

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2014

УДК 620.22(076.5)

ББК 30.3-3я73

М34

Авторы

Ю.П. Егоров, Ю.М. Лозинский, Е.И. Марр, Р.В. Роот,
И.А. Хворова, Ю.А. Евтюшкин, В.П. Безбородов,
Ж.Г. Ковалевская, О.М. Утьев, Е.П. Чинков, И.Л. Стрелкова,
Ю.П. Петренко, А.Г. Багинский

М34

Материаловедение. Лабораторный практикум: учебное пособие / Ю.П. Егоров, Ю.М. Лозинский, Е.И. Марр и др.; под ред. А.Г. Багинского; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 121 с.

В пособии рассматриваются современные способы исследования структуры и свойств металлических материалов; изложены закономерности формирования структуры и свойств металлических конструкционных материалов; показана взаимосвязь между структурой и свойствами материалов; даны современные представления о механизме упрочнения и разупрочнения металлов и сплавов. Рассмотрены широко применяемые и перспективные сплавы черных и цветных металлов.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 150700 «Машиностроение».

УДК 620.22(076.5)

ББК 30.3-3я73

Рецензенты

Заместитель технического директора ООО «Сибкабель»

В.Ю. Зиборов

Доктор технических наук

заведующий лабораторией физико-химии

порошковой металлургии

Института физики прочности и материаловедения СО РАН

Г.А. Прибытков

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2014

© Авторы, 2014

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Это учебное пособие представляет собой сборник методических указаний по проведению лабораторных работ по дисциплинам «Материаловедение» и «Конструкционное материаловедение».

Назначение учебного пособия – привить студентам навыки самостоятельной работы по исследованию структуры и свойств металлических конструкционных материалов; обучить методам контроля механических характеристик, использованию данных микро- и макроанализа, работе с необходимыми для этого приборами и аппаратурой, проведению основных операций термической обработки стали и сплавов цветных металлов.

Познавательная ценность, самостоятельность работы студентов и приобретение ими практических навыков обращения с современным оборудованием, анализа и интерпретации полученных экспериментальных данных, высокий обучающий эффект делают лабораторные работы незаменимой частью изучения указанных выше дисциплин.

Лабораторные работы по материаловедению соответствуют всем основным разделам дисциплины. Они проводятся в специализированных аудиториях кафедры «Материаловедение и технология металлов» ИФВТ ТПУ.

Каждая работа представляет собой исследование процесса обработки, группы материалов или способа определения их характеристик. Задание для выполнения работы студенты получают индивидуально или на подгруппы в 3–5 человек. Студенты работают самостоятельно под руководством преподавателя и учебного мастера. Каждый вносит свою долю в получение результатов, таким образом, отрабатываются навыки работы в группе. Отдельные работы могут выполняться в форме деловой игры, где задействована вся группа, но у каждого своя роль.

Перед лабораторной работой необходима подготовка: используя методические указания, студент должен составить отчет по теоретической части работы и усвоить основные положения. В начале лабораторной работы проводится контроль подготовки в форме тестов или устных ответов на вопросы преподавателя.

В ходе выполнения работы каждый студент вносит в отчет все полученные данные, строит необходимые графики, делает эскизы и т. п.

По окончании лабораторной работы каждый студент должен провести анализ полученных результатов и сделать выводы. Отчеты по лабораторным работам защищаются каждым студентом индивидуально.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Цель работы

1. Ознакомиться с приборами и методами исследования металлов.
2. Изучить методы исследования строения металлов.
3. Изучить работу металлографических микроскопов.
4. Научиться готовить образцы, анализировать и фиксировать макро- и микроструктуру.

Оборудование и материалы для выполнения работы

Оборудование: прессы Бринелля, Роквелла, Виккерса, маятниковый копер, разрывная машина, шлифовально-полировальные станки «Нерис», оптические микроскопы МИМ-7, ММУ-3, растровый электронный микроскоп РЭМ-200, рентгеновский дифрактометр ДРОН-2,0.

Материалы: образцы металлов и сплавов, абразивная бумага, растворы кислот.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Прочитать теоретическую часть данного пособия.
2. Ознакомиться с приборами и их работой.
3. В соответствии с заданием приготовить макро- или микрошлиф, выявить структуру образцов, зарисовать ее или сфотографировать.
4. Написать отчет.

Основные сведения по теме работы

I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Основной целью любого метода исследования является получение достоверной информации о строении и свойствах изучаемого материала. Чем больше и разнообразнее информация, тем точнее можно предвидеть поведение материала в реальных конструкциях и целенаправленно изменять его свойства различными видами обработки.

По характеру получаемой информации методы исследования металлов и сплавов можно разделить на три группы.

1. Исследование механических свойств.
2. Исследование макро- и микроструктуры (металлографический анализ).
3. Физические методы исследования.

Как правило, процесс исследования металлов ведут методами первой группы, затем второй и далее третьей. В данной лабораторной работе необходимо лишь познакомиться с приборами и методами первой и третьей групп и изучить методы исследования структуры металлов.

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ

Основными механическими свойствами металлов являются прочность, упругость, пластичность, твердость и вязкость. Механические свойства металлов определяют испытанием специальных образцов на соответствующих испытательных машинах.

В зависимости от характера действия нагрузки испытания могут быть статическими, динамическими, циклическими. При *статических* испытаниях нагружение проводится плавно, в отличие от резкого нагружения при *динамических* испытаниях. При *циклических* испытаниях изменяются направления действия нагрузки, или ее величина, или оба фактора вместе.

К статическим испытаниям обычно относятся испытания на растяжение и сжатие, проводимые на разрывных машинах, и испытания твердости, проводимые на приборах Бринелля, Роквелла, Виккерса.

К динамическим испытаниям относятся испытания на ударный изгиб, которые проводятся на маятниковых копрах.

Циклические испытания проводятся на машинах с циклически изменяемой нагрузкой для определения сопротивляемости металлов усталостному разрушению.

III. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения структуры металлов и сплавов используются различные физические методы, позволяющие на основании регистрации известных физических величин анализировать структуру и состояние вещества, а также выявлять характер превращений, протекающих в твердом теле под воздействием внешних причин (нагрев, охлаждение, деформация и др.).

К этим методам относятся электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, резистометрический, дилатометрический, магнитный и другие методы.

В данной работе необходимо познакомиться с установками и их работой для проведения электронно-микроскопического и рентгеноструктурного анализов.

Электронно-микроскопический анализ относится к прямому методу наблюдения и изучения структуры вещества. Анализ проводится

на просвечивающих и растровых электронных микроскопах. По темпам развития и количеству моделей РЭМ опережает просвечивающие электронные микроскопы, хотя последние разработаны и используются значительно раньше РЭМ.

В лабораторной работе необходимо ознакомиться с прибором РЭМ-200 и его работой.

В растровых электронных микроскопах поверхность исследуемого образца облучается стабильным во времени, тонко сфокусированным (диаметр до 5–10 нм) электронным зондом, совершающим возвратно-поступательное движение по линии или развертывающимся в растр. Растром называется совокупность близко расположенных параллельных линий движения зонда, по которым зонд сканирует (обегает) выбранный участок на поверхности образца. При взаимодействии зонда с веществом образца в каждой точке поверхности происходит ряд эффектов, которые регистрируются датчиками. Эти эффекты служат основой для получения информации о строении исследуемых объектов. Изображение объекта формируется на экране электронно-лучевой трубки, с которого фиксируется на фотографическую пленку.

Рентгеноструктурный анализ основан на явлении интерференции рентгеновских лучей, отраженных от атомных плоскостей кристалла. Этот метод позволяет изучить фазовый состав сплава, определить степень совершенства кристаллов, их ориентировку, определить оптимальные режимы технологии изготовления и обработки разнообразных кристаллических материалов. В настоящее время наибольшее распространение в качестве рентгеновских аппаратов получили дифрактометры, которые позволяют регистрировать интенсивность отраженного рентгеновского излучения на диаграммную ленту самописца. ДРОН-2,0, ДРОН-3,0 ДРОН-3М – дифрактометры рентгеновские общего назначения, выпускаемые в нашей стране, широко используются в научных и заводских лабораториях.

IV. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Металлографический анализ проводится с целью изучения влияния химического состава и различных видов обработки на структуру металла.

Различают макро- и микроструктуру. Соответственно, металлографический анализ подразделяется на макроанализ и микроанализ.

Макроструктура – это строение металла, видимое невооруженным глазом или при небольшом увеличении (до 30 крат).

Микроструктура – это строение металла или сплава, видимое при больших увеличениях (более 50 крат) с помощью микроскопа.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ (МАКРОАНАЛИЗ)

Макроанализ дает представление об общем строении металла и позволяет оценить его качество после различных видов обработки: литья, обработки давлением, сварки, термической и химико-термической обработки.

Не выявляя подробностей строения, макроанализ позволяет определить участки металла, требующие дальнейшего микроскопического исследования. Макроанализ позволяет определить:

- 1) нарушения сплошности металла: центральную пористость, свищи, подкорковые пузыри, трещины, непровары и газовые пузыри при сварке;
- 2) дендритное строение, размеры и ориентацию зерен в литом состоянии;
- 3) химическую неоднородность литого металла – *ликвацию* (исследуется макрошлиф);
- 4) волокнистое строение деформированного металла;
- 5) вид излома: вязкий, хрупкий, нафталинистый, камневидный;
- 6) глубину слоя после химико-термической обработки (исследуется излом).

Макроанализ проводят на продольных и поперечных макрошлифах (темплетах) и изломах. Для успешного выполнения макроанализа необходим выбор наиболее характерного для изучаемого изделия сечения или излома. Вырезанные темплеты подвергают механической обработке, химическому травлению и исследованию.

Методы макротравления подразделяют на три группы: глубокого травления; поверхностного травления; отпечатков. Структура, выявляемая глубоким травлением, слабо зависит от подготовки поверхности образца; поверхностное травление, и метод отпечатков требуют более тщательной подготовки поверхности. Способы макроанализа различны, в зависимости от состава сплава и задач, стоящих перед исследователем. Для многих марок стали, с целью выявления дефектов, нарушающих сплошность, применяют горячий (60–80 °С) 50%-й водный раствор соляной кислоты. Темплеты травят в течение 5–45 мин. до четкого выявления макроструктуры – это глубокое травление.

Химическую неоднородность стали, например ликвацию фосфора, серы, свинца, определяют методом поверхностного травления и отпечатков.

