

И. В. Шутов, М. Н. Королев, М. Д. Кривилев

**РУКОВОДСТВО
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО КУРСУ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
И ТЕХНОЛОГИИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ»**



**Ижевск
2026**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»
Институт математики, информационных технологий и физики
Кафедра общей физики

И. В. Шутов, М. Н. Королев, М. Д. Кривилев

РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО КУРСУ
«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»

Учебно-методическое пособие



Ижевск
2026

УДК 620.22(075.8)

ББК 30.3р30

Р851

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом УдГУ

Рецензенты: Советник Директора по технологии металлургии ООО Завод «БУММАШ» **А. И. Горелов**

к.ф.-м.н., доцент кафедры ТиЭФ ИМИТиФ ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» **Н. А. Орлова**

Составители: Шутов И. В., Королев М. Н., Кривилев М. Д.

Р851 Руководство к лабораторным работам по курсу «Материаловедение и технологии конструкционных материалов» : учеб.-метод. пособие / сост. – И. В. Шутов, М. Н. Королев, М. Д. Кривилев. – Ижевск : Удмуртский университет, 2026. – 65 с.

ISBN 978-5-4312-1369-4

Учебно-методическое пособие включает 6 лабораторных работ, где приводятся базовые понятия и терминология, основные теоретические аспекты и методика выполнения. Пособие содержит фотографии и схемы, иллюстрирующие технологические процессы, изучаемые в рамках курса. Все лабораторные работы разработаны с учетом ГОСТ и нацелены на освоение методов анализа структуры, оценку свойств материалов, технологий термообработки, работу со стандартами. Пособие предназначено для студентов естественно-научных и технических направлений подготовки 04.03.02 Химия, физика и механика материалов, 04.04.02.01 Химия и физика материалов, осваивающих курс «Современная металлография», «Материаловедение», «Технологии конструкционных материалов».

УДК 620.22(075.8)

ББК 30.3р30

ISBN 978-5-4312-1369-4

© Шутов И. В., Королев М. Н.,
Кривилев М. Д., сост., 2026

© ФГБОУ ВО «Удмуртский
государственный университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА	4
Устройство металлографического микроскопа.....	5
Оптическая система микроскопа.....	6
Наблюдение поверхности металла в оптическом микроскопе.....	11
Порядок проведения лабораторной работы	15
Контрольные вопросы	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ (ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРЫ)	17
Этапы подготовки металлографического шлифа.....	19
Порядок проведения лабораторной работы	23
Контрольные вопросы	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИСПЫТАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ	25
Физическая природа микротвердости.....	25
Порядок проведения лабораторной работы	29
Контрольные вопросы	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИСПЫТАНИЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ.....	32
Введение.....	32
Динамические испытания	32
Порядок проведения испытаний	33
Испытания металлических материалов.....	36
Хладноломкость металлов	38
Испытания пластмасс на ударную вязкость	40
Контрольные вопросы	43
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ	44
Отжиг.....	45
Нормализация	47
Закалка.....	47
Отпуск	47
Поверхностное упрочнение	53
Контрольные вопросы	56
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛИТЕЙНОГО ЧУГУНА НА ЕГО СТРУКТУРУ	57
Порядок работы.....	62
Контрольные вопросы	63
ЛИТЕРАТУРА	64

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

Цель работы: изучить оптическую и механическую схемы инвертированного металлографического микроскопа.

Задания:

1. Ознакомиться с оптической и механической схемой микроскопа, используя литературные источники.
2. Освоить методы подбора оптики и настройки микроскопа.
3. Определить цену деления окуляра – микрометра и по заданию преподавателя измерить несколько микроскопических объектов.
4. Ответить на контрольные вопросы.
5. Составить отчет.

Металлография – это научно-практический метод исследования структуры металлов и сплавов с использованием оптических методов анализа.

Конструкция металлографического микроскопа определяется особенностью используемых для исследований образцов – плоских и непрозрачных. Как правило, в металлографии используют так называемый инвертированный микроскоп, в котором образец располагается на предметном столике шлифом вниз. Такое расположение шлифа наилучшим образом обеспечивает получение равномерно резкого изображения видимого поля зрения.

Современный металлографический микроскоп – это сложный высокотехнологичный инструмент, состоящий из множества деталей, расположенных строго определенным образом.

При выполнении работ по испытанию и оценке макроструктуры с помощью микроскопа следует исполнять требования его безопасной эксплуатации, а именно:

- поверхность рук исследователя и материалы, используемые для работы, должны быть без механических и жировых загрязнений;
- манипуляции с элементами управления микроскопа должны выполняться плавно, без рывков и резких движений;
- вращение микровинтов микроскопа при установке объективов и других элементов микроскопа должно производиться плавно без усилий;
- шлиф, подготовленный для установки на предметный столик, должен быть промыт и просушен после травления;
- при выполнении работ не следует менять положение винтов регулировки параметров микроскопа и прикасаться руками к его оптическим поверхностям;
- о факте загрязнения оптических поверхностей потожиловыми следами (отпечатками) пальцев, о любой иной нештатной ситуации следует незамедлительно сообщать преподавателю или лаборанту.

**Самостоятельно разбирать и ремонтировать микроскоп
запрещается!**

Устройство металлографического микроскопа

ГОСТ 28489 – 90 устанавливает термины и определения понятий в области световых оптических микроскопов.

Упрощенная принципиальная схема светового металлографического микроскопа представлена на рис. 1.

Любой металлографический микроскоп состоит из следующих систем:

- оптической (объектив, окуляр);
- осветительной;
- механической (перемещение частей и узлов);
- фотографической аппаратуры.

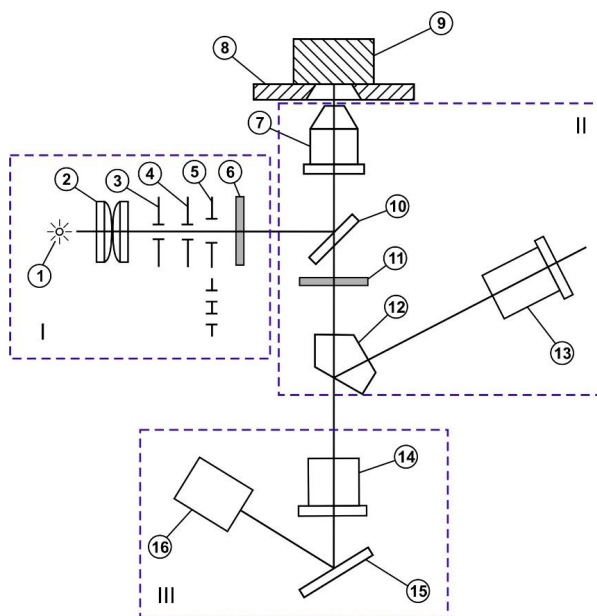


Рисунок 1. Принципиальная схема металлографического микроскопа

I – осветительная система,

II – оптическая система,

III – фотографическая аппаратура,

- 1 – источник света, 2 – конденсор, 3 – апертурная диафрагма,
4 – полевая диафрагма, 5 – диафрагма светлого/темного поля, 6 – поляризатор,
7 – объектив, 8 – предметный столик, 9 – образец, 10 – полупрозрачная пластинка,
11 – анализатор, 12 – пентапризма, 13 – окуляр, 14 – фотоокуляр,
15 – зеркало, 16 – видеокамера

Оптическая система микроскопа

Основные элементы оптической системы микроскопа – объектив и окуляр.

Объектив

Главная деталь, определяющая качество любого оптического микроскопа – его *объектив* – часть оптической системы, обращенная к объекту (рис. 2). На боковой поверхности объектива указывают его основные характеристики: увеличение (для приведенного на рисунке объектива – 50×) и числовую апертуру (0,95). Иногда указывают и более полную информацию.



Рисунок 2. Объективы оптического микроскопа

Апертура

Апертура в оптике – важная характеристика объектива оптического прибора (металлографического микроскопа), описывающая его способность собирать свет и противостоять дифракционному размытию деталей изображения; определяется размерами его линз или диафрагм.

Различают угловую и числовую апертуру.

Угловая апертура (θ) – это половина угла между крайними лучами (ОВ и ОС, рис. 3) светового пучка, входящего в линзу объектива от предмета, измеряется в радианах. При испытании и оценке макроструктуры чаще пользуются понятием *числовой апертуры*, A , величину которой определяют по формуле:

$$A = n \cdot \sin \theta$$

где

A – числовая апертура;

n – показатель преломления среды;

θ – угловая апертура (рад.).

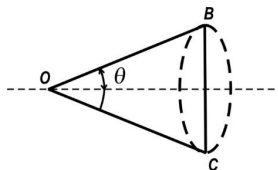


Рисунок 3. Угловая апертура

Действующую угловую апертуру объектива можно изменять путем закрытия/открытия апертурной диафрагмы. При открытой апертурной диафрагме падающий пучок ограничен оправой передней линзы объектива.

Эпиобъектив

В современном металлографическом микроскопе обычно применяют эпи-объективы (рис. 4), позволяющие создавать помимо светлопольного так называемый темнопольный режим освещения. Понятия светлого и темного поля раскрываются далее. В эпиобъективе (рис. 4) собственно объектив (2) закреплен внутри корпуса (1), частью которого является параболическое зеркало (3).

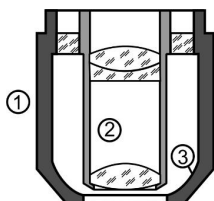


Рисунок 4. Эпиобъектив:

1 – корпус, 2 – объектив, 3 – параболическое зеркало (эпизеркало)

Окуляр

Окуляр – это обращенная к глазу деталь оптической системы, предназначенная для наблюдения – с некоторым увеличением – изображения, создаваемого объективом. Окуляр, предназначенный для визуального наблюдения, формирует мнимое изображение.

В описании окуляров указывают их тип: простые (окуляры Гюйгенса) и компенсационные. Первые применяют с объективами малого увеличения, вторые – с объективами – апохроматами, имеющими большое увеличение.

Металлографические микроскопы последнего поколения имеют усовершенствованную оптическую систему, которая позволяет значительно уменьшить массу и габариты прибора, а также отказаться от использования сложных компенсационных окуляров.

В состав фотографической системы микроскопа входит фотоокуляр, который формирует действительное изображение на фотопленке (фотопластинке) или на матрице видеокамеры. В последнем случае возможен вывод изображения на встроенный монитор или на экран компьютера непосредственно во время наблюдения.

Осветительная система

Осветительная система микроскопа состоит из источника света (галогенная или газоразрядная лампа), коллектора, конденсора, диафрагм (апертурная, полевая, темного поля) и поляризатора. Качественная осветительная система обеспечивает равномерное освещение поля зрения.

Фотографическая аппаратура

Современные микроскопы оснащают цифровыми камерами. Цифровая техника все еще уступает по разрешающей способности традиционным фотоматериалам, однако значительно превосходит их по оперативности применения и возможности дополнительной обработки.

В некоторых моделях современных микроскопов окуляр для визуального наблюдения отсутствует, и получаемое изображение можно увидеть только на экране компьютера. Такие микроскопы устроены проще и стоят, соответственно, меньше. Однако следует помнить, что глаз человека воспринимает изображение объекта напрямую иначе, чем его проекцию на мониторе. Поэтому в ответственных случаях следует дублировать наблюдение изображения объекта на экране прямым изучением его через объектив микроскопа.

Качество микроскопа

Качество испытания макроструктуры во многом определяется качественными характеристиками микроскопа:

- общим увеличением;
- качеством изображения;
- разрешающей способностью.

Увеличение микроскопа

Увеличение микроскопа при визуальном наблюдении (через окуляр) определяется увеличением объектива и окуляра. Чтобы получить его численное значение, следует умножить увеличение объектива на увеличение окуляра. Для некоторых моделей микроскопов полученную величину необходимо дополнительно умножить на увеличение промежуточной (т. н. тубусной) оптической системы. Увеличение микроскопа при фотографировании определяется увеличением объектива и фотографического окуляра.

Как правило, на изображении структуры, полученной в микроскопе, увеличение не указывают, вместо этого размещая на фотографии марку (отрезок) с указанием ее размера в микрометрах (например, как на рис. 5).

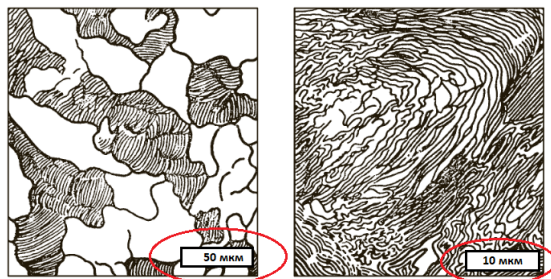


Рисунок 5. Масштабная линейка в микрометрах на фотографиях микроструктуры

Качество изображения

Под *качеством изображения* понимают четкость и бесцветность его контуров. На качество получаемого изображения влияют качество подготовки шлифа (шлифовка/полировка и травление), строения поверхности образца, а также рабочие характеристики микроскопа. Качество конечного результата испытаний определяется самым слабым компонентом методики.

Глубина резкости (аксиальное разрешение)

В металлографическом микроскопе оптическая часть неподвижна; наведение на резкость производится путем вертикального перемещения предметного столика, на котором лежит образец.

Металлографический микроскоп изначально предназначен для наблюдения плоских непрозрачных объектов. Поэтому он спроектирован таким образом, что для участков шлифа, находящихся в плоскости предметного столика, он создает либо плоское (планарное) мнимое изображение для визуального наблюдения, либо также плоское, но действительное изображение, совпадающее с плоскостью фотопленки или матрицы цифрового фотоаппарата (или видеокамеры).

На тех участках шлифа, положение которых не совпадает с плоскостью предметного столика (неровности поверхности, поры, заваленный край) изображение получается нерезким, размытым, и вместо точки изображения получается так называемый кружок рассеяния.

Увеличить глубину резкости можно путем уменьшения размера апертурной диафрагмы. Следует, однако, иметь в виду, что чем больше увеличение объектива, тем меньший эффект дает уменьшение размера диафрагмы, так как при этом уменьшается разрешающая способность объектива.

Под глубиной резкости изображения (T) светового микроскопа понимают расстояние от фокальной плоскости, на котором изображение еще остается резким, и она вычисляется по формуле:

$$T = \frac{1000}{7 \cdot A \cdot \Gamma} + \frac{\lambda}{2 \cdot A^2}$$

где

T – глубина резкости светового микроскопа, мкм;

A – числовая апертура объектива;

Γ – видимое увеличение микроскопа;

λ – длина волны света, мкм.

Так, например, для микроскопа с объективом с увеличением $\times 50$ и апертурой 0,95 и окуляром с увеличением $\times 20$ при общем увеличении системы $\times 1000$ глубина резкого изображения будет приблизительно равна 0,5 мкм.

В современном микроскопе, оснащенном моторизованным предметным столиком и системой компьютерной обработки, можно до определенной степени увеличивать глубину резкости путем сканирования поверхности образца по глубине и сшивкой качественных участков полученных электронных изображений. Большая глубина резкости как при малых, так и при больших увеличениях, достижима лишь в электронных микроскопах.

Аберрации

Даже для абсолютно плоского шлифа качество получаемого в микроскопе изображения остается неидеальным вследствие наличия у применяемой оптики аберраций, в первую очередь аберраций объектива.

Аберрации – несовершенства изображения, получаемого оптической системой.

Аберрации бывают следующих видов:

- сферическая;
- хроматическая;
- кома;
- астигматизм;
- дисторсия и другие.

Первые четыре типа аберраций ухудшают резкость изображения. До некоторой степени уменьшить их влияние можно путем закрытия апертуры, а также применяя монохроматическое освещение (хроматическая аберрация).

Дисторсия – искажение геометрической формы наблюдаемых объектов вследствие различия величины увеличения оптической системы микроскопа в центре изображения и на его периферии. Дисторсия не мешает наблюдению, однако влияет на точность измерений размеров деталей изображения.

Разрешающая способность микроскопа

Большинство аберраций можно практически свести к нулю просто путем закрытия апертурной диафрагмы, однако у этого приема есть недостатки.

Во-первых, если не удастся в достаточной степени увеличить мощность осветителя, такое действие снижает яркость изображения, что мешает визуальному наблюдению. При съемке на видеокамеру можно повысить яркость фотографии путем увеличения экспозиции, однако при этом возрастает уровень шумов и, как следствие, уменьшается контрастность.

Во-вторых, при использовании объективов с большим увеличением на способность микроскопа различать детали изображения начинает оказывать влияние волновая природа света. Дифракция света на краях диафрагмы уменьшает разрешающую способность микроскопа.

