерные участки наблюдаются в околошовной зоне? Каковы условия их происхождения?
4. Назовите основные дефекты сварного шва. Какие причины порождают эти дефекты?
5. Какие задачи решает макроскопический анализ сварного шва?
6. Какую информацию даёт фрактографическое исследование сварного шва?
7. Какие задачи решает микроскопический анализ сварного соединения и зоны термического влияния?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. Грабовский, Р. И. Курс физики / Р. И. Грабовский. – СПб. : Лань, 2005. – 318 с.
2. Лаврова, И. В. Курс физики / И. В. Лаврова. – М. : Просвещение, 1981. – 255 с.
3. Ливенцев, Н. М. Курс физики / Н. М. Ливенцев. – М. : Высшая школа, 1978. – 336 с.
4. Мэрион, Дж. Б. Общая физика с биологическими примерами : пер. с англ. / Дж. Б. Мэрион ; под ред. А. Д. Суханова. – М. : Высш. школа, 1986. – 623 с.
5. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Академия, 2006. – 560 с.
6. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-микроскопический анализ / С.С. Горелик. – М. : Metallurgia, 1970. – 352 с.
7. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для ВУЗов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд, стер. – М. : Высшая школа, 2003. – 479 с.
8. Гудков, А. А. Методы измерения твердости металлов и сплавов / А. А. Гудков, Ю. И. Славский. – М. : Metallurgia, 1982. – 167 с.
9. Гуляев, А. П. Металловедение : учебник для вузов : [для студентов металлургических, машиностроительных и политехнических вузов] / А. П. Гуляев, А. А. Гуляев. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2012. – 643 с.
10. Колмаков, А. Г. Методы измерения твердости / А. Г. Колмаков, В. Ф. Терентьев, М. Б. Бакиров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Интернет Инжиниринг, 2005. – 150 с.
11. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Metallurgia, 1985. – 256 с.
12. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов : учебник для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов / Ю. М. Лахтин. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – М. : Альянс, 2015. – 446 с.
13. Мальцев, М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М. В. Мальцев. – М. : Metallurgia, 1970. – 367 с.
14. Марковец, М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – М. : Машиностроение, 1979. – 191 с.
15. Материаловедение / под ред. Б. Н. Арзамасова. – М. : Машиностроение, 1986. – 384 с.
16. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – М. : Metallurgia, 1974. – 400 с.

17. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М. Н. Степнов, А. В. Шаврин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 2005. – 399 с.

18. Тимощук, Л. Т. Механические испытания металлов / Л. Т. Тимощук. – М. : Metallurgia, 1971. – 224 с.

19. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 2. Механические испытания. Конструкционная прочность / Я. Б. Фридман. – 3-е изд. – М. : Машиностроение, 1974. – 368 с.

Дополнительная литература:

1. Зорин, Н. Е. Материаловедение сварки. Сварка плавлением : учебное пособие / Н. Е. Зорин, Е. Е. Зорин. – Изд. 2-е, стереотипное. – СПб. : Лань, 2017. – 163 с.

2. Воздвиженский, И. Н. материаловедение и термическая обработка : учебное пособие : [для изучения дисциплины «Материаловедение» студентами, обучающимися по направлениям 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов» 22.03.02 «Металлургия», 27.03.01 «Стандартизация и метрология»] / И. Н. Воздвиженский. – М. : Спутник+ : Инфа-М, 2015. – 230 с.

3. Лахтин, Ю. М. Основы материаловедения : учебник для студентов средних профессиональных учебных заведений, обучающихся по металлургическим и машиностроительным специальностям / Ю. М. Лахтин. – М. : Инфа-М, 2013. – 271 с.

4. Мосесов, М. Д. Основы материаловедения и сварки : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 08.06.01 «Техника и технология строительства», 08.04.01 «Строительство» и 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / М. Д. Мосесов. – М. : Форум : Инфа-М, 2018. – 126 с.

5. Технология сварки плавлением и термической резки металлов : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Металлургия сварочного производства» / [В. А. Фролов и др.]; под ред. В. А. Фролова. – М. : Альфа-М : ИНФРА-М, 2018. – 445 с.

Учебное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

Пособие

Составитель

Голозубов Андрей Леонидович

Корректор *В. В. Кузьмич*

Оригинал-макет *Л. И. Федула*

Подписано в печать 09.09.2019. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Ризография. Усл. печ. л. 3,6. Уч.-изд. л. 4,22.

Тираж 73 экз. Заказ 26.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Мозырский государственный
педагогический университет имени И. П. Шамякина».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий N 1/306 от 22 апреля 2014 г.

Ул. Студенческая, 28, 247777, Мозырь, Гомельская обл.

Тел. (0236) 32-46-29