При необходимости полного макроскопического исследования, а также определения нарушений сплошности металла и дефектов строения целесообразно придерживаться следующей последовательности:

сначала травить образец реактивом поверхностного травления, затем снова шлифовать и определять распределение серы по отпечатку на фотобумаге, после чего производить глубокое травление для определения нарушений сплошности.

МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ (МИКРОАНАЛИЗ)

Микроскопический анализ заключается в исследовании структуры специально подготовленных образцов (микрошлифов) при увеличениях от 30–50 до 1500–1800 крат.

Микроанализ проводят с целью определения:

- 1) количества, размеров и типа структурных составляющих;
- 2) фазового состава сталей и сплавов;
- 3) связи химического состава, условий производства и обработки сплава с его микроструктурой и свойствами.

Для проведения высококвалифицированного микроанализа необходимы знания не только в области металлографии, но и в методике приготовления микрошлифов, в устройстве микроскопов и методах микроскопического анализа.

Приготовление микрошлифа обычно включает следующие основные операции:

- 1) вырезку образцов и подготовку поверхности;
- 2) шлифование;
- 3) полирование;
- 4) травление.

Выбор числа образцов, места вырезки и сечения материала, по которому проходит плоскость микрошлифа, определяется целью металлографического исследования, размерами, формой и особенностями структуры изучаемого объекта.

Наиболее удобны простые формы образцов следующих размеров: цилиндр или параллелепипед с диаметром или стороной основания 10–20 мм и высотой 10–15 мм. Образцы малых размеров (лента, проволока) или сложной конфигурации после вырезки для изготовления шлифов помещают в пластмассы или легкоплавкие сплавы, используя заливку или запрессовку в цилиндрические обоймы. Наиболее часто для холодной заделки шлифов используют эпоксидные смолы. Они обладают достаточной твердостью, малой объемной усадкой при отверждении и хорошо соединяются с большинством металлических образцов.

Обработку шлифа на плоскость производят с помощью напильника или наждачного круга. Затем производят шлифовку ручную или на шлифовальных станках. Шлифование осуществляют на 4–5 номерах наждачной бумаги, последовательно уменьшая размер абразива.

Направление движения образца по наждачной бумаге при смене номера бумаги следует изменять на 90° , а шлифование на одном номере вести до исчезновения рисок от предыдущей шлифовальной бумаги. При смене номера бумаги следует удалять со шлифа частички абразива. После шлифования на последней бумаге шлиф тщательно промывают в воде, чтобы частички абразива не попали на полировальный круг.

При шлифовании очень мягких металлов в ряде случаев шкурку предварительно смачивают в керосине или натирают парафином (например, при изготовлении микрошлифов из алюминия), чтобы свести к минимуму вдавливание абразивных частиц в поверхность шлифов.

Полирование служит для удаления мелких рисок, оставшихся после шлифования, и получения гладкой зеркальной поверхности шлифа. Применяют механическое или электрохимическое полирование.

Механическое полирование производят на вращающемся круге с натянутым полировальным материалом (фетр, сукно, драп), на который непрерывно или периодически наносят очень мелкий абразив в виде суспензии в воде. В качестве абразивов применяют оксид хрома, оксид алюминия и оксид железа. Все более широкое использование находят полировальные алмазные пасты, которые наносят на специальную ткань или бумагу.

Основные характеристики алмазных паст приведены в табл. 1.

Полирование ведут до получения зеркальной поверхности, и оно считается законченным, когда на поверхности шлифа под микроскопом не наблюдаются риски или царапины. После полировки шлиф промывают в воде или спирте и сушат полированную поверхность фильтровальной бумагой.

Электрохимическое полирование основано на использовании процесса анодного растворения металла, который при определенных условиях протекает с образованием гладкой блестящей поверхности. Образец после механического шлифования погружают в качестве анода в электролизную ванну и выдерживают при заданном режиме (напряжении, плотности тока и температуре электролита) определенное время. Катодом обычно служит пластинка, изготовленная из нержавеющей стали.

Преимуществом электрополировки является отсутствие на поверхности шлифа деформированного слоя, образующегося при шлифовании или механическом полировании. Этот метод особенно подходит для полирования шлифов из мягких и легко наклепывающихся сплавов. К недостаткам электрополирования относятся: чувствительность к неоднородности химического состава, преимущественное растворение металла вокруг пустот и неметаллических включений, краевые эффекты.

Таблица 1

Основные характеристики полировальных алмазных паст

Обозначение зернистости по ГОСТ 9206-70	Размеры абразивных частиц, мкм	Концентрация алмазного порошка, %		Цвет пасты и этикетки
		нормальная Н	повышенная П	
60/40	60-40	10	20	красный
40/28	40-28	7	14	красный
28/20	28-20	7	14	голубой
20/14	20-14	5	10	голубой
14/10	14-10	5	10	голубой
10/7	10-7	3	6	зеленый
7/5	7-5	3	6	зеленый
5/3	5-3	2	4	зеленый
3/2	3-2	2	4	желтый
2/1	2-1	1	2	желтый
1/0	1-0	1	2	желтый

Для выявления структуры отполированную поверхность образца подвергают травлению реактивами, различающимися по своему воздействию на поверхность металла. В прил. 1 приведены наиболее употребляемые реактивы для выявления микроструктуры различных сплавов. Под воздействием реактива происходит *растворение* одних фаз, *окисление* и *окрашивание* других. В результате созданной *различной отражающей способности* фаз, самих зерен и их границ можно увидеть под микроскопом очертания зерен и различных фаз, определить их взаимное расположение; по цвету, форме и размерам определить присутствующие в сплаве фазы, т. е. выявить микроструктуру сплава.

Качество травления проверяют под микроскопом при том же увеличении, при котором предполагается изучение шлифа. Если поверхность шлифа, видимая под микроскопом, очень светлая, нет четкости контура структуры, то шлиф недотравлен; тогда проводят повторное травление. Если поверхность шлифа темная, с широкими темными границами структурных составляющих, то шлиф перетравлен; тогда его необходимо переполлировать с повторным травлением. После окончания травления шлиф промывают проточной водой, спиртом и высушивают прикладыванием фильтровальной бумаги.

Изучение микроструктуры осуществляют с помощью световых металлографических микроскопов.

Впервые микроскоп для исследования строения металлов был применен в 1831 г. русским инженером П.П. Аносовым, изучавшим булатную сталь.

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

На рис. 1 показаны две принципиальные схемы освещения шлифа.

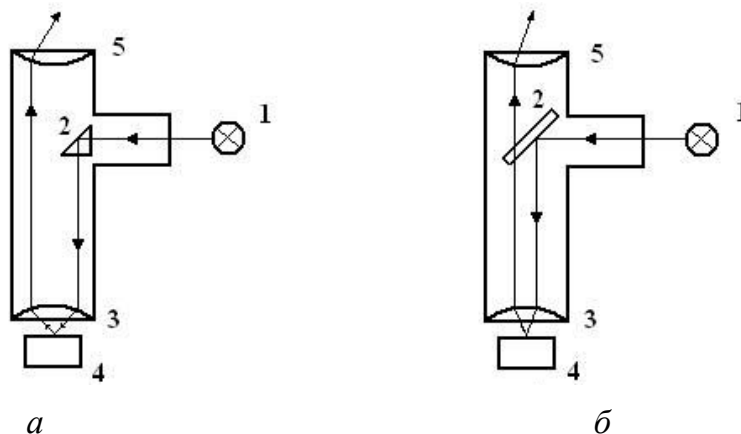


Рис. 1. Схема освещения шлифа в металлографических микроскопах

В металлографических микроскопах освещение объекта осуществляется через объектив. Лучи света от источника света 1 попадают на призму полного внутреннего отражения 2 (рис. 1, а) или полупрозрачную плоско-параллельную пластинку 2 (рис. 1, б). Их назначение направить поток света в объектив 3 и через него – на шлиф 4.

Отраженные от шлифа лучи попадают в объектив 3, далее в окуляр 5 и от него в глаз человека.

Если шлиф металла не травлен, то практически весь световой поток отражается от шлифа и попадает в окуляр микроскопа (рис. 2, а). На травленном шлифе образуется микрорельеф из-за различной способности к растворению и окислению границ зерен, основы зерна и различных фаз (рис. 2, б). В результате различные участки шлифа по-разному отражают лучи света, что и позволяет наблюдать в микроскоп структуру металлов и сплавов (рис. 2, в, г).

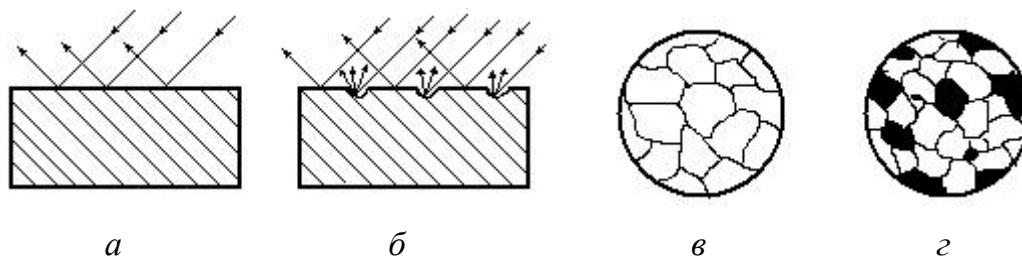


Рис. 2. Формирование изображения структуры шлифа в металлографическом микроскопе: а – отражение лучей от полированной поверхности; б – отражение лучей от травленной поверхности; в – вид в микроскопе травленной поверхности однофазного шлифа; г – вид в микроскопе травленной поверхности двухфазного шлифа

Основными характеристиками микроскопа являются его разрешающая способность и увеличение. *Разрешающая способность* характеризуется минимальным расстоянием между двумя соседними частицами, при котором они еще видны раздельно. Например, разрешающая способность невооруженного глаза составляет около 0,2 мм. Разрешаемое расстояние μ объектива микроскопа определяется соотношением

$$\mu = \lambda / 2A,$$

где λ – длина волны света ($\lambda = 0,55$ мкм для белого света), A – числовая апертура объектива (выгравирована на оправе объектива).

Если учесть, что числовая апертура у лучших объективов равна 1,4, то минимальное разрешаемое расстояние светового микроскопа равно 0,2 мкм. Окуляр в микроскопе только увеличивает промежуточное изображение объекта, которое дает объектив, и не повышает разрешающую способность микроскопа.