Под *разрешающей способностью* микроскопа, d , чаще всего понимают минимальное расстояние между двумя точками, при котором они еще видны раздельно. Разрешающая способность объектива микроскопа зависит от длины волны света, от апертуры и от показателя преломления среды между объективом и поверхностью образца. Окуляр и другие дополнительные оптические элементы не влияют на разрешающую способность микроскопа.

$$d \geq \frac{\lambda}{2 \cdot n \cdot \sin \theta}$$

где

d – разрешающая способность объектива микроскопа;

λ – длина волны света;

n – показатель преломления среды;

θ – апертура объектива.

Иногда (например, в ГОСТ 28489-90) под разрешающей способностью микроскопа понимают величину, обратную d .

Таким образом, для того, чтобы получить высокое разрешение, необходимо увеличивать апертуру объектива. В этом случае лучи падают на поверхность линз под большими углами, что сопровождается увеличением aberrаций. Современный объектив – сложное дорогостоящее оптическое устройство, которое, насколько это возможно, устраняет влияние aberrаций на качество изображения. Оптические системы современных объективов состоят из нескольких (до десятка) линз, иногда имеющих сложную (асферическую) форму и изготовленных из специальных сортов стекла. Степень устранения aberrаций отражена в названиях объективов: ахроматы, апохроматы, планапохроматы и др.

Разрешающую способность микроскопа можно дополнительно увеличить, используя иммерсионный объектив. В этом случае на поверхность объекта помещают каплю специального (иммерсионного) масла, которое заполняет пространство между образцом и объективом. Иммерсионный объектив не предназначен для применения на воздухе. Показатель преломления иммерсионного масла должен совпадать с рекомендованным для данного объектива, иначе получаемое изображение будет некачественным.

Использование иммерсии позволяет повысить разрешающую способность микроскопа приблизительно в полтора раза, по сравнению с обычными неиммерсионными объективами с большим увеличением, в которых апертурный угол близок к 90° , и максимальная разрешающая способность оптического микроскопа имеет порядок половины длины волны света.

Таким образом, несмотря на то, что с точки зрения геометрической оптики увеличение микроскопа не имеет ограничений. Дифракция света не позволяет разглядеть слишком мелкие объекты, поэтому существует понятие «полезного увеличения» микроскопа. Полезное увеличение определяется разрешающей способностью человеческого глаза и разрешающей способностью микроскопа. При наблюдении в воздушной среде максимальное увеличение составляет $\times 1500$; при иммерсии с $n = 1,52$ – $\times 2280$.

Следует также заметить, что при оснащении устаревшего микроскопа видеокамерой общая разрешающая способность всей системы будет зависеть от согласования разрешающей способности объектива с размерами элементов матрицы видеокамеры.

Наблюдение поверхности металла в оптическом микроскопе

Контраст

Важное значение для наблюдения объектов в оптическом микроскопе имеют их контрастность. Под *оптическим контрастом* понимают различимость объекта наблюдения от окружающего его фона.

Если рассматривать монохромное изображение, то количественно контраст определяется следующим выражением:

$$K = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

где

K – оптический контраст (контраст Майкельсона);

I_{max} – максимальная яркость;

I_{min} – минимальная яркость объекта наблюдения.

Когда объект имеет абсолютный контраст, то $K = 1$; при полном его отсутствии (объект сливается с фоном) $K = 0$. Иногда контраст выражают в процентах. Минимальная величина K , при которой глаз воспринимает соседние детали, называется *порогом контрастной чувствительности глаза*. Она зависит от яркости объекта и его углового размера, яркости фона и чёткости контура объекта на фоне. Считается, что человек не различает контраст менее 5 %.

Как правило, контраст между структурными составляющими на полированной поверхности недостаточен для эффективного наблюдения. Для увеличения контраста поверхность шлифа подвергают травлению, в результате чего на его поверхности появляется рельеф, потому что участки поверхности по границам зерен или фазы, отличающейся от основы по химическому составу, протравливаются сильнее (слабее) основы. При прямом падении света на поверхность шлифа происходит отражение света в обратном направлении от участков основы – гладкой поверхности, и его рассеяние – от шероховатых или наклонных участков – границ зерен, поверхности других фаз (рис. 6).

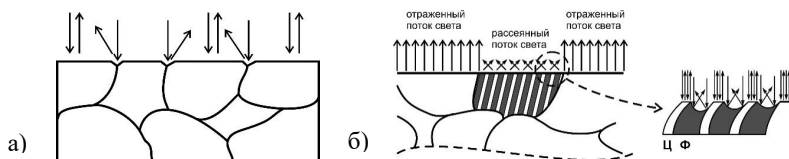


Рисунок 6. Отражение света на границах зерен (а) и на неровностях, возникающих при неравномерном травлении фаз (б)

Контрастность изображения можно увеличить путем закрытия полевой диафрагмы. Поле зрения при этом уменьшается, однако отсекаются лучи, рассеянные от внутренних поверхностей микроскопа, что снижает относительную яркость фона.

Некоторые элементы поверхности можно выявить, используя окрашивающее травление, создающее цветовой контраст. Такой контраст можно увеличить, используя светофильтры.

Также контрастность изображения можно улучшить путем дополнительной компьютерной обработки, например, с помощью фотошоп или других ПО обработки изображений.

Современные металлографические микроскопы позволяют проводить испытания с использованием нескольких методов или режимов наблюдения.

Светлое поле

Светлое поле – наиболее распространенный режим наблюдения в металлографическом микроскопе. При работе в этом режиме свет от осветителя проходит через объектив и падает перпендикулярно поверхности образца. При падении света на ровный участок образца лучи отражаются обратно в объектив и образуют на изображении светлые области. На неровных участках поверхности большая часть света рассеивается и уходит мимо объектива (рис. 7, б). Соответствующие части изображения будут выглядеть темными.

Если образец содержит цветные фазы или при его подготовке использовали окрашивающее травление, контрастность изображения можно увеличить путем применения светофильтров.

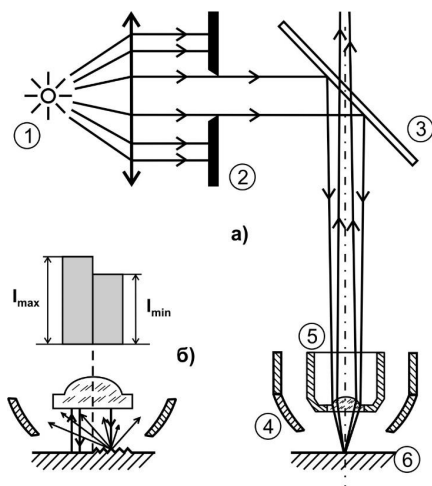


Рисунок 7. Ход лучей в режиме светлого поля:

1 – источник света, 2 – диафрагма светлого поля, 3 – стеклянная пластина, 4 – эпизеркало, 5 – объектив, 6 – образец

Темное поле

В режиме темного поля в канале осветителя после источника света устанавливается кольцевая диафрагма, которая перекрывает ход лучей от осветителя через объектив. Свет проходит мимо объектива, попадает на эпизеркало, отражается от него и падает на образец под большим углом к оптической оси. Лучи,

отразившиеся от гладких участков шлифа, не попадают в объектив, поэтому соответствующие части получаемого изображения выглядят темными. На шероховатых участках свет рассеивается во все стороны и отраженные лучи частично также проходят мимо объектива, однако их часть все же попадает в него, формируя на изображении светлые участки (рис. 8).

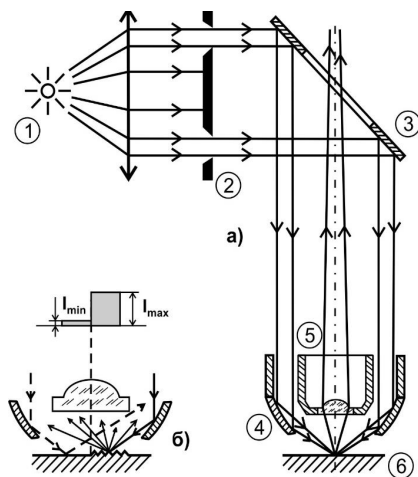


Рисунок 8 – Ход лучей в режиме темного поля:

1 – источник света, 2 – кольцевая диафрагма, 3 – стеклянная пластина, 4 – кольцевое зеркало, 5 – эпизеркало, 6 – объектив, 7 – образец

Получаемое в темнопольном режиме изображение намного менее яркое, чем в режиме светлого поля, однако оно получается очень контрастным, и на нем могут быть видны детали, малоразличимые или даже совершенно невидимые в светлом поле (например, оксидные включения).

Некоторые модели микроскопов позволяют использовать оба вышеупомянутых способа освещения одновременно.

Метод косого освещения

При этом методе поверхность объекта освещается световыми пучками, непараллельными оси микроскопа, которые создают тени от рельефа на поверхности образца. Кроме того, при косом освещении возрастает роль в формировании изображения дифракции лучей на разных элементах структуры объекта.

Косое освещение создают с помощью специальной призмы или путем смещения апертурной диафрагмы. Метод косого освещения создает дополнительный контраст при исследовании пластинчатых структур, а также следов деформации на полированной поверхности. Недостатком метода являются неравномерное освещение поля зрения и пониженная разрешающая способность.

Поляризованный свет

Металлографический микроскоп, как правило, предоставляет возможность наблюдать поверхность образцов в поляризованном свете. Для этого в осветительной системе имеется поляризатор, а в оптическую систему между объективом и окуляром помещают анализатор. Изменяя взаимное направление поляризации поляризатора и анализатора, можно создавать дополнительный контраст для некоторых элементов структуры, которые не видны при обычных режимах наблюдения. Метод можно сочетать с использованием светофильтров.

Этот метод позволяет, например, обнаруживать неметаллические включения, которые в силу их прозрачности не видны в обычном свете либо создают незначительный контраст. Также дополнительный контраст при наблюдении в поляризованном свете может быть создан для металлических включений, структура которых отлична от кубической. Наблюдение в поляризованном свете можно вести только в светлом поле.

Дифференциально-интерференционный контраст (ДИК)

Незначительные неровности поверхности шлифа создают разность фаз отраженных световых лучей. При работе микроскопа в режиме дифференциально – интерференционного контраста эта разность фаз преобразуется в контраст системой, состоящей из кольцевой диафрагмы и фазовой пластинки. Таким образом можно повысить контрастность рельефных структур. Метод позволяет обнаружить разность в уровнях рельефа поверхности ≥ 5 нм. Метод ДИК особенно полезен при изучении границ зерен, двойников и линий скольжения.

Порядок проведения лабораторной работы

1. Изучить устройство и принцип работы микроскопа, определить увеличения объективов и настроить осветительную систему. Для этого необходимо обратиться к паспорту прибора, там указаны все конкретные конструктивные элементы инвертированного микроскопа (получить у преподавателя). Значение числовой апертуры выбито на корпусе объектива. Для контроля резкости используется макровинт, яркость осветительной системы регулируется потенциометром на блоке питания.

2. Научиться определять увеличение микроскопа на основании паспортных данных объектива и окуляра. Общее увеличение микроскопа определяется произведением увеличения объектива и окуляра.

3. Научиться настраивать светопольное и темнопольное изображение и поляризационную приставку. Если микроскоп оснащен возможностью получения темнопольного изображения, необходимо научиться в этом режиме получать резкое изображение объекта. Научится настраивать увеличительную систему и получать контрастное изображение в случае, если микроскоп оснащен поляризационной приставкой.

4. Построить масштабную линейку с помощью объект-микрометра (выдает преподаватель) при различных увеличениях. Поместите объект-микрометр на предметный столик и получите с помощью конкретного объектива его контрастное

и резкое увеличенное изображение. Получите на выбранном объективе изображение микроструктуры образца (выдает преподаватель), наложите линейку с объект-микрометром на изображение микроструктуры, укажите размер в микрометрах.

5. На контрольных образцах (шлифах) получить резкое изображение микроструктуры при различных увеличениях, построить масштабную линейку на изображении в соответствии с увеличением.

6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Увеличение объектива	Увеличение окуляра	Увеличение микроскопа	Числовая апертура микроскопа

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия светового микроскопа.
2. Основные характеристики световых микроскопов (увеличение, предельное разрешение, глубина резкости).
3. Что такое контраст?
4. Основные методы исследования в световой микроскопии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ (ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРЫ)

Цель работы: приобретение навыков по изготовлению металлографического шлифа и определению макро- и микроструктуры в металлических сплавах.

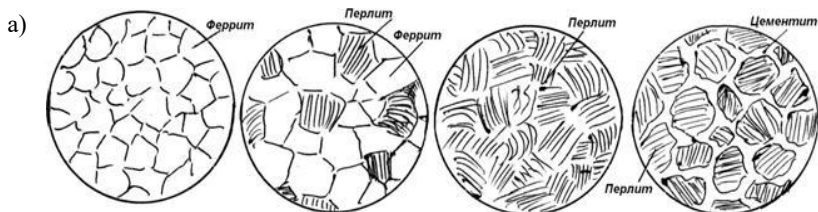
Задания:

1. Используя атласы микроструктур и литературу, изучить типы микроструктур различных сплавов.
2. Определить величину зерна методом подсчета зерен.
3. Определить величину зерна методом подсчета пересечений границ зерен.
4. Определить величину зерна сравнением с эталонными шкалами.
5. Ответить на контрольные вопросы.
6. Составить отчет.

Металлографический анализ относят к разрушающим методам исследования и контроля металлических сплавов, так как наиболее распространенным объектом исследования является специально изготовленный образец металла или сплава – шлиф. Изучение шлифа позволяет выявить и описать характеристики структуры, к которым относятся (рис. 9):

- размеры и форма кристаллитов (зерен);
- размеры и форма структурных составляющих;
- наличие и характеристики дефектов;
- наличие (отсутствие) трещин;
- загрязненность металла неметаллическими включениями;
- иные характеристики.

На рисунке 9 представлены изображения микроструктуры некоторых металлических материалов:



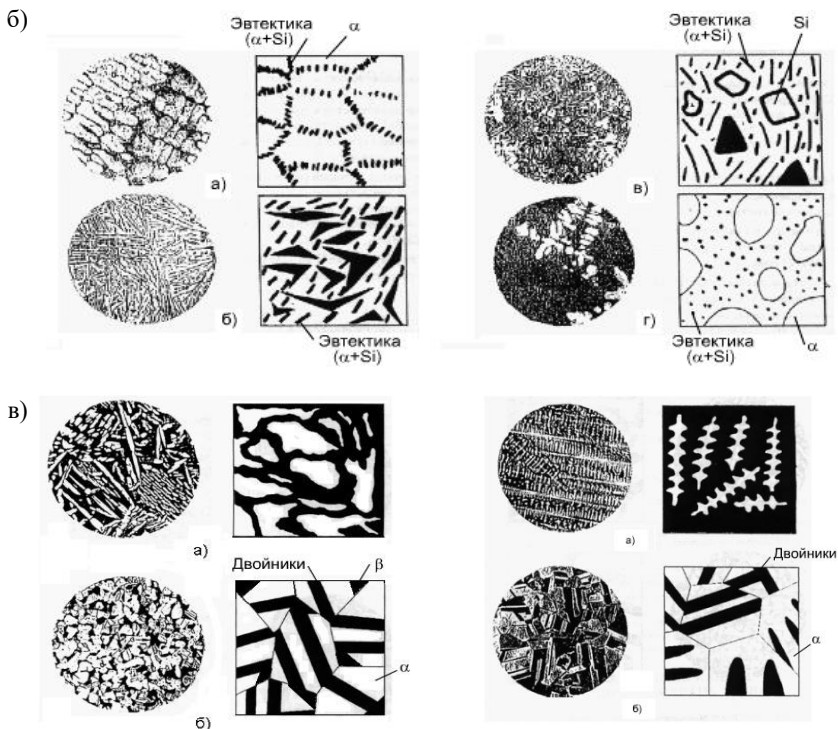


Рисунок 9. Микроструктуры:

а – сталей, б – алюминиевых сплавов, в – медных сплавов

В зависимости от целей испытаний макро и (или) микроструктуры шлиф изготавливают из специально вырезанных из заготовки деталей проб (темплетов), остатков проб для механических испытаний, непосредственно деталей. Вырезку производят механическим, электроэрозионным или иным методом, исключая термическое воздействие на материал образца с последующей шлифовкой и полировкой его поверхности.

Как и любое исследование, металлография требует определенной предварительной подготовки образца. Металлографический шлиф представляет собой кусочек металла, одна из поверхностей которого отполирована до зеркального блеска. Для полировки выбирается плоскость (сечение) образца, при исследовании структуры которого предполагается получить наиболее полную информацию о его структурных характеристиках.