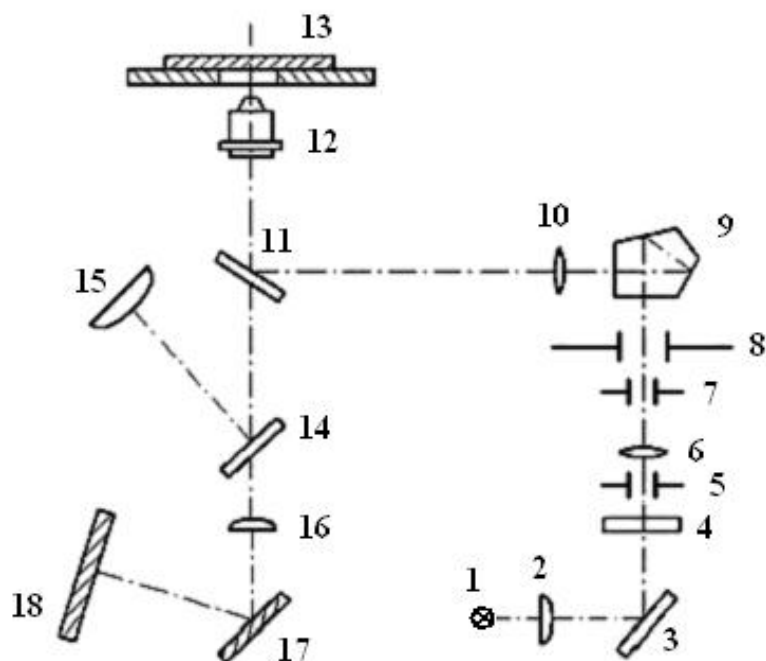


Рис. 3. Оптическая схема микроскопа МММ-7

Общее увеличение микроскопа равно произведению увеличения объектива на увеличение окуляра, так как изображение предмета увеличивается в объективе и окуляре. Увеличение современных металлографических микроскопов может быть от 60 крат до 1500 при визуальном наблюдении и до 2000 крат при фотографировании. Увеличение микроскопа при фотографировании легко определить с помощью объект-микрометра – металлической пластинки с полупрозрачным стеклом в центре. На стекло нанесена шкала длиной 1 мм, разделенная на 100 частей, т. е. цена деления составляет 0,01 мм. Установив объект-микрометр на столик микроскопа и

добившись четкого изображения делений на матовом стекле фотографического устройства, определяют увеличение, соотнося расстояние на стекле с истинным расстоянием по объект-микрометру.

Большинство металлографических исследований проводят с применением светлопольного (вертикального) освещения. Для дополнительного повышения контрастности применяют другие методы и виды освещения, например: косое освещение, поляризованное освещение, метод фазового контраста, метод интерференционного контраста. Следует, однако, отметить, что в большей части выпускаемых в стране металлографических микроскопов используется лишь 2–3 дополнительных вида освещения.

Наиболее широко в металлографических лабораториях применяют микроскопы МИМ-7, МИМ-8, ММУ-3, ММР-4. На рис. 3 приведена оптическая схема микроскопа МИМ-7. Световые лучи от источника света *1* проходят через собирающую линзу (коллектор) *2*, отражаются от зеркала *3*, проходят через светофильтр *4*, апертурную диафрагму *5*, линзу *6*, фотозатвор *7*, полевую диафрагму *8* и, претерпев полное внутреннее преломление в поворотной призме *9*, попадают на полупрозрачную плоско-параллельную пластинку *11*. Часть светового потока проходит через нее и рассеивается в микроскопе, а часть лучей отражается вверх от пластинки, проходит через объектив *12* и через отверстие в предметном столике попадает на шлиф *13*. Отраженные от шлифа лучи проходят через объектив *12*, через прозрачную плоско-параллельную пластинку *11* и, отразившись от зеркала *14*, через окуляр *15* попадают в глаз человека. В случае фотографирования зеркало *14* выдвигается в сторону вместе с окулярным тубусом и лучи света проходят через фотоокуляр *16*, отражаются от зеркала *17* и попадают на матовое стекло фотокамеры или на фотопластинку в кассете, вставленной вместо матового стекла.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Оборудование и материалы, используемые в работе.
3. Методы исследования металлов (кратко).
4. Металлографический анализ (кратко).
5. Дать описание экспериментальной части, привести рисунки.
6. Провести анализ макро- и микроструктуры образцов.

Контрольные вопросы и задания

1. На чем основаны физические методы исследования металлов?
2. На чем основан рентгеноструктурный анализ?
3. Какова цель исследования металлов?
4. Что такое разрешающая способность микроскопа?

5. Недостаток механической полировки?
6. Что такое микроструктура металлов?
7. Как приготовить образец металла для микроанализа?
8. Достоинство электролитического полирования?
9. Что такое макроструктура металлов?
10. Как подготовить образец для макроанализа?
11. Как выглядит в микроскопе недотравленный шлиф металла?
12. На чем основано электролитическое полирование?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Травление микрошлифов

Железоуглеродистые сплавы (сталь, чугун)

1. 1–5%-й раствор HNO_3 в этиловом спирте. Реактив выявляет структуру закаленной, отпущенной и отожженной стали. Травление от нескольких секунд до минут.

2. Насыщенный водный раствор пикриновой кислоты с добавкой 1–5 % поверхностно-активных веществ, входящих в состав моющих порошков. Служит для выявления границ зерен аустенита в закаленной стали. Травление при 20 °С от 5 до 30 мин., при 70 °С – 0,5–6 мин.

3. 3 части HCl и 1 часть HNO_3 . Реактив выявляет структуру нержавеющих сталей и сплавов. Перед употреблением реактив необходимо выдержать 20–30 часов.

Медь и ее сплавы

1. 15 см³ HCl ; 5 гр. FeCl_3 ; 100 см³ воды. Время травления от 30 с до 2 мин. Шлиф травят последовательным втиранием, а затем погружают в реактив.

Алюминий и его сплавы

1. 5–20%-й раствор NaOH в воде. Травят шлиф погружением или втиранием от 30 с до 1 мин. Темный налет, образующийся на шлифе, удаляют погружением в концентрированную азотную кислоту.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы

1. Научиться измерять твердость металлических образцов различными методами.
2. Ознакомиться с условиями применения того или иного метода определения твердости; с подготовкой образцов для измерения твердости; устройством приборов для измерения твердости.
3. Проследить зависимость твердости металлов от состава сплава.

Оборудование и материалы для выполнения работы

Приборы Бринелля, Роквелла, Виккерса, микротвердомер. Образцы различных железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов); образцы из меди, алюминия и сплавов на их основе; образцы из закаленной и отпущенной стали. Наждачные круги и абразивная бумага.

Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретический материал по теме занятия.
2. Ознакомиться с приборами и методами определения твердости по Бринеллю, по Роквеллу, по Виккерсу и микротвердости.
3. Измерить твердость предложенных образцов металлов и сплавов на приборах Бринелля и Роквелла. Данные внести в табл. 1 и 2 соответственно.
4. Определить приблизительное значение предела прочности по данным измерения твердости по Бринеллю.
5. Проанализировать результаты измерений и написать отчет.

Основные положения

При проектировании и производстве машин, механизмов, инструментов те или иные детали должны обладать определенными механическими свойствами. Механические свойства металлов характеризуют сопротивление материала деформации и разрушению под действием внешних нагрузок. Практически все методы определения механических свойств являются разрушающими. Для проведения испытаний необходимы специальные машины; процессы испытания довольно длительны, особенно если учесть весьма продолжительный процесс изготовления специальных образцов.

Механические свойства и физические свойства зависят от многих факторов: от состава материала, вида обработки (пластической деформации, термической обработки). Поэтому в процессе изготовления тех или иных деталей необходимо контролировать свойства, особенно механические. Как отмечено ранее, обычные методы испытания механических свойств не могут быть использованы на промежуточных стадиях изготовления деталей вследствие длительности и дороговизны изготовления образцов, длительности самого процесса испытания. В этом случае пользуются методами определения твердости.

Твердость имеет большое практическое значение, так как она отражает многие рабочие свойства материала, например сопротивляемость истиранию, режущие свойства, способность обрабатываться шлифованием или резанием, выдерживать местные давления и т. д. Кроме того, по твердости можно судить и о других механических свойствах (например, о прочности на разрыв). Следовательно, между твердостью и другими свойствами материалов существует определенная связь, подтверждаемая практикой.

Широкое распространение испытаний материалов на твердость объясняется тем, что при этом не требуется изготовления специальных образцов; методика испытаний весьма проста и может осуществляться непосредственно на готовой детали без разрушения.

Большинство методов определения твердости основано на принципе вдавливания в испытуемый материал твердых тел (закаленного стального шарика, алмазного конуса или алмазной пирамиды) и последующего измерения размеров отпечатков. Поэтому часто *твердость определяют как способность материала сопротивляться внедрению в него другого тела*. Однако такое определение не является общим, так как существуют и другие методы определения твердости, основанные не на вдавливании, а на царапании, качании маятника, динамическом методе и других принципах.

Наиболее широко практикуются испытания твердости по Бринеллю, по Роквеллу, по Виккерсу и метод определения микротвердости. Во всех перечисленных методах при вдавливании индентора происходит пластическая деформация испытуемого материала под индентором. Чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем на меньшую глубину проникает индентор и тем выше твердость.

По Бринеллю определяют твердость относительно мягких материалов: цветных металлов и их сплавов, отожженных сталей и любых чугунов (кроме белого).

По Роквеллу чаще всего определяют твердость очень твердых материалов: закаленных сталей, твердых сплавов, керамики, твердых по-

крытий, в том числе наплавленных слоев достаточной глубины на сталях и чугунах. Но на приборе Роквелла можно определять твердость и сравнительно мягких материалов.

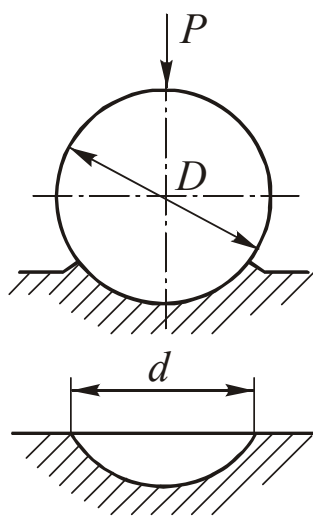


Рис. 1

Метод Виккерса используется для испытания твердости деталей малой толщины или тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость. Реже этот метод применяется для измерения твердости твердых и мягких материалов.

Методом микротвердости обычно измеряется твердость в пределах отдельных зерен или очень тонких слоев. Два последних метода чаще всего используются в исследовательских работах.

Твердость по методу Бринелля. Определение твердости по Бринеллю основано на вдавливании в испытуемый материал стального шарика и последующего измерения диаметра отпечатка (рис. 1).

Твердость по Бринеллю (HB) выражается отношением взятой нагрузки P к площади поверхности отпечатка F :

$$HB = \frac{P}{F}. \quad (1)$$

Если вычислить поверхность отпечатка, имеющего форму шарового сегмента, то HB определится формулой

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

где P – приложенная нагрузка, кгс; D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

Размер шарика выбирается в зависимости от толщины испытуемого образца: шарики стандартных размеров имеют диаметры 10 мм, 5 мм или 2,5 мм.

Нагрузка на шарик выбирается в зависимости от рода материала и должна быть пропорциональна квадрату диаметра шарика. Условные стандартные нормы, принятые для различных материалов:

- для стали и чугуна $P = 30D^2$;
- для меди и медных сплавов $P = 10D^2$;
- для баббитов и свинцовистых бронз $P = 2,5D^2$.

Более подробные сведения по выбору нагрузки и времени ее приложения для различных материалов приводятся в соответствующей таблице в лаборатории испытания твердости.

Для получения достоверных данных при измерениях твердости размер отпечатка должен находиться в пределах

$$0,2D < d < 0,6D. \quad (3)$$

Диаметр отпечатка измеряют с помощью лупы Бринелля или микроскопа в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяют как среднее арифметическое из двух измерений. Лупа имеет шкалу, малое деление которой равно 0,05 мм (цена деления). На рис. 2 показано измерение диаметра отпечатка с помощью лупы.

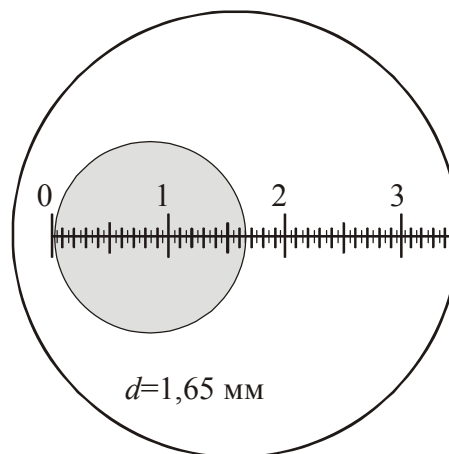


Рис. 2

По результатам измерения диаметра отпечатка на данном материале твердость по Бринеллю определяется с помощью формулы (2) или по таблице определения чисел твердости по Бринеллю (таблица приводится в прил. 1).

Как отмечалось ранее, между механическими свойствами (в частности, пределом прочности σ_b и твердостью по Бринеллю) существует определенная зависимость, которая может быть представлена эмпирической формулой

$$\sigma_s = C \cdot HB \text{ [МПа]},$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Для сталей (при 0,1–0,7 % С).....	$C = 3,3 \dots 3,4$
Для сталей (при 0,8–1,3 % С).....	$C = 3,5 \dots 3,6$
Для алюминия	$C = 4,0$
Для меди	$C = 4,8$
Для дуралюмина	$C = 3,7$
Для латуни, бронзы.....	$C = 5,3$

Следует отметить, что для хрупких материалов (чугун, силумин) надежной корреляции между твердостью и пределом прочности получить не удастся. В частности, для определения предела прочности серого чугуна пользуются следующей эмпирической формулой:

$$\sigma_b = \frac{10 \cdot (HB - 40)}{6} \text{ [МПа]}.$$

Твердость по методу Роквелла. Определение твердости по Роквеллу основано на вдавливании в исследуемый материал алмазного

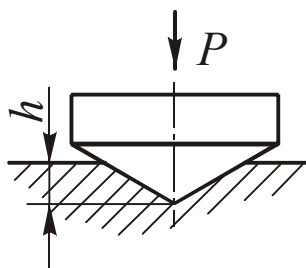


Рис. 3

конуса с углом в вершине 120° (шкалы *A* и *C*) и последующим измерением глубины вдавливания h (рис. 3) или стального шарика диаметром 1,5875 мм (шкала *B*).

Твердость по Роквеллу выражается отвлеченной величиной, зависящей от глубины вдавливания h , и может быть вычислена по формуле, но в этом нет необходимости, так как твердость определяется по показаниям прибора.

Метод Роквелла позволяет проводить испытания деталей после объемной закалки и поверхностного упрочнения достаточной глубины. Определение твердости по этому методу практически не связано с порчей поверхности изделия.

Шкала *C* служит для испытания твердых материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 230 до 700 кгс/мм². Алмазный конус вдавливается с усилием 150 кгс. Интервал измерения твердости по шкале *C* – от 22 до 68 единиц, твердость обозначается *HRC*.

Шкала *A* используется при испытании очень твердых материалов или тонких поверхностных слоев (0,5–1,0 мм). Применяют тот же алмазный конус, но сила вдавливания – 60 кгс. Значение твердости определяют по шкале *C*, но обозначают *HRA*. Интервал измерения твердости по этой шкале – от 70 до 85 единиц.

Шкала *B* предназначена для испытания мягких материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 60 до 230 кгс/мм². Стальной шарик диаметром 1,5875 мм вдавливается с усилием в 100 кгс. Твердость измеряется в пределах от 25 до 100 единиц шкалы *B* и обозначается *HRB*.

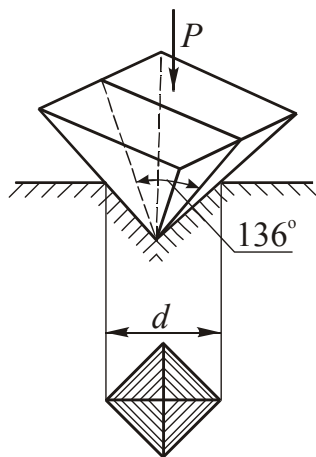


Рис. 4

Твердость по Виккерсу. Метод заключается во вдавливании алмазного наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды, в образец (изделие) под действием нагрузки P и измерении диагонали отпечатка d , оставшегося после снятия нагрузки (рис. 4).

Нагрузка P может меняться от 9,8 Н (1 кгс) до 980 Н (100 кгс). Твердость по Виккерсу

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2} \text{ [МПа]}, -$$

если P выражена в Н, и

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} \text{ [кгс/мм}^2\text{]}, -$$

если P выражена в кгс.

Метод используют в основном для определения твердости деталей малой толщины, тонких покрытий или твердости внешних слоев детали после неглубокого поверхностного упрочнения (например, после азотирования). При рациональном выборе нагрузки на приборе Виккерса можно проводить измерения, заменяя методы Бринелля и Роквелла.

Чем тоньше материал, покрытие или упрочненный слой, тем меньше должна быть нагрузка. Число твердости по Виккерсу HV определяют по специальным таблицам по измеренной величине d (диагонали отпечатка в миллиметрах) с учетом приложенной при измерении нагрузки.

Микротвердость. Определение микротвердости (твердости в микроскопически малых объемах) необходимо для тонких покрытий, отдельных структурных составляющих сплавов (рис. 5). Прибор для определения микротвердости состоит из механизма для вдавливания алмазной пирамиды с небольшой нагрузкой и металлографического микроскопа. В испытываемую поверхность вдавливают алмазную пирамиду под нагрузкой 0,05...5,00 H . Твердость H определяют по той же формуле, что и твердость по Виккерсу:

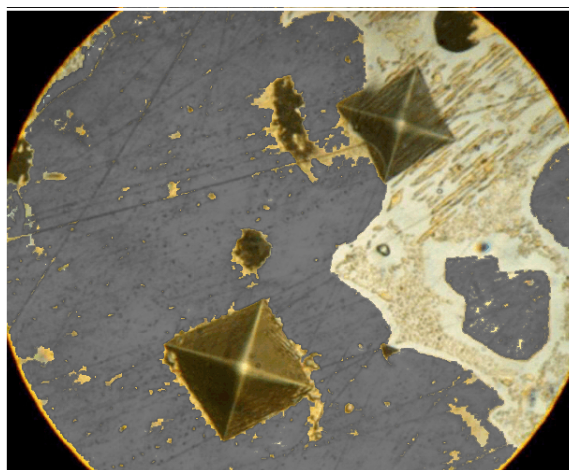


Рис. 5

$$H = 0,189 \frac{P}{d^2},$$

если нагрузка P выражена в H .

Задания и методические указания

Прежде чем приступить к измерению твердости образца, необходимо выбрать методику определения твердости (Бринелль, Роквелл). Для этого необходимо знать, в каком состоянии находится данный образец или деталь (в отожженном или закаленном). Если нет данных, то для ориентировки можно попробовать определить твердость обыкновенным напильником. Если напильник скользит по поверхности или лишь незначительно царапает металлическую поверхность, то образец имеет высокую твердость, и тогда следует применять метод определения твердости по Роквеллу. Если же образец хорошо режется напильником (легко снимается часть металла), то он имеет сравнительно низкую твердость, и тогда следует применять метод определения твердости по Бринеллю.

После выбора метода испытания необходимо подготовить образец для испытания. При использовании метода Бринелля образец подготавливают так, чтобы его поверхности (испытуемая и опорная) были параллельны и не имели окалины, ржавчины и других неровностей, влияющих на результат испытания. Это достигается (при необходимости) обработкой резанием, зачисткой или обработкой указанных поверхностей наждачной бумагой, наждачным кругом или напильником без разогрева. Минимальная толщина образца должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка.

При определении твердости по Роквеллу поверхности образцов (испытуемая и опорная) зачищаются на мелкой наждачной шкурке или на мелкозернистом шлифовальном круге. Зачистка не должна сопровождаться нагревом образца выше 150 °С. Опорная поверхность образца должна обеспечивать плотное и устойчивое прилегание его к опорному столику.

При определении твердости по методу Виккерса и микротвердости испытуемая поверхность образцов обязательно шлифуется и полируется (иногда для определения микротвердости отдельных зерен шлиф подвергается травлению). Опорную поверхность достаточно зачистить на наждачной бумаге. При любом методе испытания образец не должен сдвигаться, качаться или деформироваться, на нем не должно быть грубых царапин, забоин, следов предыдущих испытаний.