Для выявления и оценки параметров микроструктуры полированный шлиф подвергается металлографическому травлению, с целью создания оптического контраста между его структурными составляющими.

Травление может быть химическим или электролитическим, в зависимости от материала и задач исследования. Травление позволяет получить изображение отдельных структурных элементов, которые имеют различный химический и фазовый состав. На полированном образце такие элементы не видны, за исключением включений.

Этапы подготовки металлографического шлифа

1. Вырезка образца.

Важно при изготовлении шлифа не допускать нагрева (перегрева) материала при вырезке образцов для металлографического исследования. Термическое воздействие на материал во время резки может привести к существенным изменениям структурных составляющих металла, результат исследование будет непредставительным, ошибочным.

В исследовательских лабораториях для вырезки образцов используют специальные отрезные машины, оснащенные рециркуляционной системой охлаждения водным раствором охлаждающего реагента. Существуют различные модификации таких машин, которые используются для резки в зависимости от решаемых при исследовании задач.

2. Запрессовка или заливка образца.

Для удобства при проведении испытаний, образец фиксируют в полимерной матрице (таблетке) с помощью заливки (запрессовки) в специальные смолы. Эта операция подготовки шлифа позволяет:

- надежно закрепить образец в матрице в необходимой для исследования ориентации, сохраняя плоскопараллельность;
- унифицировать форму образца при автоматической пробоподготовке;
- промаркировать образец;
- продлить срок службы полировальной ткани и снизить травматизм при ручной шлифовке/полировке.

Помимо перечисленных достоинств запрессовки стоит отметить возможность, во-первых, качественно подготовить шлифы для объектов исследования тонкого сечения (листы, проволока), а во-вторых, оптимизировать пробоподготовку таких образцов, фиксируя несколько образцов в одной запрессовке.

Существуют различные смолы для запрессовок. Одни требуют специального оборудования с обеспечением системы охлаждения для горячей запрессовки, другие требуют лишь специальных формочек, в которые производится заливка образца холодной смолой с последующим ее отверждением на воздухе. Полимерная смола может обладать специальными свойствами, такими как способность удерживать край образца, способность проводить ток или свет.

3. Шлифовка и полировка.

Получение зеркальной поверхности образца достигается в несколько последовательных этапов шлифовки и полировки. На каждом из этапов размер абразивных частиц постепенно уменьшается.

Основным рабочим органом современных шлифовально-полировальных машин является плоский магнитный вращающийся круг, на котором закрепляется

металлический диск либо с бумагой разной степени грубости (для шлифовки), либо с тканью (для полировки). Система управления машин позволяет регулировать скорость и направление вращения диска, подачу в рабочую зону воды и полировальных суспензий, возможность регулировки силы нажатия на образец.

Применяются как ручной, так и автоматический режим пробоподготовки, в том числе с использованием специального держателя, рассчитанного на одновременную работу с 2, 4 или 6 образцами.

Подготовленный микрошлиф требует бережного отношения, создания особых условий хранения, исключающих его механические повреждения, возможность попадания на него жидкостей и воздействия агрессивных коррозионных сред.

Хранение микрошлифов осуществляется в закрытых ёмкостях с фиксированной температурой и влажностью.

4. Травление химическое или электрохимическое.

Для выявления конкретного контраста микроструктуры образцы после этапа полировки (с зеркальной поверхностью) подвергаются травлению химическими веществами или электролизу в химических реагентах. В зависимости от химического состава материала применяются конкретные химические реактивы, способные взаимодействовать с определенными элементами микроструктуры. Например, для сталей универсальным травителем является раствор азотной кислоты в этаноле, а для алюминиевых сплавов водные растворы щелочей или слабых кислот. После травления образцы в обязательном порядке промываются и обезжириваются.

Макроанализ

В металлургии макроанализ заключается в изучении строения сплавов невооружённым глазом или с помощью небольших увеличений (до 30 раз) с помощью лупы. Макроанализ является предварительным видом исследования.

Строение металла, выявленное невооружённым глазом или при небольших увеличениях, называется макроструктурой. Макростроение можно изучать:

- на поверхности металла (отливки, заготовки или детали после механической обработки);
- на поверхности разрушения (излома) – рис. 10 (а);
- на специально подготовленных поверхностях металла (макрошлифах).

Если макрошлиф изготовлен в поперечном сечении слитка или заготовки, то его называют темплетом. На практике шлиф изготавливают в сечении, где наиболее четко выявляются особенности макростроения.

С помощью макроанализа можно выявить:

- нарушение сплошности металла, то есть усадочную рыхлость, газовые пузыри, пустоты, трещины (рис. 10 (б));
- химическую неоднородность в распределении некоторых элементов, например, ликвацию серы и фосфора;
- неоднородность строения сплава после горячей обработки давлением, например, фигуры течения металла, волокнистость и др.;
- макростроение сварного шва (рис. 10(в)): число слоев шва, зону термического влияния, наличие пор, трещин, непровара и других дефектов;
- по излому, установить вид и характер разрушения образца или детали.

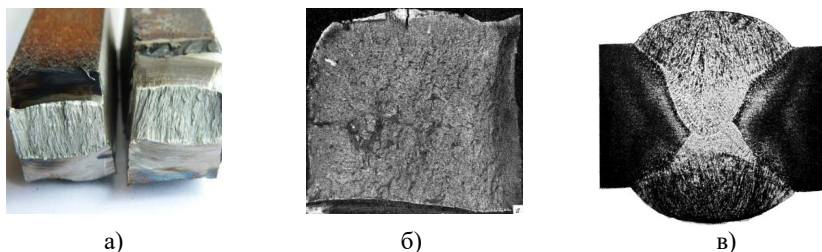


Рис. 10. Образцы для макроанализа:
а – вязкий излом, б – усадочная рыхлость, в – сварной шов

Количественная металлография

Все существующие стандартные методы количественного металлографического анализа основаны на исследовании структуры, выявленной в сечении микрошлифа (по ГОСТ 5639-82).

Величина зерна в плоскости металлографического шлифа определяется методами:

- визуального сравнения видимых под микроскопом зерен с эталоном шкал и определением номера зерна;
- подсчета количества зерен на единице площади поверхности шлифа, с определением среднего диаметра и средней площади зерна;
- подсчета пересечений границ зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра (в случае равноосных зерен) или количества зерен в 1 мм^3 (в случае неравноосных зерен);
- измерения длин хорд под микроскопом или с использованием микрофотографий с определением относительной доли зерен определенного размера;
- исследования ультразвуком.

Величину зерна методом сравнения с эталонными шкалами определяют при увеличении 100х. После просмотра всей площади шлифа выбирают несколько типичных областей и сравнивают с эталонами, приведенными в шкалах приложения (ГОСТ 5639-82). Сравнение можно проводить, наблюдая изображение в окуляре микроскопа или на фотоснимке. Шкалы 1 ÷ 3 представлены десятью эталонами в виде схематизированной сетки, ограничивающей размеры зерен. Эталоны приведены в виде круга диаметром 79,8 мм, что соответствует площади на шлифе $0,5 \text{ мм}^2$.

В таблице 1 приведены некоторые параметры, соответствующие эталонам шкалы G (–3) ÷ 14 для определенного номера зерна, а именно: средние численные значения площади зерна; числа зерен в 1 мм^3 ; диаметра и условного диаметра, а также числа зерен на площади в 1 мм^2 .

Таблица 1

Номер зерна G	Средняя площадь сечения зерна a , мм ²	Число зерен на площади 1 мм ² m			Среднее число зерен в 1 мм ² N_s	Средний диаметр зерна d_s , мм	Средний условный диаметр зерна d_L , мм
		минимальное	среднее	максимальное			
—3	1	0,75	1	1,5	1	1,0	0,875
—2	0,5	1,5	2	3	2,8	0,707	0,650
—1	0,25	3	4	6	8	0,5	0,444
0	0,125	6	8	12	22,6	0,353	0,313
1	0,0625	12	16	24	64	0,250	0,222
2	0,0312	24	32	48	181	0,177	0,157
3	0,0156	48	64	96	512	0,125	0,111
4	0,00781	96	128	192	1448	0,088	0,0783
5	0,00390	192	256	384	4096	0,062	0,0553
6	0,00195	384	512	768	11585	0,044	0,0391
7	0,00098	768	1024	1536	32768	0,031	0,0267
8	0,00049	1536	2048	3072	92682	0,022	0,0196
9	0,000244	3072	4096	6144	262144	0,015	0,0138
10	0,000122	6144	8192	12288	741485	0,011	0,0099
11	0,000061	12288	16384	24576	2097152	0,0079	0,0069
12	0,000030	24576	32768	49152	5931008	0,0056	0,0049
13	0,000015	49152	65536	98304	16777216	0,0039	0,0032
14	0,000008	98304	131072	96608	47449064	0,0027	0,0027

Средний диаметр зерна – это средний реальный размер кристаллов в объеме материала.

Средний условный диаметр зерна – это условная величина, вычисленная как отношение суммарной длины отрезков, проходящих через зерно, к общему числу зерен, пересеченных этими отрезками – результат измерений в плоскости шлифа.

Метод подсчета зерен заключается в определении количества зерен на единицу площади поверхности шлифа (1 мм²), расчете средней площади зерна и среднего диаметра зерен.

Подсчет зерен можно проводить на микрофотографиях, в которых поле зрения ограничивают одной из плоских фигур: окружностью диаметром 79,8 мм или квадратом со стороной 70,7 мм, или прямоугольником с размерами сторон 65 x 77, 60 x 83, 55 x 91 или 50 x 100 мм, что соответствует 0,5 мм² поверхности шлифа при увеличении 100х.

Общее количество зерен (n_{100}) на площади 0,5 мм² шлифа при увеличении 100х для круга подсчитывают по формуле:

$$n_{100} = n_1 + 1/2 n_2.$$

где, (n_1) – число зерен, попавших внутрь выбранной фигуры, и (n_2) – число зерен, пересеченных ее границами.

В случае, если для расчета выбран участок ограниченный квадратом или прямоугольником, общее количество m зерен, приходящихся на 1 мм² площади шлифа, определяют по формуле $m = 2n_{100}$. Подсчет зерен проводят не менее чем в трех характерных местах шлифа и по полученным результатам рассчитывают среднеарифметическое значение.

Среднюю площадь сечения зерна (a) в мм^2 определяют по формуле:

$$a = 1/m$$

Средний диаметр зерна (d_m) в мм определяют по формуле:

$$d_m = 1/\sqrt{m}.$$

Сравнением полученных значений m , a и d_m со значениями соответствующих параметров в табл. 1 определяют номер величины зерна G .

Метод подсчета пересечений границ зерен состоит в подсчете зерен, пересеченных отрезком прямой, и определении среднего условного диаметра (в случае равноосных зерен) или количества зерен в 1 мм^3 (в случае неравноосных зерен).

Подсчет пересечений зерен в обоих случаях можно проводить на микрофотографиях, на которых проводят несколько отрезков произвольной длины (например, 80 или 100 мм при увеличении 100х, что соответствует длине 0,8 или 1 мм на шлифе).

Длину отрезков выбирают с таким расчетом, чтобы каждый из них пересекал не менее 10 зерен, при этом увеличение подбирают так, чтобы на исследуемой поверхности было не менее 50 зерен. Подсчитывают точки пересечений отрезков прямых линий с границами зерен. Зерна на концах прямой, не пересеченные ею целиком, принимают за одно зерно. Определяют суммарную длину отрезков L , выраженную в миллиметрах натуральной величины на шлифе, и суммарное число пересеченных зерен N . Измерения проводят не менее чем в пяти характерных местах шлифа. Подсчет количества пересечений равноосных зерен проводят на двух взаимно перпендикулярных отрезках прямых, проведенных в каждом из пяти мест шлифа.

Средний условный диаметр зерна (d_L) в мм вычисляют по формуле:

$$d_L = L/N,$$

где L – суммарная длина отрезков, мм; N – общее число зерен, пересеченных отрезками длиной L .

Порядок проведения лабораторной работы

1. Изготовить самостоятельно пробу путем вырезания кусочка металла. В отдельных случаях готовую пробу выдает преподаватель, в этом случае пробоподготовка не требуется.

2. Провести макроанализ образца, подготовить отчет.

3. Изготовить шлиф образца путем заливки в смолу, шлифовки и последующей полировки.

4. Подобрать (приготовить) травитель по справочнику, провести микроанализ, подготовить отчет с зарисовкой микроструктуры.

5. Провести количественный анализ одним из трех существующих методов, выбранным преподавателем, и подготовить отчет.

№ секущей длины L	Кол-во зерен на одну секущую N	Средний услов- ный диаметр зерна d_L	Среднее значение $\langle d_L \rangle$	Номер зерна G

Контрольные вопросы

1. В чем отличие микроанализа от макроанализа?
2. Для чего необходимо химическое травление шлифа?
3. Отметьте основные особенности количественной металлографии.
4. Какие типы микроструктур металлов Вы знаете?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ИСПЫТАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: ознакомление с методикой испытания микротвердости различных материалов на приборе ПМТ – 3М, экспериментальное измерение микротвердости металлов и монокристаллических образцов полупроводников.

Физическая природа микротвердости

Испытание твердости различных материалов – один из наиболее легко и быстро выполнимых видов механических испытаний. Пользуясь им, можно осуществлять быстрый и точный контроль характеристик качества изделий и материалов, проводить многочисленные физико-химические исследования, связанные с распознаванием веществ и изучением их свойств и структурных превращений.

Важно, что этот метод позволяет получить косвенную оценку других механических характеристик материалов (модуля Юнга, условного предела текучести), между которыми, с одной стороны, и твердостью, с другой, имеется определенная корреляция.

Кроме того, величина твердости коррелируется кристаллохимическими свойствами вещества, поэтому метод измерения микротвердости позволяет изучать строение и диаграммы состояния сплавов двух- и многокомпонентных систем.

Твердость не может быть определена однозначно, так как она зависит от целого ряда физических свойств, а также от метода испытания. Твердость, измеренную методом вдавливания индентора, принято называть микротвердостью, поскольку твердость в этом методе оценивается в ограниченной области. Микротвердость не является такой физической константой вещества как, например, температура плавления или теплота сублимации. Однако эта условная характеристика сопротивления упругопластическим деформациям при контактом сжатии весьма чувствительна к величине различных параметров кристаллической решетки, определяющих ее энергетические характеристики.

Полупроводники со структурой алмаза (C, Si, Ge, α -Sn), сфалерита или вюрцита (соединения A^3B^5 , A^2B^6 , A^1B^7) имеют схожую структуру, как следствие, схожий механизм деформации. Зависимость микротвердости H от межатомного расстояния d для полупроводников со структурой алмаза удовлетворяет уравнению:

$$H = \frac{K}{d^n},$$

где K – энергия компоненты ковалентной направленной связи.

Для элементарных полупроводников с чисто ковалентной связью (C, Si, Ge, α -Sn) микротвердость максимальна и соответствует уравнению:

$$H = \frac{11000}{d^{5,4}},$$

где d – межатомное расстояние, Å; H – микротвердость, кгс/мм².

В некоторых справочниках значение микротвердости материалов указывается в МПа, значение 1 МПа в точности соответствует 1 кгс/мм².

При одинаковом межатомном расстоянии, например, $d = 2,5 \text{ \AA}$, наблюдается резкое снижение твердости при переходе от чисто ковалентных полупроводников к изоструктурным наиболее ионным состояниям A^+B^7 .

При указанном переходе уменьшение микротвердости объясняется снижением энергии ковалентной направленной связи. В уравнении зависимости микротвердости H от межатомного расстояния d для полупроводников со структурой алмаза резко уменьшается значение коэффициента K , а показатель степени n не изменяется, то есть для полупроводниковых материалов справедливо:

$$H = \frac{K}{d^{5,4}},$$

где K уменьшается с увеличением доли ионности соединения. Существование линейных зависимостей $H - d^n$ позволяет прогнозировать микротвердость еще не синтезированных или малоизученных соединений.

Значения микротвердости зависят от концентрации легирующей примеси.

Легирующие примеси в полупроводниках позволяют контролируемо изменить электрические свойства полупроводника, в частности, его тип проводимости.

Для получения полупроводников с электронной проводимостью (n-типа) используют донорные примеси. К ним относятся фосфор, мышьяк, сурьма, висмут. Для получения полупроводников с дырочной проводимостью (p-типа) вводятся акцепторные примеси. К ним относятся бор, алюминий, галлий, индий. Также в качестве легирующих примесей могут использоваться примеси тяжелых, благородных и редкоземельных металлов.