Результаты испытания твердости по Бринеллю вносятся в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента: измерение твердости по Бринеллю

Материал	Нагрузка, кгс	Диаметр шарика D , мм	Диаметр отпечатка d , мм	Твердость, HV	Предел прочности σ_B , МПа
1	2	3	4	5	6

Студенты должны проанализировать данные, приведенные в табл. 1. При этом обратить внимание на то, как отличается твердость черных металлов и сплавов (сталь и чугун) от цветных (медь, латунь, бронза, дуралюмин и т. д.). Кроме того, необходимо обратить внимание на отличие в твердости чистых металлов и их сплавов. Анализ результатов испытания должен приводиться в выводах по данной работе.

Все студенты должны познакомиться с методом определения твердости по Роквеллу и провести испытания твердости данных образцов. Пользуясь переводной таблицей (прил. 2), сопоставить значение твердости по Бринеллю закаленных образцов и образцов, не подвергнутых закалке. Данные внести в табл. 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента: измерение твердости по Роквеллу

Материал	Нагрузка, кгс	Твердость, <i>HRC</i>	Значение твердости <i>HB</i> по переводной таблице
1	2	3	4

Содержание отчета

В отчете по лабораторной работе должны быть приведены:

1. Наименование работы и ее цель.
2. Оборудование и материалы, используемые при выполнении работы.
3. Краткое описание методов определения твердости и область их применения.
4. Значение данного метода испытания для определения свойств металлов и сплавов.
5. Таблицы экспериментальных данных и выводы по этим данным.

Контрольные вопросы

1. На каком принципе основано определение твердости по методу Бринелля?
2. Каким методом определяют твердость закаленной стали?
3. Каким методом определяют твердость отожженной (мягкой) стали?
4. Какой наконечник используют при определении микротвердости?
5. Какой метод используется при определении твердости тонких поверхностных слоев?
6. Каким методом определяют твердость отдельных зерен?
7. Какие нагрузки применяются при определении твердости по методу Роквелла?
8. Как можно предварительно оценить твердость образца?
9. Как нужно подготовить образец к испытанию твердости?
10. Какой метод измерения твердости является более универсальным: по Бринеллю или по Роквеллу?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица определения твердости по Бринеллю

Диаметр отпечатка d_{10} , или $2d_5$, или $4d_{2,5}$	Число твердости по Бринеллю при нагрузке P (кгс), равной			Диаметр отпечатка d_{10} , или $2d_5$, или $4d_{2,5}$	Число твердости по Бринеллю при нагрузке P (кгс), равной		
	$30 D^2$	$10 D^2$	$2,5 D^2$		$30 D^2$	$10 D^2$	$2,5 D^2$
2,00	945	315,2		4,00	229	76,3	19,1
2,05	901	299,5		4,05	223	74,3	18,6
2,10	857	285,6		4,10	217	72,4	18,1
2,15	822	272,8		4,20	207	68,8	17,2
2,20	778	260		4,25	201	67,1	16,8
2,25	745	248,2		4,30	197	65,5	16,4
2,30	712	237,6		4,35	192	63,8	16,0
2,35	682	227		4,40	187	62,4	15,6
2,40	654	218,1		4,45	183	60,9	15,2
2,45	625	208,8		4,50	179	59,5	14,9
2,50	597	200,6		4,55	174	58,1	14,5
2,55	577	192,4		4,60	170	56,8	14,2
2,60	556	185,2		4,65	167	55,5	13,9
2,65	531	176,8		4,70	163	54,3	13,6
2,70	515	171,5		4,75	159	53,0	13,3
2,75	489	165,3		4,80	156	51,9	13,0
2,80	477	159,2		4,85	152	50,7	12,7
2,85	455	153,7		4,90	149	49,6	12,4
2,90	444	148,2		4,95	146	48,6	12,2
2,95	429	143,2		5,00	143	47,5	11,9
3,00	415	138,3	34,6	5,05	140	46,5	11,6
3,05	401	133,6	33,4	5,10	137	45,5	11,4
3,10	388	129	32,3	5,15	134	44,6	11,2
3,15	375	125	31,3	5,20	131	43,7	10,9
3,20	363	121	30,3	5,25	128	42,8	10,7
3,25	352	117	29,3	5,30	126	41,9	10,5
3,30	341	114	28,4	5,35	123	41,0	10,3
3,35	331	110	27,6	5,40	121	40,2	10,1
3,40	321	107	26,7	5,45	118	39,4	9,86
3,45	311	104	25,9	5,50	116	38,6	9,66
3,50	302	101	25,2	5,55	114	37,9	9,46
3,55	293	97,7	24,5	5,60	111	37,1	9,27
3,60	285	95,0	23,7	5,65	109	36,4	9,10
3,65	277	92,3	23,1	5,70	107	35,7	8,93
3,70	269	89,7	22,4	5,75	105	35,0	8,76
3,75	262	87,2	21,8	5,80	103	34,3	8,59
3,80	255	84,9	21,2	5,85	101	33,7	8,43
3,85	248	82,6	20,7	5,90	99,2	33,1	8,26
3,90	241	80,4	20,1	5,95	97,3	32,4	8,11
3,95	235	78,3	19,6	6,00	95,5	31,8	7,96

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица сопоставления значений твердости

<i>HV</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HRA</i>	<i>HV</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HRA</i>
240	228	20,3	60,7	510	475	49,8	75,7
245	233	21,3	61,2	520	483	50,5	76,1
250	237	22,2	61,6	530	492	51,1	76,4
255	242	23,1	62,0	540	500	51,7	76,7
260	247	24,0	62,4	550	509	52,3	77,0
265	252	24,8	62,7	560	517	53,0	77,4
270	256	25,6	63,1	570	526	53,6	77,8
275	261	26,4	63,5	580	535	54,1	78,0
280	266	27,1	63,8	590	543	54,7	78,4
285	271	27,8	64,2	600	552	55,2	78,6
290	275	28,5	64,5	610	560	55,7	78,9
295	280	29,2	64,8	620	569	56,3	79,2
300	285	29,8	65,2	630	577	56,8	79,5
310	294	31,0	65,8	640	586	57,3	79,8
320	304	32,2	66,4	650	—	57,8	80,0
330	313	33,3	67,0	660	—	58,3	80,3
340	323	34,4	67,6	670	—	58,8	80,6
350	332	35,5	68,1	680	—	59,2	80,8
360	342	36,6	68,7	690	—	59,7	81,1
370	351	37,7	69,2	700	—	60,1	81,3
380	361	38,8	69,8	720	—	61,0	81,8
390	370	39,8	70,3	740	—	61,8	82,2
400	380	40,8	70,8	760	—	62,5	82,6
410	390	41,8	71,4	780	—	63,3	83,0
420	399	42,7	71,8	800	—	64,0	83,4
430	408	43,6	72,3	820	—	64,7	83,8
440	418	44,5	72,8	840	—	65,3	84,1
450	423	45,3	73,3	860	—	65,9	84,4
460	432	46,1	73,6	880	—	66,4	84,7
470	442	46,9	74,1	900	—	67,0	85,0
480	450	47,7	74,5	920	—	67,5	85,3
490	456	48,4	74,9	940	—	68,0	85,6

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ. ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

Цель работы

1. Изучить механизм и кинетику процесса кристаллизации.
2. Изучить макроструктуру металлических слитков.
3. Изучить влияние условий кристаллизации на структуру и механические свойства металла.

Материалы и оборудование для выполнения работы

Водные растворы солей (хромпика $K_2Cr_2O_7$, перманганата калия $KMnO_4$, поваренной соли $NaCl$), биологические микроскопы, металлические слитки, сплав алюминия с кремнием (силумин), муфельная электропечь с термопарой и автоматическим потенциометром, металлическая форма (кокиль), керамическая форма, маятниковый копер МК-30.

Основные положения

Кристаллизация – это процесс перехода вещества из жидкого состояния в твердое, кристаллическое. В расплавленном металле нет дальнего порядка: расстояния между атомами не являются постоянными, объемы с упорядоченным расположением атомов то возникают, то снова исчезают (рис. 1, а). В процессе кристаллизации устанавливается *дальний порядок*: атомы располагаются на определенных расстояниях по каждому пространственному направлению, образуя *кристаллическую решетку* (рис. 1, б). Такое упорядоченное расположение возникает за счет равновесия сил притяжения и отталкивания между атомами и соответствует минимуму энергии взаимодействия атомов в металле.

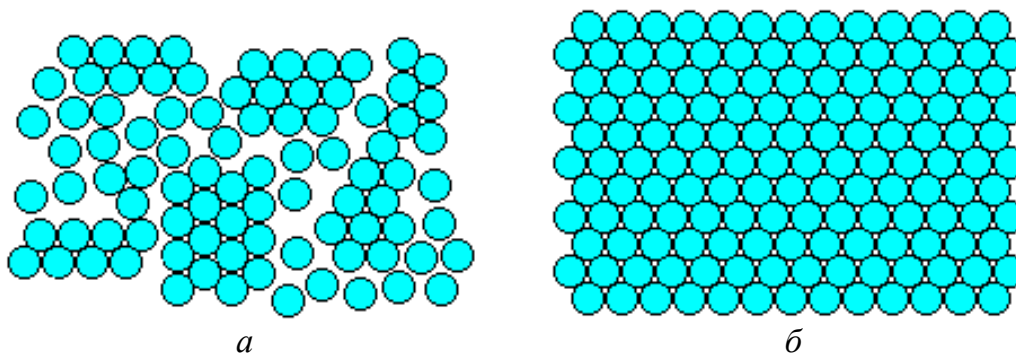


Рис. 1. Расположение атомов в жидком (а) и твердом (б) металле

Процесс кристаллизации может идти самопроизвольно, а может вызываться какими-то искусственными причинами.

Самопроизвольно идут только те термодинамические процессы, которые приводят к уменьшению свободной энергии системы (*Свободная энергия F* – это изменяемая часть полной энергии системы.). С повышением температуры металла его свободная энергия как в жидком, так и в твердом состоянии снижается, но с разной скоростью: свободная энергия жидкого металла снижается быстрее (рис. 2). Поэтому кривые зависимости свободной энергии от температуры пересекаются при какой-то температуре T_S . При любой температуре ниже T_S меньшим уровнем свободной энергии обладает твердый металл, поэтому, если охладить расплав до температуры $T_1 < T_S$, начнется кристаллизация. И наоборот, при температурах выше T_S устойчиво жидкое состояние, поскольку жидкий металл имеет меньший уровень свободной энергии. Значит, нагрев до $T_2 > T_S$ приведет к плавлению.

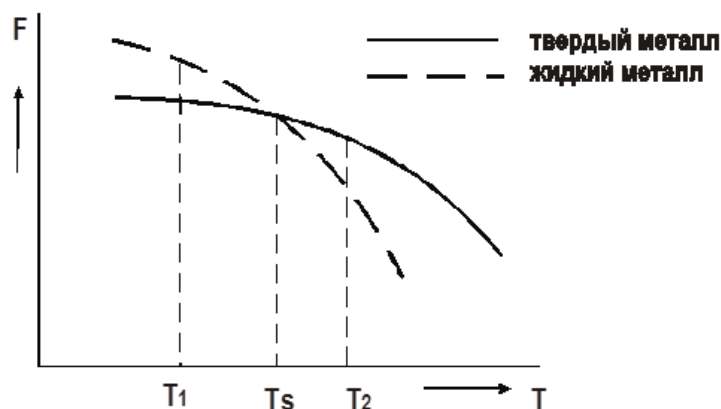


Рис. 2. Зависимости свободной энергии металла от температуры

Температура T_S , при которой свободная энергия металла в твердом и жидком состоянии одинакова, называется **теоретической температурой кристаллизации**. При этой температуре жидкость и кристаллы находятся в равновесии, поэтому металл одновременно находится и в жидком, и в твердом агрегатном состоянии.

Чтобы кристаллизация осуществилась, необходимо некоторое переохлаждение относительно теоретической температуры кристаллизации. В таком случае образование кристаллов дает выигрыш в свободной энергии, что и является стимулом процесса. Поэтому на самом деле кристаллизация всегда происходит при температуре ниже T_S . *Реальная температура кристаллизации T_p* всегда меньше теоретической. Разность между теоретической и реальной температурой кристаллизации называется **степенью переохлаждения ΔT** :

$$\Delta T = T_S - T_p.$$

Измеряя температуру металла в процессе кристаллизации, можно получить *кривую охлаждения* (рис. 3). Это график в координатах «температура – время». На этой кривой имеется горизонтальный участок, соответствующий переходу металла из жидкого состояния в твердое. Постоянная температура на этом участке поддерживается за счет выделения *скрытой теплоты кристаллизации*.

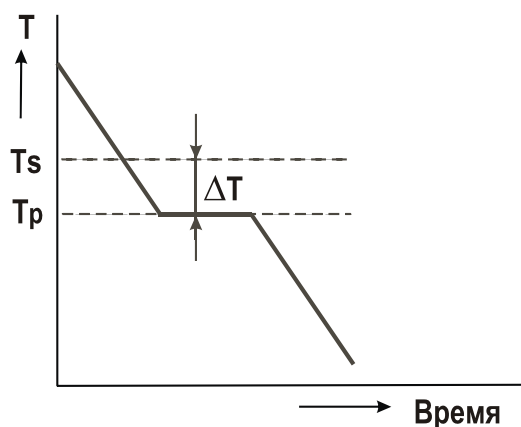


Рис. 3. Кривая охлаждения расплавленного металла

Степень переохлаждения при кристаллизации не является постоянной величиной. Она увеличивается с увеличением скорости охлаждения металла. В реальных заводских условиях изготовления отливок степень переохлаждения обычно не превышает 20–30°, но для очень чистых металлов может достигать нескольких сотен градусов.

Механизм процесса кристаллизации можно представить в виде двух элементарных процессов:

1. Образование в жидкости центров кристаллизации (зародышей, мельчайших твердых частиц).
2. Рост кристаллов из образовавшихся зародышей.

Скорости этих элементарных процессов зависят от степени переохлаждения ΔT или скорости охлаждения металла V . Эта зависимость показана на рис. 4.

Как уже говорилось, в большинстве случаев процессы кристаллизации металла на металлургических заводах, в литейных цехах происходят при сравнительно небольших степенях переохлаждения (левая часть графика на рис. 4).

Из приведенной на рис. 4 зависимости видно, что при малых скоростях охлаждения и малых степенях переохлаждения (например, ΔT_1 и V_1) получается небольшая скорость образования зародышей (c_1). Следовательно, в кристаллизующейся жидкости образуется небольшое число центров кристаллизации и из них вырастает небольшое число кристаллов, что приводит к появлению крупнозернистой структуры после затвердевания металла. Схематически это показано на рис. 5.

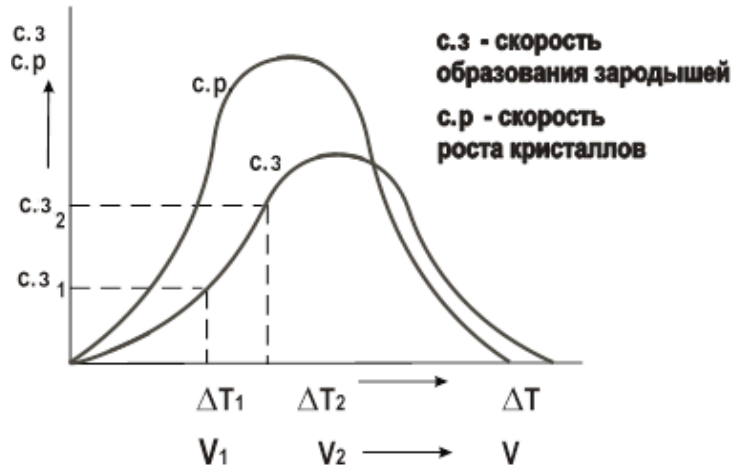


Рис. 4. Зависимость скорости процесса кристаллизации от степени переохлаждения

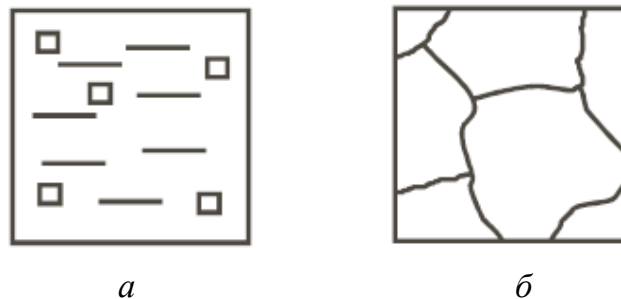


Рис. 5. Кристаллизация при медленном охлаждении: а – начало процесса; б – окончание процесса

Если же кристаллизация происходит при больших скоростях охлаждения и больших степенях переохлаждения (ΔT_2 , V_2), то в жидкости образуется большое количество центров кристаллизации (с.з.₂) и из них, соответственно, вырастает большое число кристаллов. Металл при этом получается мелкозернистый (рис. 6).

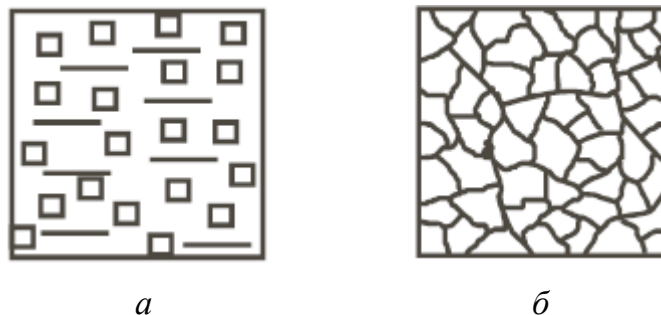


Рис. 6. Кристаллизация при быстром охлаждении: а – начало процесса; б – окончание процесса

Столкновение растущих кристаллов приводит к потере ими правильной огранки. Такие потерявшие правильную форму кристаллы называются *зернами*.

При очень маленькой скорости охлаждения (крайняя левая точка на рис. 4) может возникнуть один-единственный центр кристаллизации, из которого вырастет один кристалл (*монокристалл*). Необходимые в электронике монокристаллы полупроводников выращивают путем очень медленного вытягивания затравки из расплава.

При огромных скоростях охлаждения (крайняя правая точка на рис. 4) достигаются такие большие степени переохлаждения, что тепловое движение атомов в металле замедляется, атомы не успевают образовать дальний порядок, выстроиться в кристаллическую решетку. Жидкое, неупорядоченное состояние металла оказывается как бы «замороженным». Металл становится твердым, но не имеет кристаллического строения. Это *аморфный металл* или *металлическое стекло*. Аморфные металлы широко применяются в современной аудиотехнике благодаря уникальным магнитным свойствам.

Поскольку структура металла определяет его свойства, рассмотренные закономерности кристаллизации могут быть использованы для формирования необходимых свойств металла при отливке деталей.

Мелкозернистый металл обладает более высоким сопротивлением деформации и большей вязкостью. Дело в том, что границы зерен являются барьером для развития деформации и для роста трещины. В металле с мелким зерном суммарная поверхность зерен в единице объема больше, чем в крупнозернистом. Поэтому и сопротивление мелкозернистого металла деформированию и разрушению больше. Чтобы разрушить металл с мелким зерном, требуется затратить больше энергии.

Поэтому при отливке деталей, испытывающих значительные нагрузки при эксплуатации, целесообразно проводить процесс кристаллизации при высокой скорости охлаждения, чтобы получить мелкозернистую структуру. Если необходимую скорость кристаллизации обеспечить не удастся (в отливках большой массы), то для измельчения зерна в жидкий металл вводят небольшие добавки примесей в виде мелких нерастворимых в расплаве частиц, увеличивая тем самым число центров кристаллизации. Такой процесс называется *модифицированием*, а вводимые добавки – *модификаторами*.

В качестве модификаторов обычно применяются мелкие частицы карбидов, оксидов (Cr_7C_3 , VC , TiC , Al_2O_3 и др.) и некоторые вещества, облегчающие образование зародышей в жидкости (B , Mg и др.). Измельчению зерна способствует также вибрация кристаллизующегося металла.

Следует иметь в виду, что при получении отливок затвердевание металла в форме происходит с разными скоростями охлаждения в различных ее частях. Скорость охлаждения уменьшается от стенки формы к центральной ее части, при этом меняется и направление теплоотвода в

местах роста кристаллов. В результате полученный слиток имеет неодинаковое строение по сечению, а значит и разные свойства (рис. 7). Поверхностный слой будет мелкозернистый (т. е. с высокими механическими свойствами), а центральная часть слитка – крупнозернистая.