Начиная с концентрации 10^{16} см^{-3} в образцах дырочного типа проводимости происходит быстрое падение твердости. При прочих равных условиях образцы p-типа менее хрупки, чем образцы n-типа. Твердость пластин Si, ориентированных в направлении $\langle 100 \rangle$, в 1,2 раза меньше, чем в направлении $\langle 111 \rangle$.

Микротвердость ионных кристаллов подчиняется эмпирическому соотношению

$$H = \frac{fz_1z_2}{d^m},$$

где f – структурный коэффициент; z_1 и z_2 – валентности ионов; d – межатомное расстояние; $m = 4-6$ для структур типа NaCl.

Здесь, как и в случае алмазоподобных структур, микротвердость тем выше, чем более ковалентна химическая связь.

Микротвердость большинства металлов приближенно подчиняется уравнению

$$H = \frac{K}{d^{4,5}}.$$

Таким образом, для ковалентных, ионных и металлических кристаллов микротвердость, как и энергия решетки, связана с межатомным расстоянием. Однако проводить корреляции значений микротвердости атомных и ионных кристаллов

можно лишь при одинаковом типе кристаллической связи, одинаковых валентных состояниях и одинаковом типе кристаллической решетки.

Для измерения микротвердости германия, кремния и полупроводников типа A^3B^5 обычно используется метод, основанный на измерении линейной величины диагонали отпечатка, получаемого от вдавливания алмазной пирамидки в исследуемый материал под определенной нагрузкой.

Одним из приборов для измерения микротвердости является микротвердомер ПМТ-3 (см. руководство пользователя).

Этот прибор представляет собой специальный микроскоп, общее увеличение которого с прилагаемыми объективами составляет 487х и 130х. Прибор снабжен особым приспособлением – индентором, в который вставлена квадратная алмазная пирамидка. При проведении замера микротвердости индентор приводится в соприкосновение с отполированной или хорошо отшлифованной поверхностью исследуемого образца. Алмазная пирамидка под определенной нагрузкой вдавливается в образец. Отпечаток пирамидки на поверхности объекта изучается под микроскопом, производится измерение диагонали отпечатка.

Микротвердость определяется по формуле:

$$H = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{P}{D^2},$$

где α – угол между гранями четырехгранной алмазной пирамидки, обычно 136° ; P – нагрузка, кгс; D – диагональ отпечатка, мм.

Результат измерения микротвердости зависят от:

- ориентации испытуемой грани;
- выбора нагрузки, прикладываемой к индентору;
- выбора длительности нагружения и выдержки под нагрузкой;
- методики подготовки образцов и т. п.

В современной интерпретации микротвердость H определяется через удельную поверхностную энергию грани, то есть ε_{hkl} энергию образования единицы поверхности грани. При измерении микротвердости следует учитывать физико-химическую природу исследуемого материала. Для пластичных материалов (с преобладанием металлического характера связи) отпечатки получаются правильной формы, и оценка микротвердости не вызывает затруднений. Для хрупких материалов (с преобладанием ковалентной связи) отпечатки часто получаются искаженной формы, с трещинами и сколами, что приводит к плохой воспроизводимости результатов и значительным погрешностям измерений. Для таких материалов результаты можно скорректировать, учитывая микрохрупкость.

Хрупкость оценивается по специальной методике путем подсчета числа отпечатков с трещинами, числом трещин у каждого отпечатка и их характером.

Для определения среднего балла хрупкости введена пятибалльная шкала, представленная в табл. 2.

Суммарный балл хрупкости определяется по формуле:

$$X_p = 0 \cdot n_0 + 1 \cdot n_1 + 2 \cdot n_2 + 3 \cdot n_3 + 4 \cdot n_4 + 5 \cdot n_5,$$

где n_i – относительное количество отпечатков из общего числа с данным (i) баллом хрупкости (рекомендуется делать 25–100 отпечатков).

Для учета темпа нарастания хрупкого разрушения материала в зависимости от нагрузки P берут отношение приращения суммарного балла хрупкости ΔX приращению нагрузки ΔP :

$$\left(\frac{\partial X}{\partial P} \right)_P \approx \frac{\Delta X_P}{\Delta P}.$$

Показатель хрупкости $\mathcal{Y}_P$ материала равен

$$\mathcal{Y}_P = X_P \left(\frac{\partial X}{\partial P} \right)_P.$$

Он отражает характер хрупкого разрушения и темп нарастания его с увеличением нагрузки.

Таблица 2

Балл хрупкости в зависимости от характера отпечатка

Характер отпечатка	Балл хрупкости
Без видимых трещин и сколов	0
Одна трещина небольшая	1
Одна трещина, не совпадающая с продолжением диагонали отпечатка	2
Две трещины в смежных углах отпечатка	3
Две трещины в противоположных углах отпечатка	
Больше трех трещин. Один-два скола у сторон отпечатка	4
Разрушение формы отпечатка	5

При измерении микротвердости на хрупких образцах необходимо соблюдать постоянство условий испытаний: точно выдерживать время нагружения, время выдержки под нагрузкой и интервал времени после снятия нагрузки. Образование трещин и их рост продолжается еще некоторое время после снятия нагрузки, поэтому измерять отпечаток следует через 10–15 секунд после нанесения накола.

Для измерения микротвердости на хрупком образце проводят серию измерений при различных нагрузках. Чем больше нагрузка, тем большее количество отпечатков получается с более высоким баллом хрупкости. Отпечатки с одинаковым баллом хрупкости группируются в серии, и для них оценивается значение кажущейся микротвердости.

Зависимость между микротвердостью материала и баллом его хрупкости обычно носит линейный характер. Экстраполируя графически эту зависимость на нулевой балл хрупкости, получают значение микротвердости, которое можно считать истинным.

Порядок проведения лабораторной работы

1. Изучить паспорт и руководство по эксплуатации прибора ПМТ – 3.
2. Определить цену деления барабана винтового окуляр- микрометра или масштаб увеличения. Для этого:

2.1. Передвижением оправы главной линзы установить окуляр на резкое изображение сетки.

2.2. На предметный столик установить объект-микрометр, после чего перемещением тубуса (трубой и микронаводкой) обеспечить его резкое изображение. При установке объект-микрометр нужно повернуть так, чтобы штрихи на нем были параллельны штрихам неподвижной шкалы окуляра.

2.3. Совместить перекрестие подвижной сетки с изображением объект-микрометра и снять отсчет с измерительного барабана окуляр-микрометра. Вращением измерительного барабана сместить перекрестие на возможно большее число делений шкалы объект-микрометра и снова снять отсчет по измерительному барабану. Разность отсчетов дает число делений окуляр-микрометра, уместившихся в определенном числе делений объект-микрометра. Цена делений окуляр-микрометра определяется по формуле

$$E = \frac{T \cdot Z}{A},$$

где Z – цена делений объект-микрометра, $Z = 0,01$ мм; T – число делений объект-микрометра; A – разность отсчетов окуляр-микрометра. Результаты измерений цены деления окуляр-микрометра свести в таблицу 3.

Таблица 3

Определение цены деления окуляр-микрометра E

Номер измерения	Число совмещенных делений объект-микрометра, T	Число делений окуляр-микрометра			Цена деления E, мкм
		Начало отсчета, a	Конец отсчета, b	Разность $A = b - a$	
1					
2					
3					
Среднее					

3. Прибор ПМТ-3 должен быть отцентрирован так, чтобы отпечаток от алмазной пирамидки располагался приблизительно в центре поля зрения.

Проверка центровки производится следующим образом.

Шлиф из монокристаллического Al или образец NaCl свежего скола поместить на предметный столик под объективом. Столик должен быть прижат к левому углу прибора. Сфокусировать микроскоп на поверхность образца. На утолщенную часть штока нагружающего механизма установить гирию весом 100 кгс (для получения большого накола). Рукояткой 1 (см. руководство) повернуть столик

против часовой стрелки до упора. Вращением рукоятки 5 против часовой стрелки произвести накол. Поднять алмаз, повернуть столик в прежнее положение.

Если прибор не расцентрирован, то центр отпечатка должен совпадать с центром перекрестия сетки винтового окуляр-микрометра, установленного в нулевое положение, то есть перекрестие подвижной сетки совместится с делением «4» неподвижной сетки при установке барабанчика винтового окуляр-микрометра на «0».

Если отпечаток не совпадает с центром перекрестия, то центровочными винтами центр отпечатка подводится к центру перекрестия сетки окуляр-микрометра, установленного в нулевое положение.

С помощью микровинтов столика выбрать новое место накола, вновь сделать отпечаток, повторить операцию настройки и добиться совпадения центра отпечатка с центром перекрестия.

4. Измерение микротвердости исследуемых образцов.

Монокристаллические образцы перед измерением должны быть тщательно шлифованы на оргстекле в водной суспензии микропорошка, промыты водой и высушены фильтровальной бумагой.

4.1. Образец закрепляется пластилином на планке, причем исследуемая поверхность должна располагаться параллельно рабочей плоскости столика. Это достигается с помощью ручного прессика.

4.2. Груз в 100 кгс помещается на утолщенную часть штока.

4.3. Сфокусировать микроскоп на поверхность пластины и выбрать место накола.

4.4. Плавно повернуть предметный столик против часовой стрелки до упора.

4.5. Медленным поворотом рукоятки 5 против часовой стрелки опустить шток так, чтобы алмаз коснулся поверхности исследуемого образца. После выдержки в течение 5 секунд под нагрузкой повернуть рукоятку 5 арретира в исходное положение.

4.6. Предметный столик осторожно повернуть в исходное положение.

4.7. Провести измерение диагонали отпечатка при помощи окуляр-микрометра. Микровинтами подвести отпечаток к перекрестию так, чтобы две стороны перекрестия прилегали к двум сторонам отпечатка, рисунок 11 (а). Произвести отсчет по измерительному барабану. Затем измерительный барабан вращают до тех пор, пока крест окуляра совместится с противоположными двумя сторонами отпечатка, рисунок 11(б). Произвести отсчет по измерительному барабану. Разница отсчетов, умноженная на цену деления измерительного барабана, дает истинную величину диагонали отпечатка.

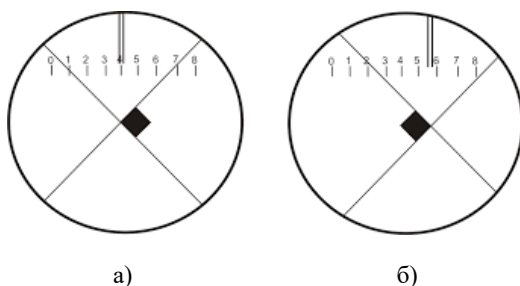


Рисунок 11. Измерение диагонали отпечатка при помощи окуляр-микрометра

Микротвердость определяется по формуле:

$$H = \frac{1854 \cdot P}{D^2},$$

где H – микротвердость, кгс/мм²; P – нагрузка; D – диагональ отпечатка, мкм.

4.8. Указанным образом определить микротвердость исследуемого образца в 10 различных точках, вычислить среднее значение и погрешность измерения для каждого образца.

4.9. Результаты измерений свести в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерений микротвердости

Материал образца	№ образца	№ измерения	Нагрузка P , кгс	Диагональ отпечатка, делений окуляр- микрометра, мкм		$D = b - a$, мкм	H , кгс/мм ²
				Начало отсчета a ,	Конец отсчета b ,		
	1	1					
		2					
		3					
		Ср.					

Контрольные вопросы

1. Механические свойства металлических сплавов и их особенности.
2. Микротвердость и ее измерение.
3. Особенности определения микротвердости хрупких материалов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИСПЫТАНИЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

Цель работы: ознакомление с методикой работы на маятниковом копре КМ-0,5, экспериментальное определение ударной вязкости КСУ на различных материалах.

Введение

Под механическими свойствами металлов обычно понимают характеристики материала, полученные в результате статических испытаний на растяжение/сжатие, такие как предел прочности, σ_B , предел текучести, σ_T , и др. Однако следует заметить, что такие испытания производят на простых по форме образцах, обеспечивающих однородное напряженное состояние и имеющих качественно обработанную поверхность. В то же время в реальных конструкциях имеются отверстия, надрезы, дефекты внутреннего строения и дефекты обработки поверхности. Напряжения в окрестности таких несплошностей могут многократно превышать средние напряжения по материалу, что способствует зарождению трещин вблизи них. Поэтому конструкционный материал должен обладать таким качеством, как высокая надежность, то есть способность сопротивляться распространению уже образовавшейся трещины. Характеристики надежности определяют путем специальных статических или динамических испытаний.

Динамические испытания

Наиболее распространен метод динамических испытаний на ударный изгиб (метод определения ударной вязкости металлов; испытания по методу Шарпи), требующий меньших временных затрат и более простого оборудования, хотя и менее точный, чем статические методы определения надежности. Методика таких испытаний определяется ГОСТ 9454-78. В настоящее время действует также ГОСТ Р ИСО 148-1-2013, а с 2026 года в действие вступает ГОСТ 9454-2025.

Наименование испытаний «динамические испытания на ударный изгиб» нередко сокращают до «определение вязкости» или «динамические испытания», хотя в действительности последнее выражение имеет более широкий спектр значений.

Следует также отметить, что упомянутые выше стандарты относятся только к испытаниям металлических материалов, произведенных по традиционным технологиям. Для подобных испытаний металлических спеченных материалов существует особый стандарт ГОСТ 26528-98. Полимерные материалы также испытывают по специальным стандартам по методу Шарпи и по методу Изода (при консольном изгибе).

Порядок проведения испытаний

При проведении испытаний на определение ударной вязкости по методу Шарпи образец прямоугольного или квадратного сечения с концентратором (надрезом) посередине разрушают ударом маятникового копра. По результатам испытаний определяют работу удара по разрушению образца. В качестве значения величины ударной вязкости принимают отношение работы по разрушению образца к площади его поперечного сечения в области разрушения.

Маятниковый копер, используемый для динамических испытаний – механическое устройство, характеристики которого регламентированы соответствующим стандартом. В простейшем исполнении оно представляет собой массивный металлический маятник, подвижно закрепленный на оси (рис. 12, а). На корпусе копра размещается крепление для испытуемых образцов.

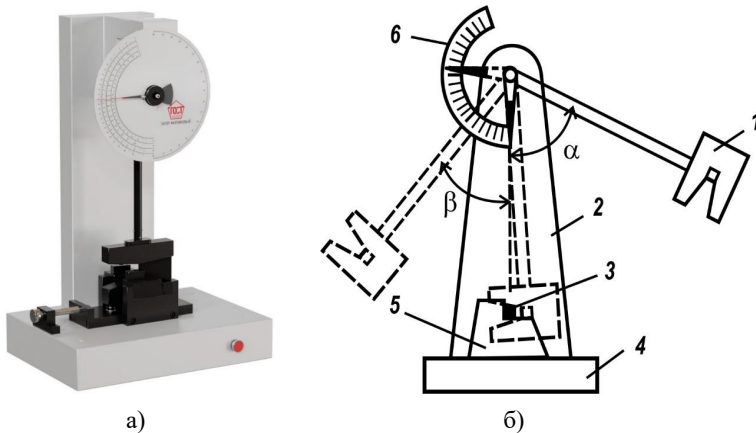


Рисунок 12. Маятниковый копер:

1 – маятник, 2 – станина, 3 – образец, 4 – основание, 5 – держатель образца, 6 – шкала

Перед испытанием маятник отклоняют на некоторый начальный угол от вертикального положения. Для конкретной модели прибора стандартом определены от одного до трех возможных значений начальных углов – в зависимости от величины наибольшего запаса потенциальной энергии копра. Образец размещают на опорах таким образом, чтобы удар маятника приходился по стороне образца, противоположной надрезу (рис. 13). Работу разрушения определяют по величине потери энергии маятника.

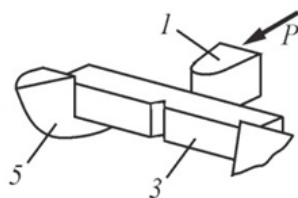


Рисунок 13. Схема проведения испытаний:
1 – боек маятника, 2 – опора, 3 – образец

Потенциальная энергия маятника зависит от его массогабаритных характеристик, а также от угла отклонения его от положения равновесия. Угол отклонения копра измеряют с помощью шкалы и/или электронного устройства. Зная начальный угол отклонения маятника до удара и угол максимального отклонения маятника после удара, можно рассчитать величину энергии, затраченную на разрушения образца. При работе на приборе производить вычисления нет необходимости, поскольку шкала проградуирована непосредственно в джоулях и сразу показывает работу удара по разрушению образца.

Ударная вязкость – сложная механическая характеристика, поскольку ее величина зависит как от прочности, так и от пластичности испытуемого материала.

Измерения усилия, оказываемого маятником на образец, и перемещения маятника, показывают, что для разных материалов вид диаграммы «нагрузка – перемещение» существенно различается (рис. 14). Площадь под кривой на такой диаграмме численно равна работе по разрушению образца.



Рисунок 14. Диаграммы «нагрузка – перемещение» при испытаниях на ударную вязкость для различных материалов

В обобщенном виде диаграмма нагрузка-смещение представлена на рис. 15. Установлено, что часть полной работы до т. В, соответствующей максимальному значению нагрузки, P_{max} , расходуется на деформацию образца до зарождения трещины, A_3 ; оставшаяся часть – на распространение трещины, A_p .

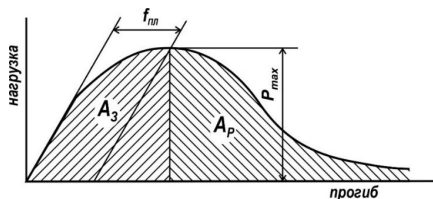


Рисунок 15. Определение характеристик ударного разрушения образца по диаграмме «нагрузка – прогиб»

Следует заметить, что при несхожей форме диаграмм для разных материалов на разрушение образца может быть затрачена приблизительно равная работа, например, как на рис. 16.

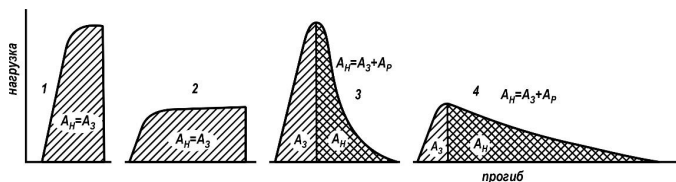


Рисунок 16. Различные формы диаграмм разрушения материалов в координатах нагрузка/прогиб

Очевидно, что величина работы, затраченной на предварительную упругую и пластическую деформацию образца и зарождение трещины, A_3 , в значительной степени зависит от геометрии концентратора.

Получение и анализ деформационных кривых требует сложного дорогостоящего оборудования и значительно усложняет испытания. Кроме того, во многих случаях величину работы по распространению трещины трудно точно оценить, поскольку трещина нередко распространяется за счет упругой энергии, накопленной в образце на предыдущем этапе нагружения.

В испытаниях материалов на статическое растяжение/сжатие скорость нагружения образцов мала, то есть находится в диапазоне, в котором результат испытаний практически от нее не зависит. В этом случае действует так называемый принцип подобия. Этот принцип предполагает, что если пропорционально изменять все размеры образцов, то полученные в результате значения характеристик материала не изменятся. Установлено, что принцип подобия неплохо соблюдается для поликристаллических металлических материалов, если поперечные размеры испытуемых образцов намного больше размеров зерна.

В динамических испытаниях работа разрушения зависит от скорости нагружения, то есть в конечном счете от параметров копра и его кинетической энергии в момент удара. Кроме того, работа, затрачиваемая на разрушение образца, непропорциональна площади его сечения, в основном из-за того, что при увеличении толщины образца, как правило, увеличивается и доля поверхности с хрупким

характером разрушения. Все это приводит к тому, что получаемый при испытаниях результат существенно зависит от условий испытания, а также от размеров и формы образца. Таким образом, здесь необходима жесткая унификация размеров образцов и условий проведения испытания, что отражено в принятых стандартах.

Испытания металлических материалов

Для динамических испытаний металлических материалов используют образцы прямоугольного или квадратного сечения с размерами из перечня, приведенного в ГОСТ 9454-78. Предпочтение отдается образцам с поперечными размерами 10×10 мм и длиной 55 мм. В средней части образца вырезают концентратор, который бывает трех видов: U, V и Т (рис. 17). Концентраторы вида U и V различаются геометрией надреза. Концентратор вида Т содержит в вершине трещину, которую создают на вибростенде. Чем больше кривизна вершины концентратора, тем выше напряжения вблизи неё, и, следовательно, для зарождения трещины нужна меньшая энергия. Из чего можно заключить, что наименьшая работа разрушения соответствует образцам вида Т, а наибольшая – для образцов вида U; величина работы по разрушению образцов вида V имеет промежуточное значение.

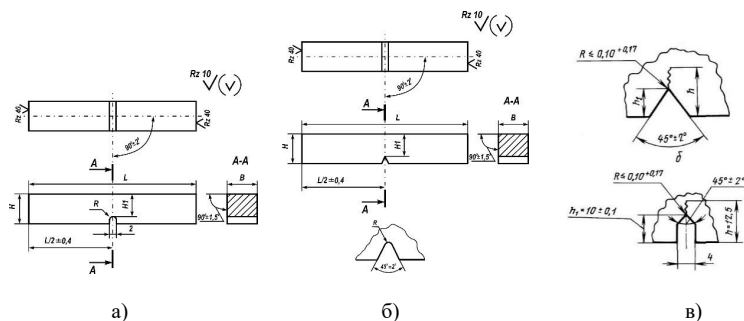


Рисунок 17. Образцы для испытаний на ударную вязкость:
а – тип U, б – тип V, в – концентратор образца типа Т

В специальной литературе встречается наименование образцов с концентратором вида U как «образцы Менаже», например, в ГОСТ 1524-42, а с концентратором вида V как «образцы Шарпи», причем нередки разночтения.

В настоящее время в России ударную вязкость определяют, как правило, на образцах с концентратором вида U. Образцы с концентраторами вида V используют гораздо реже – при определении свойств материалов для конструкций с повышенными требованиями к надежности. Образцы типа Т используют в особых случаях, поэтому ниже будет приведена информация, касающаяся в первую очередь испытаний по Шарпи.

Распространенность испытаний на образцах с U-образным концентратором обусловлена, в частности, простотой их изготовления. Еще одним существенным обстоятельством является тот факт, что большая часть имеющихся в русскоязычной

литературе справочных материалов содержит данные об ударной вязкости именно в показателях KCU (то есть для образцов с U-образным надрезом), в то время как уже давно наметилась тенденция к полному переходу на испытания в показателях KCV (для образцов с V-образным надрезом). Так, в стандартных методах испытаний Американского общества по испытаниям материалов (ASTM) предусмотрены ударные испытания только на образцах с V-образным надрезом. Ситуация осложняется также тем фактом, что универсального метода перевода значений KCU в KCV не существует. Тем не менее, некоторые российские ведомства приняли в качестве стандарта для механических испытаний именно ASTM A 370-05. Можно ожидать принятия в недалеком будущем нового ГОСТа в этой области.

Работу удара в динамических испытаниях металлов обозначают двумя буквами (KU, KV или KT) и цифрами. Первая буква (K) – символ работы удара, вторая – вид концентратора. Последующие цифры обозначают максимальную энергию удара маятника, глубину концентратора и ширину образца. Цифры не указывают при определении работы удара на копре с максимальной энергией удара маятника 300 Дж (т.е. 30,0 кгс·м), при глубине концентратора 2 мм для концентраторов видов U и V (эти параметры предпочтительны). Допускается обозначать работу удара двумя индексами (Ai): первый (A) – символ работы удара, второй (i) – символ типа образца по ГОСТ. Таким образом, основным образцом служит стержень с квадратным сечением 10×10 мм, длиной 55 мм и надрезом одного из трех видов, U, V или T.

Например:

KV^{-40} 50/2/2 – работа удара, определенная на образце с концентратором вида V при температуре минус 40 °С. Максимальная энергия удара маятника 50 Дж, глубина концентратора 2 мм, ширина образца 2 мм.

KCU (KCV) – ударная вязкость, определенная на образце с концентратором вида U (V) при комнатной температуре. Максимальная энергия удара маятника 300 Дж, глубина концентратора 2 мм, ширина образца 10 мм.

a_{11}^{-60} – ударная вязкость, определенная на образце типа 11 (ГОСТ 9454-78) при температуре минус 60°С. Максимальная энергия удара маятника 300 Дж.

Основная характеристика, получаемая в ударных испытаниях – ударная вязкость, KC – величина, равная отношению работы, затраченной на разрушение образца, к начальной площади поперечного сечения образца в месте надреза.

$$KC = \frac{K}{S_0},$$

где K – работа удара, Дж;

S_0 – площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания, см².

Хладноломкость металлов

Хладноломкость металлов – переход из пластического состояния в хрупкое при понижении температуры. Материалы с ОЦК и – некоторые с ГПУ – решетками считаются более склонными к хладноломкости; в металлах с ГЦК структурой и в большинстве с ГПУ структурой хладноломкость не наблюдается. Понижение температуры сопровождается снижением пластичности для большинства металлических материалов. В хладноломких же материалах падение ударной вязкости при их охлаждении происходит в сравнительно узком интервале температур (рис. 18). Падение ударной вязкости может достигать 80–90 % и более от величины таковой для исходного состояния.

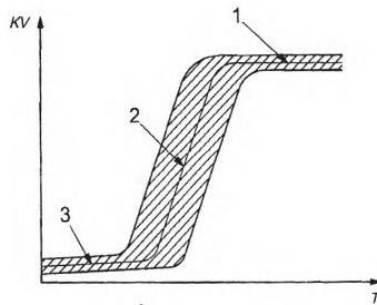


Рисунок 18. Кривая зависимости величины поглощенной энергии от температуры:
1 – верхний пологий участок, 2 – зона перехода, 3 – нижний пологий участок

Состояние хладноломкости характеризуется критической температурой вязко-хрупкого перехода (порог хладноломкости, T_c , $T_{ХЛ}$). В зависимости от характера разрушения вид изломов образцов может быть различным (рис. 19). На поверхности излома можно выделить вязкую и хрупкую составляющие (рис. 20).

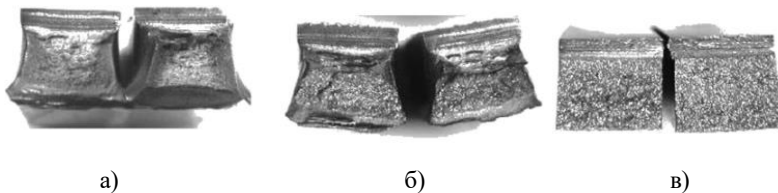


Рисунок 19. Вязкий (а), промежуточный (б) и хрупкий (в) изломы металла

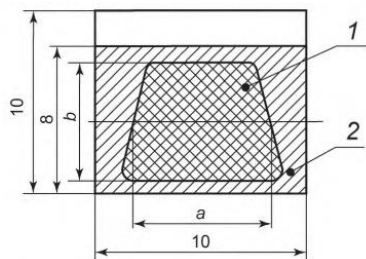


Рисунок 20. Схема ударного излома:

- 1 – площадь излома, занимаемая хрупкой составляющей;
2 – площадь, занимаемая вязкой составляющей

По соотношению доли вязкой составляющей на поверхности излома можно судить о характере разрушения. Чем выше доля вязкой составляющей, тем выше ударная вязкость (рис. 21).

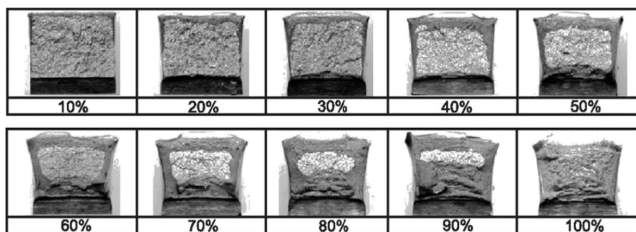


Рисунок 21. Фотографии изломов с различной долей вязкой составляющей

Температура вязко-хрупкого перехода хладноломкости, T_1 , характеризует положение крутого подъема характеристики зависимости поглощенной энергии от температуры. Как отмечено в ГОСТ Р ИСО 148-1-2013, поскольку крутой подъем обычно охватывает весьма широкий интервал температур, нельзя дать общепотребительного определения температуры перехода. Ниже приведены критерии, которые среди прочих могут оказаться полезными для определения температуры перехода.

Температура перехода T_1 – температура, при которой:

- а) получают конкретное значение поглощенной энергии, например, $KV8 = 27$ Дж;
- б) получают конкретное значение поглощенной энергии в процентах от значения, соответствующего верхней площадке, например 50 %;
- в) имеет место определенная часть вязкого излома, например 50%;
- г) получают определенное значение поперечного (бокового) расширения, например 0,9 мм.

Ввиду отсутствия определенных ГОСТами прямых указаний, порядок определения критической температуры хрупкости T_1 указывают в нормативной документации на конкретную металлопродукцию.

Испытания пластмасс на ударную вязкость

Испытания на ударную вязкость пластмассовых образцов производят по ГОСТ 4647-2015 (принят взамен ГОСТ 4647–80).

Ударную вязкость по Шарпи определяют для следующих материалов:

- жестких термопластов для литья и экструзии, включая наполненные и упрочненные композиции;
- жестких листов из термопластов и реактопластов;
- жестких формовочных реактопластов, включая наполненные и упрочненные композиции и слоистые пластики;
- термо- и реактопластов, упрочненных волокном, включая материалы с однонаправленными или разнонаправленными упрочняющими компонентами, такими как маты, ткани, стеклянные ткани из ровинга, рубленные комплексные нити с комбинированными и гибридными упрочняющими компонентами, ровинги и дробленые волокна);
- листов из предварительно пропитанных материалов (препреги), включая наполненные и упрочненные композиции;
- термотропных жидкокристаллических полимеров;
- ячеистых пластмасс.

Испытания образцов из пластмасс производят как на образцах с надрезом, так и на образцах без надреза. Размеры образцов указаны в Таблице 5.

Таблица 5

Тип образца	Длина l	Ширина b	Толщина h	Расстояние между опорами L
1	120 ± 2	$15,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,5$	70
2	80 ± 2	$10,0 \pm 0,5$	$4,0 \pm 0,2$	60
3	50 ± 1	$6,0 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$	40
Примечание: допускается использовать образец номинальной шириной 4 мм, толщиной 10 мм, длиной 80 мм при расстоянии между опорами 70 мм				

Размеры образцов указаны на рис. 22, размеры надрезов – в Таблице 6.

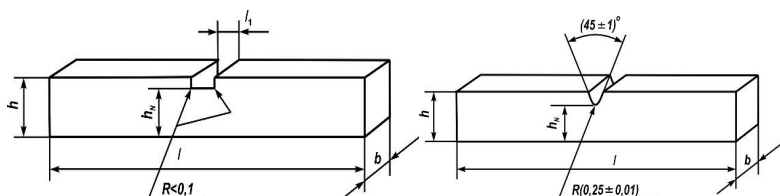


Рисунок 22. Надрезы типа А и типа В при испытании образцов из пластмассы

Таблица 6

Тип образца	Тип надреза	Толщина под надрезом h_N	Ширина надреза l_1
1	A	$6,7 \pm 0,3$	$2,0 \pm 0,2$
	B	$8,0 \pm 0,3$	–
2	A	$2,7 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,2$
	B	$3,2 \pm 0,2$	–
3	A	$2,7 \pm 0,3$	$0,8 \pm 0,1$
	B	$3,2 \pm 0,3$	–
Примечание: толщина образца под надрезом h_N должна составлять для надреза типа А 2/3 толщины образца, для надреза типа В – 0,8 толщины образца			

Тип образца и надреза указывают в нормативном документе или технической документации на материал. Если такое указание отсутствует, рекомендуется использовать образец типа 2, надрез типа В.

Образцы следует кондиционировать не менее 16 ч после изготовления при атмосфере 23/50 в соответствии с ГОСТ 12423, образцы с надрезом следует кондиционировать после нанесения надреза.

При испытаниях слоистых пластиков следует учитывать направление слоев относительно направления удара.

Выбирают маятник с соответствующим запасом энергии и такой скоростью, чтобы на разрушение образца было израсходовано не менее 10 % и не более 80 % запаса энергии маятника. Если этому требованию удовлетворяют характеристики нескольких маятников, выбирают маятник с наибольшим запасом энергии. Результаты, полученные на маятниках с разным запасом энергии, сопоставлять не рекомендуется.

Определяют потери энергии маятника на трение и корректируют величину поглощенной образцом энергии в соответствии с ГОСТ 10708.

Маятниковый копер КМ-0,5

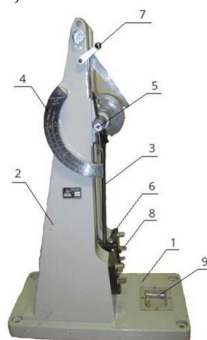


Рисунок 23. Маятниковый копер КМ-0,5:

1 – основание, 2 – стойки, 3 – маятник, 4 – шкала, 5 – ось маятника, 6 – молот, 7 – пусковое устройство, 8 – опоры

Маятниковый копер типа «КМ-0,5» предназначается для испытания материалов на ударную вязкость по ГОСТ 9454-78. Номинальное значение потенциальной энергии маятника с молотом №1 составляет 0,3 кгс·м (2,94 Дж).