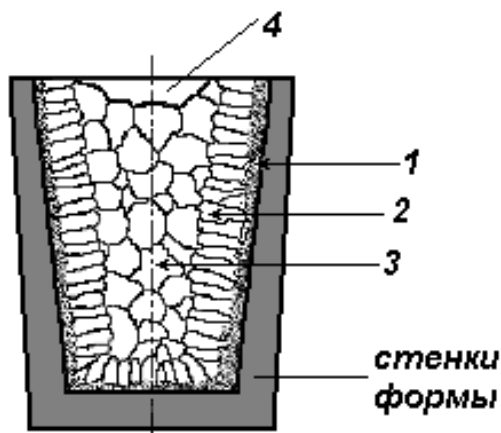


Рис. 7. Характерные зоны слитка: 1 – корка (зона мелких, по-разному ориентированных кристаллов); 2 – зона столбчатых кристаллов, растущих в направлении, обратном направлению теплоотвода; 3 – зона крупных, произвольно ориентированных кристаллов; 4 – усадочная раковина в верхней части слитка

Размер этих зон существенно меняется в зависимости от состава металла и условий кристаллизации.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомится с основными сведениями по теме работы.
2. С помощью биологического микроскопа проследить ход кристаллизации различных солей из пересыщенных водных растворов. Зарисовать начальную, промежуточную и конечную стадии кристаллизации, изобразить характерную форму кристаллов каждой соли. При этом обратить внимание, в каких местах капли раствора процесс кристаллизации начинается раньше и протекает интенсивнее. Описать и объяснить результаты наблюдений.
3. Изучить и зарисовать макроструктуру слитка металла. Указать на рисунке зоны кристаллизации, объяснить их образование.
4. Расплавить алюминиевый сплав (силумин) и залить в металлическую и керамическую формы. После затвердевания и охлаждения слитков провести испытания на ударную вязкость на маятниковом копре, зарисовать макроструктуру изломов. Объяснить различие в строении и свойствах слитков, полученных в металлической и керамической формах.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Основные положения по теме работы (кратко).
3. Описание отдельных стадий выполнения работы с указанием используемого оборудования с необходимыми пояснениями, цифровыми данными, зарисовками.
4. Анализ полученных результатов, выводы.

Контрольные вопросы

1. Что является движущей силой процесса кристаллизации?
2. Каков механизм кристаллизации металла?
3. Что такое степень переохлаждения?
4. Почему структура слитка неодинакова по сечению?
5. Как влияет скорость охлаждения при кристаллизации на структуру металла?
6. Как можно получить мелкозернистый металл?
7. Как влияет структура металла на механические свойства?
8. Почему свойства крупнозернистого и мелкозернистого металла различны?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, НАКЛЕП И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Цель работы

1. Изучить влияние пластической деформации на структуру и механические свойства металлов.
2. Изучить влияние нагрева на свойства деформированного металла.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Нагревательные печи с термопарами и автоматическими приборами для регулирования температуры.
2. Пневматический ковочный молот.
3. Твердомеры Бринеля ТШ-2.
4. Образцы технической чистой меди.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными положениями работы.
2. Выполнить экспериментальную часть работы.
3. Проанализировать полученные результаты и на основании теоретического материала сделать необходимые выводы.
4. Выполнить одну из задач (по указанию преподавателя) и пояснить решение.

Основные положения

1. Пластическая деформация металлов

Важнейшим и наиболее характерным свойством металлов является **пластичность** – способность претерпевать деформацию (изменять форму и размеры) без разрушения. В сочетании с высокой прочностью это свойство делает металлы незаменимыми для современной техники. Деформация, которая исчезает после снятия нагрузки, – это **упругая деформация**. Часть деформации, которая остается после снятия нагрузки, – это **пластическая деформация**. Чем больше остаточная деформация металла до разрушения, тем выше его пластичность.

При упругом деформировании под действием внешней силы изменяется расстояние между атомами, и в кристаллической решетке возникают дополнительные силы притяжения или отталкивания. Снятие нагрузки устраняет причину изменения межатомного расстояния, атомы становятся на прежние места под действием дополнительных сил, существующих между ними, и упругая деформация исчезает.

Значительно более сложно проходит процесс пластической деформации, которая осуществляется при напряжениях, больших предела упругости металла.

В конечном итоге пластическая деформация представляет собой сдвиг одной части кристалла относительно другой. Каков же механизм этого процесса? Естественно предположить одновременное смещение всех атомов одного слоя по отношению к атомам соседнего слоя по плоскости сдвига MM (рис. 1) – так скользят бумажные листы в пачке бумаги при сдвиге ее верхней части. Усилие, которое надо приложить для осуществления такого сдвига, можно подсчитать и таким образом определить теоретическую прочность. Такой расчет был сделан Я.И. Френкелем, и получилось, что для железа прочность должна быть равна 1300 кгс/мм^2 , тогда как в действительности предел прочности железа – 15 кгс/мм^2 , т. е. в 100 раз меньше.

Объяснение реального механизма сдвиговых процессов дает теория **дислокаций** – особого рода линейных несовершенств (дефектов) кристаллической решетки. Представления о дислокациях были введены в металлофизику для того, чтобы объяснить несоответствие между наблюдаемой и теоретической прочностью кристаллов и описать механизм скольжения атомных слоев при пластической деформации кристаллов. Если на первых этапах развития этой теории представления о дислокациях были предположительными, то затем были получены прямые доказательства их существования, а в настоящее время имеются многочисленные данные наблюдения дислокаций.

Наиболее простой и наглядный способ образования дислокаций в кристалле – сдвиг (рис. 2, *a*). Если сдвиг произошел только в части плоскости скольжения и охватывает площадку $ABCD$, то граница AB между участком, где скольжение уже произошло, и ненарушенным участком в плоскости скольжения и будет дислокацией. Атомная плоскость, перпендикулярная к плоскости скольжения и проходящая через AB , является как бы лишней и ее называют **экстраплоскостью**, а дислокацию AB – **краевой дислокацией**, обозначаемой знаком \perp .

Возможны и другие виды дислокаций, например **винтовая** (рис. 3, *a*) или **смешанная** (рис. 4, *a*). Винтовая дислокация получила свое название из-за того, что кристалл при этом можно считать состоящим из одной атомной плоскости, закрученной по винтовой поверхности вокруг дислокации AB (рис. 3, *a*).

Нетрудно увидеть, что движение дислокаций через кристалл вызывает пластическую (необратимую) деформацию кристалла (рис. 2–4, *б, в, г*). Перемещение дислокаций происходит по схеме, изображенной на рис. 5.

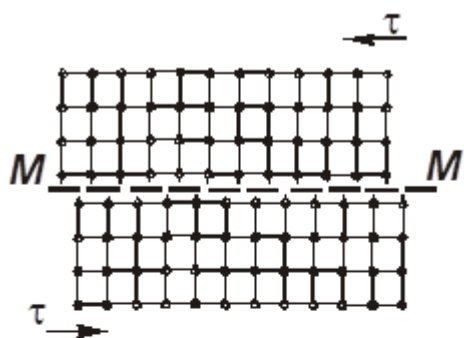


Рис. 1

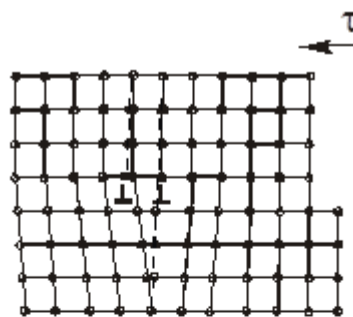
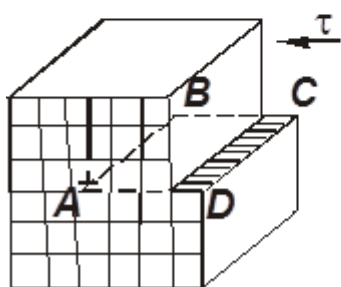
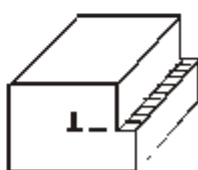


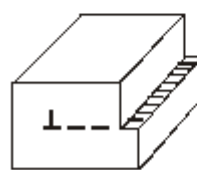
Рис. 5



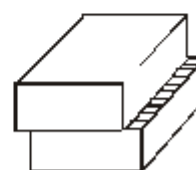
а



б

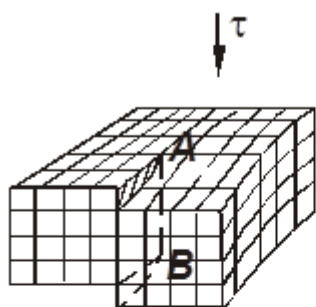


в

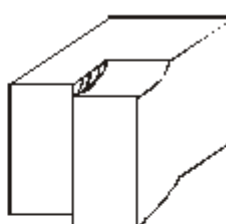


г

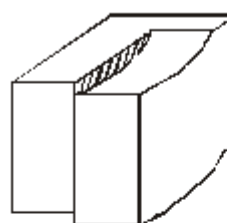
Рис. 2



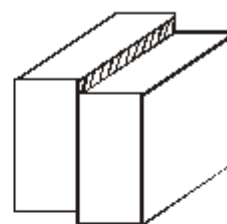
а



б

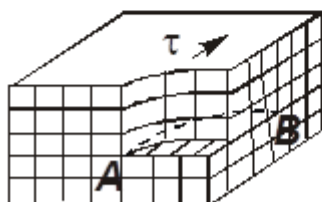


в

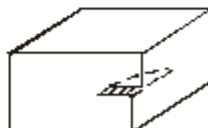


г

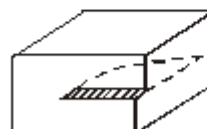
Рис. 3



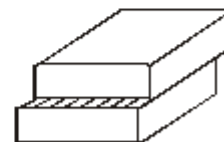
а



б



в



г

Рис. 4

Из схемы (рис. 5) видно, что для **перемещения** дислокации на одно межатомное расстояние каждый атом экстраплоскости и плоскости в нижней части кристалла **смещается** на величину значительно меньше

межатомного расстояния. При поочередном (эстафетном) смещении атомов дислокация скользит на большие расстояния через весь кристалл, вызывая его пластическую деформацию.

При сдвиге одной части идеального кристалла относительно другой необходимо разорвать **одновременно сразу все** межатомные связи между граничными атомами по обе стороны от плоскости скольжения (рис. 1), а в реальном металле, при **перемещении дислокации** по плоскости скольжения, разрываются **одновременно** межатомные связи **только между двумя соседними цепочками атомов** (рис. 5). Именно этим объясняются более низкие значения сдвигающего напряжения и прочности у реальных металлов.