Меры безопасности

1. Запрещается работать на копре лицам, не знакомым с правилами обслуживания и эксплуатации, изложенными в паспорте на данный копер.
2. Видами опасности при работе являются:
 - воздействие осколков при разрушении образца;
 - воздействие подвижных элементов падающего маятника.
3. Источниками видов опасности являются: маятник, осколки образца.
4. Не допускается во время испытания (в момент качания маятника) устанавливать или поправлять образец.

Порядок работы

1. При испытании оба конца образца опираются на две опоры 8 (рис. 23). Расстояние между опорами устанавливается в зависимости от условий испытаний. На копре КМ-0,5 в основном испытываются пластмассы или легкие материалы (сплавы). Возьмите образец для испытаний у преподавателя.
2. При установке опор копра необходимо следить за тем, чтобы зазор между опорами был симметричным относительно молота.
3. Измерьте ширину **b** и толщину **h** образца в месте надреза штангенциркулем (занесите в таблицу). Испытуемый образец помещают на опорах копра так, чтобы удар приходился на его широкую сторону. Образец должен плотно прилегать к опорам.
4. Обнулите шкалу прибора. Молот копра взводится на заданный угол (обычно $94^{\circ} \pm 2^{\circ}$ при работе в диапазоне энергий 2,5–25 кгс·см). Пусковое устройство обеспечивает свободное падение молота. После разрушения образца стрелка показывает потерю энергии, что соответствует работе затраченной на разрушение образца (работа удара **K**, Дж), по шкале копра. Занесите данные в таблицу.
5. Рассчитайте значение ударной вязкости по формуле:

$$KC = \frac{K}{S_0},$$

где **K** – работа удара [Дж], а **S₀** – площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания [см²].

6. Произведите несколько замеров потери энергии на маятниковом копре для нескольких образцов типа U, данные занесите в таблицу, определите среднее значение KCU (в системе СИ).
7. Изучите структуру излома, определите тип разрушения образца.

Материал образца	b, см	h, см	S ₀ = b*h, см ²	K, Дж	KCU, Дж/см ²	< KCU >, Дж/см ²

Контрольные вопросы

1. Что такое ударной вязкость? В каких единицах она измеряется?
2. Опишите устройство маятникового копра. Опишите метод определения величины ударной вязкости.
3. Назовите виды концентраторов напряжений в металлических образцах. Как они обозначаются?
4. Укажите, где на практике используется свойство металлов «ударная вязкость».
5. В каких случаях проводятся испытания на ударную вязкость?
6. Какие существуют методы определения работы удара?
7. Какие факторы влияют на величину ударной удельной вязкости?
8. О каких свойствах материала судят по величине ударной удельной вязкости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы:

1. Изучить теоретический материал по теме работы.
2. Получить представление об операциях термической обработки, применяемых для упрочнения и разупрочнения углеродистых сталей. Изучить взаимосвязь между содержанием углерода в стали, структурой и механическими свойствами стали после термической обработки.
3. Научиться выбирать режим термической обработки стали для получения необходимых в эксплуатации свойств.
4. Выполнить индивидуальное задание.

Термическая обработка – совокупность операций нагрева и охлаждения с целью изменить структуру и свойства сплава в нужном направлении.

Любую операцию термической обработки можно представить графически в виде кривой в координатах «температура – время», включающей участки нагрева, выдержки и охлаждения. Главные параметры, определяющие результат термической обработки: *температура нагрева t_n , время выдержки t_v и скорость охлаждения $v_{охл.}$* (рис. 24).

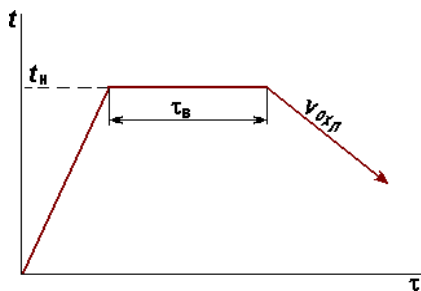


Рисунок 24. Графическое изображение режима термической обработки

Различают *упрочняющую* термическую обработку, при которой повышаются твёрдость, прочность и износостойкость, и *разупрочняющую* обработку, повышающую пластические свойства и вязкость и снижающую твёрдость, сопротивление деформации и разрушению.

Для стальных изделий широко применяются оба варианта термической обработки.

Термическая обработка стали основана на фазовых превращениях, происходящих при её нагреве выше критических температур и охлаждении с различными скоростями.

Благодаря разной растворимости углерода в железе с ОЦК и ГЦК решёткой, существует возможность значительного упрочнения стали в результате закалки. Получаемый при закалке пересыщенный твёрдый раствор углерода в α -железе можно подвергнуть отпуску для получения более равновесных структур. При этом в зависимости от режима отпуска можно получить широкий спектр механических характеристик стали, что обуславливает её применение для деталей и конструкций, работающих в разных условиях нагружения.

Превращения при нагреве стали

Температуры превращений, или критические точки, при нагреве стали принято обозначать согласно приведенной схеме (рис. 25).

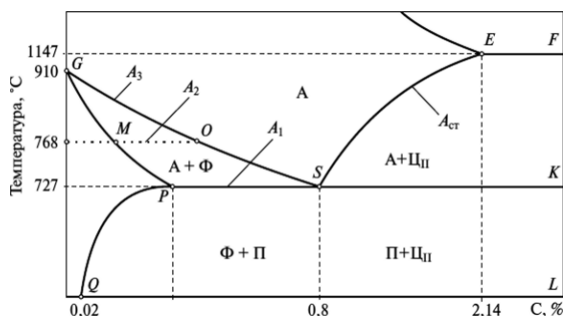


Рисунок 25. Критические точки при нагреве стали

1. Начало превращения феррита в аустенит ($\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\gamma$) – A_1 (эти точки расположены на линии PSK).
2. Завершение превращения феррита в аустенит ($\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\delta$) – A_3 (эти точки лежат на линии GS).
3. Окончание растворения цементита в аустените – A_{cm} (точки находятся на линии SE).

Точки A_2 относятся к магнитному, а не фазовому превращению. Следует обратить внимание на то, что точки A_3 и A_{cm} – свои для каждой стали, а точка A_1 – одна для всех углеродистых сталей: 727 °C. Основные виды термообработки стали – отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг

Отжиг является разупрочняющей термической обработкой.

Отжигом I рода называют нагрев стали с неравновесной в результате предшествующей обработки структурой до (или ниже) температуры фазового превращения. Обычно причиной появления неравновесной структуры является холодная обработка давлением или ускоренное охлаждение после горячей обработки. Температурный режим отжига I рода не связан с фазовыми превращениями в стали.

Цель: Перевести сталь в более устойчивое, равновесное состояние.

Пример: рекристаллизационный отжиг для снятия наклёпа; смягчающий отжиг для улучшения обрабатываемости резанием (его ещё называют низким).

Отжигом II рода называют нагрев стали выше температуры фазового превращения с последующим медленным охлаждением (вместе с печью).

Цель: Получить устойчивое, равновесное состояние (как на фазовой диаграмме).

Разновидности:

- 1) **Полный отжиг** доэвтектоидных (конструкционных) сталей выполняется с целью полной фазовой перекристаллизации.

При нагревании феррит и перлит доэвтектоидной стали превращаются в аустенит. Затем, при медленном охлаждении, распад аустенита происходит в верхней части С-образной диаграммы с образованием новых зёрен феррита и перлита. Таким образом, если структура была дефектная (крупные зёрна, зёрнаискажённой формы и т. п.), то при полном отжиге она исправляется, получается однородной и мелкозернистой. Сталь после отжига имеет хорошие пла-

2) *Неполный отжиг* заэвтектоидных (инструментальных) сталей выполняется с целью получения структуры зернистого перлита. Для этого сталь нагревают на 30–50° выше критической точки A_{c1} (т. е. линии PSK). Применяют несколько различных режимов (рис. 27).

46

При неполном отжиге доэвтектоидной стали ферритная составляющая структуры не изменяется, так как феррит сохраняется при нагреве. Поэтому полного исправления структуры не происходит.

3) *Диффузионный отжиг* стальных отливок и поковок выполняют с целью устранения неоднородности литой или деформированной структуры. Устранение микроликвации достигается за счет диффузионных процессов. Поэтому, чтобы обеспечить высокую скорость диффузии, сталь нагревают до высоких температур в аустенитной области (близких к солидусу). Для сталей это чаще всего температуры 1000–1200 °С. При этих температурах делается длительная выдержка (8–15 ч) и затем медленное охлаждение. Выравнивание состава стали улучшает механические свойства, особенно пластичность.

Нормализация

Нормализация является разновидностью отжига II рода с ускоренным охлаждением. Нормализация заключается в нагреве стали до температур на 50–70° выше линии *GSE* (рис. 28) и в охлаждении на воздухе после небольшой выдержки. В этом случае распад аустенита происходит в верхней части С-образной диаграммы, но при несколько меньших температурах, чем при отжиге. Это связано с более быстрым охлаждением.

В результате при нормализации получается более мелкая перлитная структура, чем при полном отжиге. Может даже образоваться сорбит – более мелкая, чем перлит, феррито-цементитная смесь. Для доэвтектоидных сталей нормализация часто заменяет полный отжиг как более производительная и экономичная операция.

После нормализации сталь твёрже и прочнее, чем после полного отжига. Микроструктура тоже отличается от равновесной: феррит образует сетку вокруг участков перлита.

Закалка

Закалка – это упрочняющая термическая обработка, которая таким образом изменяет структуру стали, чтобы максимально повысить твёрдость и прочность. Закалка заключается в нагреве стали выше температуры фазового превращения с последующим достаточно быстрым охлаждением (со скоростью больше критической).

Цель: получение неравновесной структуры – пересыщенного твёрдого раствора углерода в α -железе – мартенсита. Практическая цель – получение максимальной твёрдости, возможной для данной марки стали.

Быстрое охлаждение при закалке необходимо, чтобы углерод не успел выделиться из твёрдого раствора – аустенита – и остался в решётке железа после охлаждения.

Чтобы закалить сталь, необходимо правильно выбрать температуру нагрева и скорость охлаждения. Эти два параметра являются определяющими при проведении закалки.

При выборе температуры нагрева действует следующее правило: дозвектоидные стали нагреваются под закалку на $30\text{--}50^\circ$ выше критической точки A_3 , а заэвтектоидные – на $30\text{--}50^\circ$ выше точки A_1 (рис. 29). Небольшое превышение критической точки необходимо, так как в печах для термообработки неизбежны некоторые колебания температуры относительно заданного значения.

В структуре доэвтектоидных сталей ниже линии GS присутствует феррит. Если закалить сталь из этой температурной области, то аустенит превратится в твердый и прочный мартенсит, а феррит не изменится, так как он является равновесной фазой. Поскольку феррит очень мягкий, то его присутствие в закаленной стали снижает ее твердость. Цель закалки не будет достигнута. Поэтому необходим нагрев до более высоких температур (выше линии GS), где феррит уже отсутствует.

Закалка из однофазной (аустенитной) области, с температур выше A_{c3} , называется *полной*. Так закаливают доэвтектоидные (конструкционные) стали.

Для заэвтектонидных сталей такой высокий нагрев не требуется, так как выше точки A_1 , но ниже линии SE структура состоит из аустенита и цементита. При закалке из этой области аустенит превратится в мартенсит, а цементит сохранится, так как он является равновесной фазой. Наличие в закалённой стали такой твёрдой структурной составляющей полезно, потому что мелкие частицы цементита являются дополнительными препятствиями для движения дислокаций, повышают твёрдость и износостойкость.

Критическая скорость охлаждения при закалке углеродистых сталей составляет не менее 400 °C/сек. Такая скорость достигается при охлаждении в воде или водных растворах солей (NaCl) и щелочей (NaOH), увеличивающих охлаждающую способность воды. При этом деталь необходимо энергично перемещать в закалочной жидкости, чтобы удалять с поверхности металла образующийся пар, который замедляет охлаждение. Критическая скорость охлаждения легированных сталей значительно ниже, поэтому применяют более мягкие закалочные среды – минеральные масла или растворы полимеров.

Закалка является наиболее «жесткой» из всех операций термообработки, так как сталь испытывает резкое снижение температуры. При этом в деталях возникают большие внутренние напряжения. Они складываются из термических напряжений, возникающих из-за разности температур на поверхности и в сердцевине детали при быстром охлаждении, и структурных напряжений, образующихся за счет объёмных изменений при мартенситном превращении.

Эти напряжения могут привести к деформации детали и даже образованию трещин. Особенно это опасно в отношении деталей сложной формы, имеющих концентраторы напряжений в виде проточек, отверстий, углов, галтелей и т. п. Для уменьшения закалочных напряжений нужно уменьшить перепад температур в ходе охлаждения при закалке.

По способу охлаждения различают:

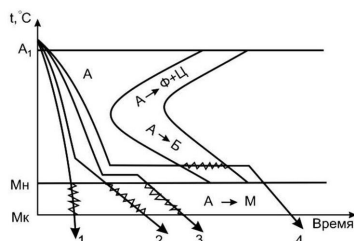
1) *Непрерывную закалку (закалку в одной среде)* – (рис. 30, кривая 1). Это наиболее простой способ, но при этом в детали появляются большие внутренние напряжения.

2) *Закалку в двух средах, или прерывистую закалку* (рис. 30, кривая 2). При этом способе сталь быстро охлаждается в интервале температур 750–400 °С, а затем деталь переносится в другую, более мягкую, охлаждающую среду, и в мартенситном интервале охлаждение происходит замедленно. Это приводит к уменьшению внутренних напряжений и снижает вероятность появления трещин. Примером такой закалки может быть процесс с охлаждением вначале в воде, а затем в масле.

3) *Ступенчатую закалку* (рис. 30, кривая 3), при которой нагретую деталь погружают в жидкую среду с температурой на 20–30° выше точки M_n . При этом обеспечивается быстрое охлаждение стали в верхней области температур, а затем делается выдержка, во время которой температура по сечению детали выравнивается и термические напряжения уменьшаются. Затем детали вынимаются из закалочной ванны и дальнейшее охлаждение происходит в другой среде, чаще всего на воздухе или в масле. В этом случае мартенситное превращение происходит при медленном охлаждении, в условиях меньших внутренних напряжений. В качестве жидких сред для ступенчатой закалки используют расплавы щелочей, селитры, легкоплавких металлов.

4) *Изотермическую закалку* (рис. 30, кривая 4). Она существенно отличается от других способов. Здесь выдержка в охлаждающей среде при температуре бейнитного превращения продолжается до полного распада аустенита. Во всех предыдущих случаях при закалке происходит образование мартенситной структуры, а в этом случае – бейнита.

При изотермической закалке напряжения в детали минимальны, исключается образование трещин, деформации значительно меньше. У некоторых легированных сталей (пружинных, штамповых) этот способ закалки позволяет получить оптимальное сочетание прочности и пластичности.



Способы охлаждения при закалке сталей:

- 1 – непрерывная закалка;
- 2 – закалка в двух средах;
- 3 – ступенчатая закалка;
- 4 – изотермическая закалка;

Рисунок 30. Разновидности закалки по способу охлаждения

Итак, ступенчатая и прерывистая закалка уменьшают закалочные напряжения, поскольку разница температур на поверхности и в центре детали уменьшается, но из-за очень маленького периода существования переохлажденного аустенита в углеродистых сталях ступенчатую и изотермическую закалку чаще применяют для легированных сталей.

Возможные **дефекты закалки**:

- а) *перегрев* – крупное зерно;
- б) *пережог* – окисление границ зёрен, очень крупное зерно;
- в) *недогрев* – у доэвтектоидных сталей закалка из интервала $A_{c1}-A_{c3}$ приводит к двухфазной структуре (мартенсит + феррит) и низким механическим свойствам;
- г) *коробление и трещины* – вызываются внутренними напряжениями. Удельный объем мартенсита больше удельного объема аустенита, что вызывает напряжения в структуре стали. Особенно это опасно для деталей сложной формы и при сложении структурных напряжений с термическими, возникшими из-за разности температур на поверхности и в центре детали.

Чтобы избежать коробления, тонкие изделия – пилы, ножовочные полотна, бритвы – охлаждают заневоленными в специальных закалочных прессах.

С технологией закалки тесно связаны два важных понятия.

Закаливаемость – это способность стали получать высокую твёрдость при закалке. Закаливаемость зависит от содержания углерода в стали и характеризуется максимальной возможной твёрдостью (HRC) для данной марки.

Прокаливаемость – это способность стали получать закалённый слой определенной глубины. Скорость охлаждения уменьшается от поверхности детали к центру, поэтому при большой толщине детали может оказаться, что в её сердцевине скорость охлаждения меньше критической (рис. 31). В этом случае на мартенсит закалится только поверхностный слой детали, а сердцевина будет незакалённой, с мягкой феррито-перлитной структурой.

Для характеристики прокаливаемости стали в справочниках приводят величину критического диаметра. *Критический диаметр* – это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в конкретной охлаждающей среде.

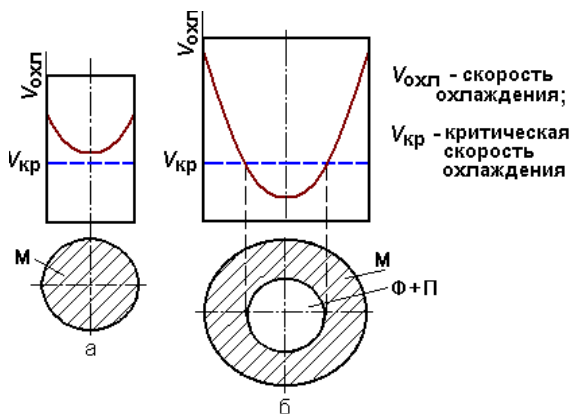


Рисунок 31. Изменение скорости охлаждения по сечению деталей:
 а – малого диаметра; б – большого диаметра

Чем больше прокаливаемость стали, тем лучше. Углеродистая сталь при охлаждении в воде имеет критический диаметр всего 10–15 мм. Прокаливаемость стали зависит от содержания легирующих элементов, которые затрудняют диффузионный распад аустенита, уменьшая тем самым критическую скорость охлаждения при закалке. Чем больше легирующих элементов в стали, тем выше её прокаливаемость.

Отпуск

Закалённая сталь очень твёрдая, но она хрупкая, у неё низкая пластичность и большие внутренние напряжения. В таком состоянии изделие неработоспособно, ненадежно в эксплуатации. Поэтому для уменьшения внутренних напряжений и повышения пластичности после закалки всегда следует еще одна операция термической обработки, которая называется отпуск.

Отпуск – это нагрев закаленной стали до температур ниже критических с последующим охлаждением, обычно на воздухе.

Цель отпуска – создание требуемого комплекса эксплуатационных свойств стали, получение более устойчивой, чем после закалки, структуры, уменьшение внутренних напряжений.

Отпуск – последняя операция в технологической цепочке термообработки стали, поэтому полученная при отпуске структура должна обеспечивать свойства, необходимые при работе детали.

В процессе отпуска происходит распад мартенсита за счет выделения из него углерода, тем более полный, чем больше температура и время выдержки. Поэтому уменьшаются внутренние напряжения и плотность дислокаций. Остаточный аустенит при отпуске превращается в мартенсит.

По температуре нагрева отпуск подразделяется на 3 вида: низкий, средний и высокий.

При *низкотемпературном* (или *низком*) *отпуске* (150–200 °С) из мартенсита выделяется часть избыточного углерода с образованием мельчайших карбидных частиц. При этом поскольку скорость диффузии здесь еще мала, некоторая часть углерода в мартенсите остается.

Такая структура представляет собой малоуглеродистый мартенсит и очень мелкие карбидные частицы. Ее называют *отпущенный мартенсит*.

В результате низкого отпуска уменьшаются внутренние напряжения, немного увеличивается вязкость и пластичность, твердость почти не снижается. Детали могут работать в условиях, где необходима высокая твердость и износостойкость.

Низкий отпуск применяют для режущего и мерительного инструмента, деталей подшипников качения.

Среднетемпературный (или *средний*) *отпуск* проводится при более высоких температурах – 300–450 °С. При этом из мартенсита уже выделяется весь избыточный углерод с образованием цементитных частиц. Тетрагональные искажения кристаллической решетки железа снимаются, она становится кубической. Мартенсит превращается в феррито-цементитную смесь с очень мелкими, в виде иголок, частицами цементита, которая называется *трооститом отпуска*.

Средний отпуск еще уменьшает внутренние напряжения, увеличивает вязкость, при этом прочность остается высокой, а предел текучести и предел выносливости достигают максимума. Такому отпуску подвергают рессоры, пружины и другие упругие элементы, а также штамповый инструмент.

В интервале 500–650 °С скорость диффузионных процессов уже настолько возрастает, что при распаде мартенсита образуется феррито-цементитная смесь с более крупными, сферической формы, зернами цементита. Такой отпуск называется *высокотемпературным* (или *высоким*); получаемая структура – *сорбит отпуска*.

В результате высокого отпуска сильно возрастают вязкость и пластичность стали, внутренние напряжения снимаются почти полностью, твердость и прочность снижаются, но все же остаются достаточно высокими. Закалка с высоким отпуском называется *термическим улучшением* стали. Такой обработке подвергают детали машин, работающие в условиях знакопеременных и ударных нагрузок: валы, рычаги, шестерни и др. Время выдержки при низком отпуске составляет от 1 до 10–15 часов, так как при таких низких температурах диффузия углерода идет медленно. Для среднего и высокого отпуска обычно достаточно 1–2 часа. Изменение механических характеристик углеродистой стали 45 при отпуске показано в табл. 7.

Таблица 7

Влияние термической обработки на механические свойства стали с 0,45 % C

Термическая обработка	σ_b	$\sigma_{0,2}$	d	ψ	KCU , МДж/м²	HV
	МПа		%			
Отжиг	650	450	20	65	0,6	187
Нормализация	730	470	21	60	0,8	198
Закалка и отпуск при 500 °С	970	850	8	55	1,0	280
Закалка и отпуск при 550 °С	950	800	10	60	1,1	269
Закалка и отпуск при 600 °С	870	700	13	65	1,3	255

Итак, с повышением температуры и продолжительности отпуска увеличиваются пластические свойства стали, но снижаются ее твёрдость и прочность. В практике термической обработки стали режим отпуска назначают в соответствии с требуемыми свойствами, которые определяются условиями работы детали.

Поверхностное упрочнение

Для некоторых деталей при эксплуатации необходима высокая твёрдость и износостойкость поверхности в сочетании с хорошей вязкостью в сердцевине. Это касается деталей, работающих в условиях износа с одновременным действием динамических нагрузок (например, шестерни, пальцы, скрепляющие звенья трака гусеничных машин).

В таких случаях подвергают упрочнению не всю деталь, а только тонкий (несколько мм) поверхностный слой.

Поверхностная закалка – это нагрев до закалочных температур только поверхностного слоя детали с последующим быстрым охлаждением и образованием мартенситной структуры только в этом слое.

Осуществляют такую закалку быстрым нагревом поверхности, при котором сердцевина не успевает прогреваться за счет теплопроводности. При таком нагреве температура по сечению детали резко падает от поверхности к центру.

После охлаждения в сечении детали получаются три характерных зоны с разной структурой и свойствами (рис. 32).

В зоне I после закалки получается мартенситная структура с максимальной твёрдостью, так как эта зона нагревалась выше критической температуры A_{c3} .

В зоне II после закалки в структуре, кроме мартенсита, будет присутствовать и феррит. Следовательно, твёрдость там будет ниже.

В зоне III нагрев и охлаждение не приводят к каким-либо изменениям структуры. Значит, здесь сохраняется исходная феррито-перлитная структура с низкой твёрдостью, но высокими пластическими свойствами.

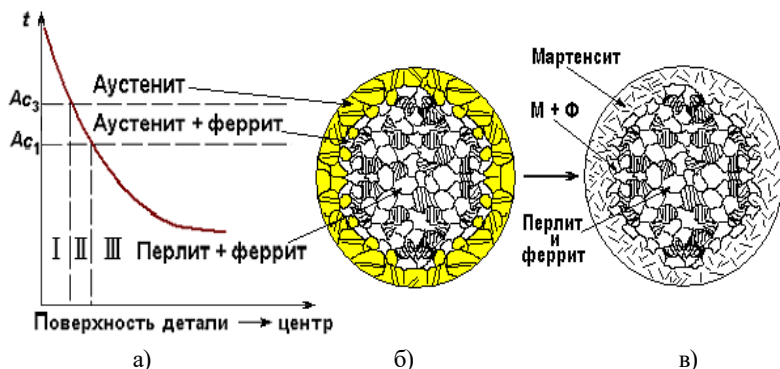


Рисунок 32. Поверхностная закалка стали:
 а – распределение температур по сечению,
 б – структура при поверхностном нагреве, в – структура после закалки

После поверхностной закалки деталь может сопротивляться динамическим нагрузкам за счет вязкой сердцевины и хорошо работать в условиях износа благодаря твёрдой поверхности.

Быстрый нагрев поверхности, необходимый при такой технологии, осуществляется чаще всего индукционным способом (*закалка токами высокой частоты – ТВЧ*). Деталь помещается в индуктор, подключённый к генератору тока высокой частоты. Переменное магнитное поле высокой частоты наводит в тонком поверхностном слое металла вихревые токи, и нагрев осуществляется за счет сопротивления металла протеканию этих токов. Немедленно после нагрева, который длится секунды, деталь помещают в спрейер (водяное распыление) для охлаждения.

Поверхностная закалка должна сопровождаться низким отпуском.

Чем выше частота внешнего переменного магнитного поля, тем тоньше слой, в котором сосредоточены вихревые токи. Поэтому глубина закалённого слоя может легко регулироваться и составляет от десятых долей миллиметра до 3–5 мм. Операцию закалки ТВЧ можно полностью автоматизировать. Способ очень производительный: коробление и окисление поверхности детали при этом минимально.

Иногда для поверхностной закалки используют и другие способы нагрева: газопламенный, лазерный, в расплавах солей, в электролитах. Для такого способа термообработки специально созданы стали пониженной прокаливаемости, например, 55ПП (0,55 % С и не более 0,5 % примесей).

Порядок работы

1. Получите у преподавателя металлический образец доэвтектоидной и/или эвтектоидной (реже заэвтектоидной) стали (на выбор сталь 10, сталь 45, сталь У8А).

2. Постройте термограмму процесса согласно выбранного металлического образца и предложенной преподавателем термической обработки (закалка, отжиг, нормализация и т. п.).

3. Ознакомьтесь с термограммой процесса термообработки образцов. Определите критические температуры для выбранных марок сталей. Сделайте предположение, какие температуры термообработки наиболее предпочтительны для полученных образцов. Ответ обсудите с преподавателем на этапе сдачи допуска к выполнению работы.

4. Ознакомьтесь с руководством пользователя печи «Накал ПЛ 5/12.5» до начала работ с нагревательным оборудованием.

5. Подготовьте рабочее место, включите вытяжку и включите печь марки «Накал ПЛ 5/12.5» в режим нагрева, предварительно выбрав нужный режим термической обработки. Печь работает в режимах контролируемого нагрева, выдержки и охлаждения.

6. Печь оснащена ПИД-регулятором температуры, контроль которой осуществляется платиновой термопарой установленной внутри камеры печи. Настройте ПИД регулятор по руководству пользователя. Для этого установите значение температуры, на которую должна выйти печь перед началом термообработки. Обычно время нагрева до установленной температуры составляет не более 20–30 минут.

7. Как только на регуляторе температуры будет соответствующий показатель, соответствующий температуре термообработки, что печь достигла необходимой максимальной температуры, поместите в печь образец стали. Используйте специальные щипцы для образцов и термоустойчивые перчатки, соблюдайте технику безопасности. После этого проведите термообработку образца согласно выбранной термограммы процесса и критических температур.

8. Проведя нагрев образца до пиковой температуры и выдержку при пиковой температуре, охладите образец соответствующим образом (согласно выбранному режиму термической обработки и термограммы процесса). Охлаждение с печью осуществляется выключением режима нагрева печи (отжиг). После выключения режима нагрева охлаждение с печью занимает приблизительно от 30 минут до 1,5 часов. Если подразумевается закалка, то необходимо заранее подготовить закалочные ванны (вода или масло), закалку проводят согласно выбранному режиму ТО и термограммы процесса.

9. После охлаждения до температуры ниже линии PSK выньте образец на воздух и поместите на керамический материал или лист асбеста (отпуск и нормализация), дождитесь полного охлаждения до комнатной температуры.

10. После цикла термической обработки для изучения внутренних изменений вследствие превращений необходимо провести металлографическое исследование и определить твердость HRC.

11. В отчет включите данные с термограммой ТО, включая все использованные температуры и времена выдержки, и описание полученной микроструктуры. По ходу лабораторной работы необходимо вносить данные в табл. 8.

Таблица 8

Марка стали	Размер образца	Твердость до ТО	Закалка/Отжиг			Твердость после ТО	Отпуск/Нормализация			Структура
			Температура нагрева, °С	Время выдержки, мин	Охлаждающая среда		Температура нагрева, °С	Время выдержки, мин	Охлаждающая среда	

Контрольные вопросы

1. Состав и маркировка конструкционных и инструментальных сталей.
2. Микроструктура эвтектоидной стали, особенности структуры.
3. От чего зависят механические, физические и химические свойства стали?
4. Чего можно достичь термической обработкой сталей?
5. Виды термообработки для сталей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛИТЕЙНОГО ЧУГУНА НА ЕГО СТРУКТУРУ

Цель работы: провести смягчение чугуна путем обычного и изотермического отжига и нормализации, а также изучить влияние закалки и последующего отпуска на структуру и свойства литейного чугуна.

В машиностроении в большом количестве применяют литейный чугун различных марок. За последние годы в практике находит все более широкое применение легированный литейный чугун. Путем легирования чугуна хромом, никелем, марганцем и другими элементами можно до минимума снизить склонность его к росту графитовых включений, значительно улучшить механические свойства и получить чугун с особыми физическими свойствами, например, кислотоупорный, немагнитный и др.

Ниже, согласно ГОСТам, приводится описание основных чугунов, применяемых в машиностроении.

Серый чугун можно рассматривать как структуру, которая состоит из металлической основы с графитными включениями. Свойства чугуна зависят от свойств металлической основы и характера графитных включений. Металлическая основа может быть: *перлитной*, когда 0,8 % C находится в виде цементита, а остальной углерод в виде графита; *феррито-перлитной*, когда количество углерода в виде цементита менее 0,8 % C; *ферритной*, когда углерод находится практически в виде графита. В зависимости от формы графитных включений серые чугуны классифицируются на:

- чугун с пластинчатым графитом;
- чугун с хлопьевидным графитом (ковкий чугун);
- чугун с шаровидным графитом (высокопрочный чугун);
- чугун с вермикулярным графитом.

На рисунке 33 дана обобщенная классификация чугунов по строению металлической основы и форме графитовых включений.

Металлическая основа	Форма графитовых включений			
	Пластинчатая	Хлопьевидная	Шаровидная	Вермикулярная
Феррит				
Феррит + перлит				
Перлит				

Рисунок 33. Классификация чугунов по строению металлической основы и форме графитовых включений

Серый чугун маркируют буквами СЧ (серый чугун) и цифрами, показывающими минимальное значение предела прочности σ_b чугуна. Мерой качества чугуна считают показатели его прочности.

К чугунам небольшой прочности, обыкновенного качества относятся серые чугуны СЧ00, СЧ10, СЧ15 и СЧ20. Чугун СЧ00 испытанию на механические свойства не подвергают.

Примерный химический состав чугуна: 3,2–3,6 % С; 1,7–3,0 % Si; не более 0,5 % Mn; не более 0,5 % P; не более 0,12% S. Микроструктура: феррит+перлит+графит.

Из чугуна этой группы изготавливают детали, испытывающие небольшие нагрузки, и те детали, от которых не требуются высокие механические свойства.

Вследствие высокого содержания углерода и особенно кремния в чугунах небольшой прочности содержится незначительное количество связанного углерода. Графит имеет невыгодную для механических свойств форму выделений: крупные длинные пластины (рис. 34), сильно ослабляющие прочность металлической основы чугуна. С увеличением толщины отливок увеличивается размер графитовых пластинок, уменьшается обособленность графита, что в еще большей степени снижает механические свойства чугуна.



Рисунок 34. Структура чугуна с пластинчатым графитом

Отливки из чугуна СЧ00, СЧ10, СЧ15 и СЧ20 термической обработке не подвергают.

Улучшить структуру и свойства такого чугуна путем термической обработки не удастся. Наоборот, после закалки и отпуска отливок с грубыми выделениями графита может возрасти хрупкость чугуна вследствие появления микротрещин по границам графитовых включений. Небольшое изменение механических свойств чугуна этой группы после закалки и отпуска объясняется малым содержанием связанного углерода.

Отливки из указанных чугунов подвергают только отпуску для снятия напряжений.

СЧ25, СЧ30, СЧ35 – чугуны повышенной прочности. Их применяют для отливок более ответственного назначения (станины мощных станков, поршни, цилиндры и др.).

Примерный химический состав чугуна этой группы: 2,8–3,0 % С; 1,5–1,7 % Si; 0,8–1,0 % Mn; не более 0,3 % Р; не более 0,12 % S. Микроструктура: перлит+феррит+графит (рис. 35).



Рисунок 35. Структура серого чугуна повышенной прочности перлит+феррит+графит

Чугун повышенной прочности имеет перлитную основу. Количество связанного углерода может достигать до 0,8%. Графита значительно меньше, чем в чугуне первой группы, а форма выделения лучше. Отливки из такого чугуна можно успешно подвергать термической обработке.

Высокую прочность обеспечивают модифицированные чугуны ВЧ-28-48, ВЧ32-52, ВЧ35-56, ВЧ38-60.

Из них изготавливают детали, работающие на износ: шестерни, шпиндели, тормозные барабаны, цилиндры паровых машин и т. д.

Примерный химический состав этой группы: 2,9–3,2 % С; 1,0–1,5 % Si; 0,8–1,2 % Mn; не более 0,3 % Р; не более 0,12 % S. Особо высокие механические свойства достигаются при модифицировании чугуна магнием – в этом случае графит имеет шаровидную форму (рис. 36).

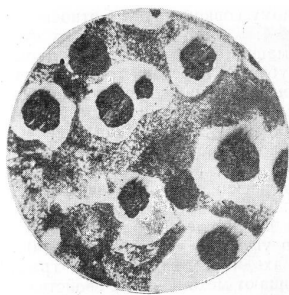


Рисунок 36. Структура модифицированного магнием чугуна марки ВЧ32-52 с шаровидным графитом

Высокую прочность обеспечивают модифицированные чугуны МСЧ28-48, МСЧ32-52, МСЧ35-56, МСЧ38-60.

Закалка и отпуск отливок из модифицированного чугуна позволяют получить механические свойства, немногим уступающие свойствам углеродистой стали. Кроме высокого предела прочности [$600\text{--}700 \text{ МН/м}^2$ ($60\text{--}70 \text{ кГ/мм}^2$)], такой чугун может иметь относительное удлинение до 3% и ударную вязкость до $0,5 \text{ Мдж/м}^2$ (5 кг/см^2).

В некоторых случаях применяют чугун с отбеленной поверхностью, обладающий высокой твердостью.

Примерный химический состав его: 2,5 % С; до 0,5 % Si; до 0,7 % Mn; не более 0,5 % P; не более 0,1 % S. Микроструктура чугуна на поверхности: перлит+цементит; в сердцевине: перлит+графит. Глубина отбеленного слоя обычно не превышает 25 мм.

Чугун с отбеленной поверхностью применяют для прокатных валков, трущихся частей мельничного оборудования и пр.

В промышленности большое значение получили ковкие чугуны. Основной особенностью микроструктуры ковкого чугуна, определяющей его свойства, является наличие компактных включений графита – «углерода отжига». Благодаря этому ковкий чугун имеет высокую прочность и пластичность. Различают перлитный и ферритный ковкие чугуны. В марке ковкого чугуна помимо букв КЧ (ковкий чугун) указывают две цифры: первая обозначает минимально допустимое значение предела прочности σ_b , вторая – минимально допустимое значение относительного удлинения δ .

К перлитному ковкому чугуну относят чугуны марок: КЧ40-3; КЧ45-4; КЧ30-3 и др. Из этих чугунов изготавливают детали машин, работающие при ударных нагрузках (например, зубчатая передача велосипедов и др.). Примерный химический состав чугуна: 2,8–3,4 % С; 0,5–0,8 % Si; до 0,4 % Mn; не более 0,2 % P; не более 0,12 % S.

Перлитный ковкий чугун получают путем длительного окислительного отжига отливок из белого чугуна. После отжига чугун имеет перлитную основу (количество связанного углерода составляет 0,6–0,8 %). Остальной углерод находится в виде хлопьев графита. Закалка и отпуск улучшают механические свойства отливок.

К ферритному ковкому чугуну относят чугуны марок: КЧ37-12; КЧ35-10; КЧ33-8; КЧ30-6. Эти чугуны применяют для деталей сельскохозяйственных машин и прядильных ткацких станков, предметов широкого потребления и т. д.

Примерный химический состав этих чугунов: 1,7–2,7 % С; 1,4–1,6 % Si; не более 0,4 % Mn; не более 0,2 % P; не более 0,12 % S.

Ферритный ковкий чугун получают путем графитизирующего отжига отливок из белого чугуна. После отжига структура отливок состоит из феррита и графита. Графит имеет вид хлопьев (рис. 37). Основное отличие структуры серого литейного чугуна от структуры стали заключается в том, что в чугуне имеется большое количество структурно свободного углерода в виде графита. Наличие в структуре графита в основном обуславливает различие в свойствах чугуна и стали, которое в первую очередь проявляется в почти полном отсутствии пластичности и вязкости и в значительно меньшей прочности чугуна по сравнению со сталью.

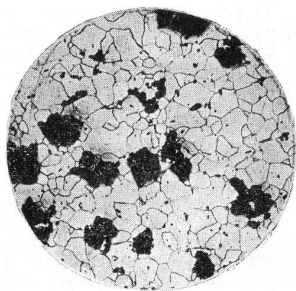


Рисунок 37. Структура чугуна после отжига отливки, состоящая из феррита и хлопьевидного графита

Механические, физические и химические свойства чугуна зависят от:

- 1) химического состава чугуна;
- 2) количества, формы, величины и распределения графитовых включений;
- 3) структуры металлической основы.

В свою очередь количество связанного (Fe_3C) и свободного углерода в виде графита зависит от химического состава и скорости охлаждения отливок (толщины стенок отливок). Форма и распределение графита в металлической массе чугуна зависит от условий выплавки и обработки чугуна в жидком состоянии. Наилучшие механические свойства чугуна достигаются при округлой, сфероидальной форме графита, при достаточной степени его измельчения и при сохранении в структуре 0,5–0,8 % связанного углерода (модифицированный чугун). Низкие механические свойства чугуна получаются в тех случаях, когда почти весь углерод находится в виде графита и он имеет форму крупных, длинных пластин с острыми краями.

С помощью термической обработки при получении ковкого чугуна можно изменять структуру металлической основы, количество и характер графитовых включений. При отжиге связанный углерод в белом чугуне или полностью графитизируется и переходит в углерод отжига ферритный ковкий чугун, или частично окисляется, частично графитизируется и остается в перлите (перлитный ковкий чугун).

Значительная графитизация углерода может происходить при отжиге отбеленных чугуновых отливок.

Во всех других случаях при термической обработке обычно не удается изменить ни форму, ни количество графита. Задача термической обработки в этих случаях сводится лишь к снятию напряжений в отливках и к получению структуры феррита, сорбита, троостита, мартенсита или аустенита в зависимости от требуемых свойств и назначения чугуна.

Таким образом, термической обработкой чугуна можно достичь следующего:

- 1) устранить напряжения в отливках с целью предохранения их от коробления и растрескивания;
- 2) устранить отбеленную корку в отливках с целью смягчения и более легкой обрабатываемости их на станках;

3) изменить структуру металлической основы чугуна для смягчения и лучшей обрабатываемости отливок;

4) изменить структуру металлической основы чугуна с целью получения требуемых механических и физических свойств чугуна;

5) получить ковкий чугун путем полной или частичной графитизации и окисления углерода в белом чугуне.

Для осуществления этого чугуны подвергают различным видам отжига, нормализации, высокому отпуску, закалке и отпуску:

1. Закалка. Целью закалки является получение мартенситной структуры металлической основы и, соответственно, высокой твердости и износостойкости. Температура нагрева под закалку на 50–70 °С превышает точку A_1 . Во избежание деформации деталей после закалки применяют стабилизирующий отпуск при 180–200 °С.

2. Улучшение состоит в закалке с последующим отпуском, температура которого выбирается в зависимости от требований, предъявляемых к структуре (троостинная, сорбитная или перлитная структура основы) и твердости чугуна.

3. Нормализация применяется для получения перлитной металлической основы и повышения механических свойств и износостойкости чугуна с исходной перлитно-ферритной структурой. Нормализация заключается в аустенизации чугуна с последующим охлаждением отливок на воздухе.

4. Высокотемпературный отжиг применяют для снижения твердости отбеленного чугуна. Отжиг проводят при тех же температурах, что и нормализацию.

5. Отжиг для снятия напряжений. Снижение напряжений в отливках происходит в результате необратимых пластических деформаций под действием внутренних (или внешних) напряжений. Нагрев и выдержка при отжиге одновременно ускоряют процессы коагуляции эвтектоидного цементита и его распад, что приводит к снижению прочности и твердости чугуна. Поэтому температура отжига не должна превышать значений, выше которых начинается интенсивное падение механических свойств чугуна. Например, для СЧ20 температура отжига равна 550 °С. Следует помнить, что закалке и отпуску, т. е. улучшению с целью повышения механических свойств отливок, целесообразно подвергать чугун, имеющий перлитную основу, только при благоприятной форме графита. Наиболее высокие механические свойства после закалки и отпуска можно получить в модифицированном чугуне.

Порядок работы

1. Работу выполняют на цилиндрических или прямоугольных образцах небольших размеров. Влияние же указанных в работе методов термической обработки на структуру металлической основы и на твердость чугуна можно изучить на образцах из перлитного чугуна. Получить у преподавателя образец чугуна, измерить размеры образца штангенциркулем. Занести данные в таблицу.

2. Все образцы из перлитного или модифицированного чугуна сначала закаливают в воде или масле с 860–880 °С. Нагрев образца проводить согласно ин-

струкции и руководства пользователя печи «Накал ПЛ 5/12.5» (режимы ТО использовать из лаб. раб. № 5)

3. Подготовьте рабочее место, включите вытяжку и включите печь марки «Накал ПЛ 5/12.5» в режим нагрева, предварительно выбрав нужный режим термической обработки. Печь работает в режимах контролируемого нагрева, выдержки и охлаждения.

4. После прогрева печи до пиковой температуры 880 °С, поместите образец чугуна в печь, соблюдайте технику безопасности. Время нагрева определяют из расчета 1,5–2,0 мин на каждый миллиметр толщины или диаметра образца и плюс выдержка, равная 1/5 от времени нагрева образцов.

5. Охлаждение образцов проводить в масле или воде. После закалки в воду обязательна процедура среднего или низкого отпуска. После закалки на всех образцах замеряют твердость. При процедуре нормализации образцы охладить на воздухе до комнатной температуры.

6. На одном или двух образцах изучают микроструктуру, а остальные подвергают отпуску. Для изучения влияния отпуска нагревают по одному образцу до 300, 400, 500, 600 и 650 °С в течение 45–60 мин. После охлаждения замеряют твердость и изготавливают микрошлифы. Микрошлифы травят 2–4 %-ным раствором азотной кислоты в спирте. После травления изучают микроструктуру (смотри лаб. раб. № 2).

! Для установления влияния режима отжига и нормализации на структуру и свойства чугуна образцы нагревают до 850 и 950 °С с выдержками при этих температурах 30 и 60 мин.

! Для нормализации образцы охлаждают на воздухе. Для обычного отжига образцы охлаждают вместе с печью.

После всех вариантов термической обработки изучают микроструктуру и твердость чугуна.

Марка чугуна	Размер образца (толщина или диаметр), мм	Время нагрева (выдержки), мин	Тип ТО	Твердость НВ (HRC)	Структура чугуна

Контрольные вопросы

1. Состав и маркировка серого чугуна.
2. Микроструктура модифицированных чугунов повышенной прочности.
3. От чего зависят механические, физические и химические свойства чугуна?
4. Чего можно достичь термической обработкой?
5. Виды термообработки для чугуна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг, Г. С. Оптика: учеб. пособие / Г. С. Ландсберг. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
2. ГОСТ 28489–90. Микроскопы световые. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 21 с.
3. Гуляев, А. П. Металловедение: учебник для вузов / А. П. Гуляев, А. А. Гуляев. – Москва : Альянс, 2023. – 722 с.
4. Егорова, О. В. Техническая микроскопия. Практика работы с микроскопами для технических целей: учебник для вузов. – СПб : Лань, 2022. – 524 с.
5. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – Москва : Техносфера, 2004. – 384 с.
6. Кларк, Э. Р. Микроскопические методы исследования материалов / Э. Р. Кларк, К. Н. Эберхардт. – Москва : Техносфера, 2007. – 376 с.
7. Вашуль, Х. Практическая металлография: методы изготовления образцов: пер. с нем. / Х. Вашуль, В. А. Федорович. – Москва : Металлургия, 1988. – 318 с.
8. Разумов, М. С. Измерение твердости по методу Виккерса: Методические указания к проведению лабораторных занятий / М. С. Разумов, А. А. Горохов. – Курск : Юго-Зап. Гос. ун-т, 2018. – 9 с.
9. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 38 с.
10. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 12 с.
11. ГОСТ Р ИСО 148–1–2013. Материалы металлические. Испытание на ударный изгиб на маятниковом копре по Шарпи. Часть 1: Метод испытания. – Москва : Стандартинформ, 2014. – IV, 17 с.
12. ГОСТ 9454–2025. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Москва : Российский институт стандартизации, 2025. – 32 с.
13. ГОСТ 26528–98 (ИСО 5754–78). Материалы металлические спеченные, исключая твердые сплавы. Метод испытания на ударный изгиб. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. – 5 с.
14. ГОСТ 4647–2015 (ISO 179–1:2010). Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 15 с.
15. ГОСТ 19109–2017 (ISO 180:2000). Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду. – Москва : Стандартинформ, 2018. – IV, 15 с.
16. ГОСТ 10708–82. Копры маятниковые. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 15 с.
17. ГОСТ 1524–42. Металлы. Метод определения ударной вязкости. – Москва : Изд-во стандартов, 1942. – 6 с.
18. ASTM A 370–05. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. – ASTM International, 2005.

19. Золоторевский, В. С. Механические свойства металлов: учебник для вузов / В. С. Золоторевский. – Москва : МИСИС, 1998. – 400 с.
20. Механические свойства металлов: статические испытания. Лабораторный практикум / В. С. Золоторевский, В. К. Портной, А. Н. Солонин, А. С. Провсвиряков. – Москва : МИСИС, 2013. – 116 с.
21. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. – 3-е издание, перераб. и доп. В 3-х т. Т. I. Методы испытаний и исследования / под ред.: М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. – Москва : Металлургия, 1983. – 352 с.
22. Степанов, Г. В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении / Г. В. Степанов. – Киев : Наук. думка, 1991. – 287 с.
23. Чернов, В. М. Хладноломкость и разрушение металлов с разными кристаллическими решетками – дислокационные механизмы / В. М. Чернов, Б. К. Кардашев, К. А. Мороз // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – № 7. – С. 57–64.
24. ГОСТ 4647–2015. Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 25 с.
25. ГОСТ 10708. Копры маятниковые. Технические условия. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 18 с.
26. ГОСТ 12423–2013. Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). – Москва : Стандартинформ, 2014. – 12 с.
27. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – Москва : Металлургия, 1990. – 528 с.
28. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – Москва : Металлургия, 1992. – 272 с.
29. Арзамасов, Б. Н. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов. – Москва : Машиностроение, 2003. – 384 с.
30. Геллер, Ю. А. Материаловедение (лаб. работы, методы анализа, задачи) / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. – Москва : Металлургия, 1985. – 448 с.
31. Травин, О. В. Материаловедение / О. В. Травин, Н. Т. Травина. – Москва : Металлургия, 1991. – 384 с.
32. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. – Москва : Металлургия, 1993. – 493 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Составители:
Шутов Илья Владиславович
Королев Михаил Николаевич
Кривилев Михаил Дмитриевич

**РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО КУРСУ
«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»**

Учебно-методическое пособие

*Авторская редакция
Компьютерная верстка: Т. В. Опарина*

Подписано в печать 02.09.2026. Формат 60х84 1/16.
Усл. печ. л. 10,2. Уч. изд. л. 5,52.
Тираж 41 экз. Заказ № 1258.

Издательский центр «Удмуртский университет»
426034, г. Ижевск, ул. Ломоносова, 4Б, каб. 021
Тел. : + 7 (3412) 263-751, E-mail: editorial@udsu.ru

Типография Издательского центра «Удмуртский университет»
426034, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 2.
Тел. 68-57-18

ISBN 978-5-4312-1369-4



9 785431 121369 4