Интересно, что и в живой природе используется дислокационный принцип движения, например, змеи и гусеницы обычно ползают за счет образования складки («положительной дислокации») около хвоста и продвижения этой складки в сторону головы.

2. Наклеп и рекристаллизация металлов

Наиболее впечатляющим свойством металлов при пластической деформации является деформационное упрочнение, или способность металлов становиться прочнее при деформации. Из дислокационной теории следует, что для упрочнения металлов необходимо каким-либо образом затруднить движение дислокаций.

Существует несколько способов упрочнения или закрепления дислокаций, одним из них является упрочнение кристалла пластической деформацией. Ранее рассмотренный простейший способ введения дислокаций в кристалл при сдвиге показывает, что рост пластической деформации увеличивает количество дислокаций в кристалле. Чем сильнее воздействие на металл, тем больше в нем образуется дислокаций. На начальной стадии деформация происходит за счет скольжения относительно небольшого количества дислокаций. В процессе деформирования количество движущихся в кристалле дислокаций постоянно увеличивается, что затрудняет их скольжение. Возникают скопления дислокаций, которые уже неспособны перемещаться по кристаллу. Такие закрепленные дислокации затрудняют движение вновь возникающих дислокаций, т. е. упрочнение металла создается самими дислокациями. В этом случае говорят об упрочнении пластической деформацией или просто о **наклепе** металла.

Пластическая деформация оказывает существенное влияние на механические свойства металла и его структуру (рис. 6).

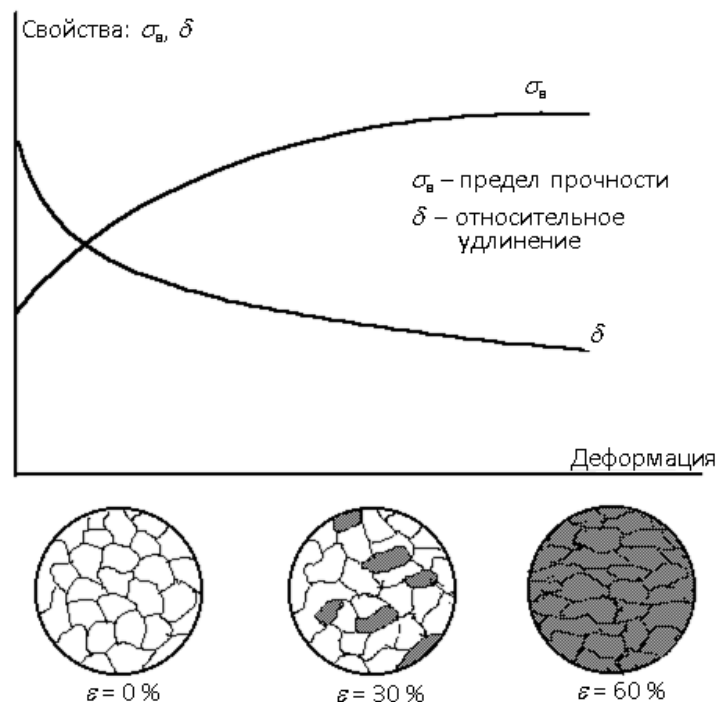


Рис. 6. Изменение структуры и свойств деформированного металла в зависимости от степени деформации

На рис. 6 показано, как под действием приложенной нагрузки зёрна, из которых состоят все технические металлы, начинают деформироваться и вытягиваться; объём зерен и их количество при этом не изменяется. Внутри каждого зерна, особенно по его границам, сосредотачивается большое количество дислокаций, плотность которых возрастает от 10^6 – 10^7 см⁻² (для недеформированного металла) и до 10^{10} – 10^{12} см⁻² (для деформированного). Кристаллическая решетка зерен становится искаженной (несовершенной), это состояние является структурно неустойчивым. С увеличением степени деформации прочность металла увеличивается, а пластичность уменьшается, что может привести к возникновению трещин и разрушению (при большой степени деформации).

Для снятия наклепа деформированный металл нагревают, в результате сначала происходят процессы *возврата* и *полигонизации*, приводящие к перераспределению и уменьшению концентрации структурных несовершенств (точечных и линейных дефектов) в кристаллической решетке. При дальнейшем повышении температуры начинается основной процесс, возвращающий наклепанный металл в устойчивое состояние – *рекристаллизация*. Это полная или частичная замена деформированных зерен данной фазы новыми, более совершенными зернами той же фазы (рис. 7). Новые зерна, зарождающиеся при рекристаллизации, отличаются меньшей плотностью дефектов (дислокаций) и растут за счет деформированных зерен. Рекристаллизация – диффузионный про-

цесс, протекающий в течение какого-то времени (чем выше температура, тем быстрее).

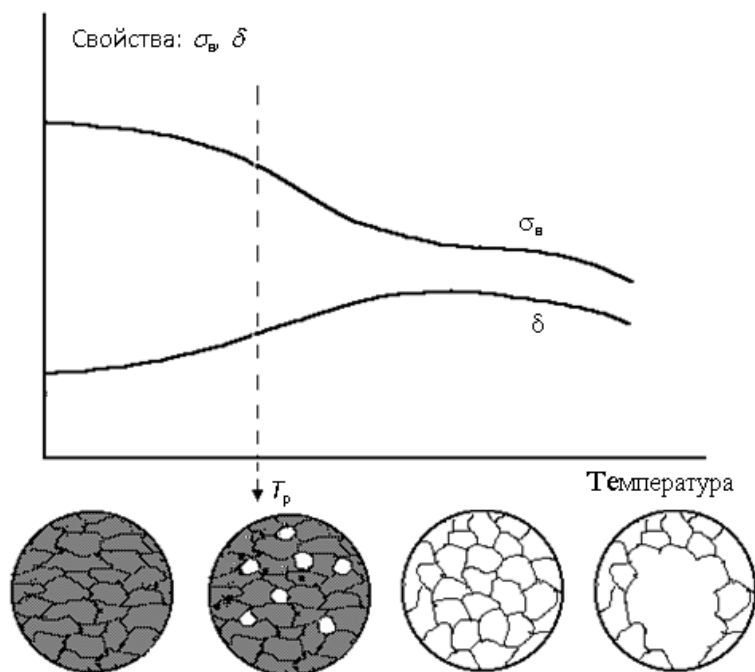


Рис. 7. Изменение структуры и свойств деформированного металла при нагреве

Наименьшую температуру, при которой начинается процесс рекристаллизации и происходит разупрочнение, называют **температурой рекристаллизации**. Между температурой рекристаллизации (T_p) и температурой плавления ($T_{пл}$) металлов существует простая зависимость, определенная металловедом А.А. Бочваром:

$$T_p = \alpha \cdot T_{пл} \text{ (К)}.$$

Ниже приведена температура рекристаллизации металлов и сплавов:

$$T_p = (0,1 \div 0,2) \cdot T_{пл} \text{ — для чистых металлов;}$$

$$T_p = 0,4 \cdot T_{пл} \text{ — для технически чистых металлов;}$$

$$T_p = (0,5 \div 0,6) \cdot T_{пл} \text{ — для сплавов (твердых растворов).}$$

Температуру начала рекристаллизации определяют металлографическим и рентгеноструктурным методами, а также по изменению свойств. Если T_p определяют по изменению твердости, то за T_p принимают температуру, при которой прирост твердости, созданный деформацией, уменьшается вдвое (рис. 8).

Определение температуры рекристаллизации необходимо для назначения режимов **рекристаллизационного отжига** — термической обработки для снятия наклепа. Температура такого отжига должна быть выше температуры рекристаллизации для данного сплава.

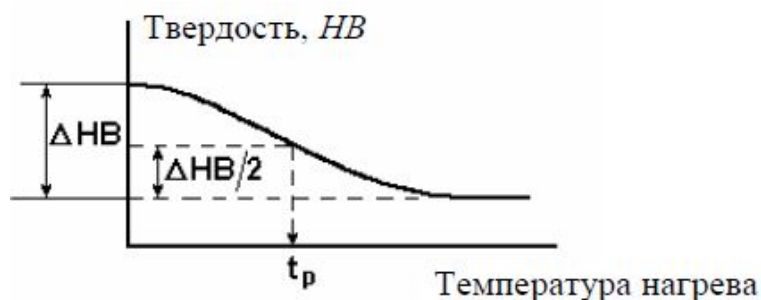


Рис. 8. Определение температуры рекристаллизации по изменению твердости при нагреве

Величина зерен после рекристаллизации (рекристаллизационного отжига) напрямую зависит от степени деформации металла при наклепе (рис. 9).

Существует небольшая степень деформации (до 10 %), называемая **критической**, при которой размер образующегося при рекристаллизации зерна в несколько десятков раз превышает исходное, недеформированное зерно. Это явление очень часто встречается в деталях машин, в которых одновременно присутствует набор деформаций от 0 до больших степеней, и его следует учитывать, так как на участках с крупнозернистой структурой сильно снижается ударная вязкость, хотя в некоторых других случаях (например: повышение жаропрочности, получение требуемых электромагнитных свойств, увеличение размера зерна) является положительным.



Рис. 9. Влияние степени деформации на величину рекристаллизованного зерна

Формирование аномально крупных рекристаллизованных зерен в области критической деформации обусловлено наличием малого числа центров рекристаллизации (центров новых зерен). Новые зерна зарождаются в первую очередь там, где при наклепе возникла наибольшая плотность дислокаций. Так как движущиеся дислокации задерживаются и скапливаются на границах зерен, то именно здесь начнут образовываться и расти новые зерна в процессе рекристаллизации.

С увеличением степени деформации размер новых рекристаллизованных зерен уменьшается. Это связано с увеличением плотности дислокаций в деформированном металле и соответственно с увеличением числа центров рекристаллизации (центров новых зерен).

В зависимости от температуры, при которой выполняется обработка давлением, пластическую деформацию разделяют на холодную и горячую.

Холодная деформация – деформация металла, которая осуществляется при температуре ниже температуры рекристаллизации. При холодной деформации увеличивается плотность дислокаций, зерна вытягиваются в направлении деформации, увеличивается прочность металла и снижается пластичность.

Горячая деформация – деформация металла, которая осуществляется при температуре выше температуры рекристаллизации. При горячей деформации металла (прокатке, ковке, штамповке, прессовании) упрочнение (наклеп), создаваемое в процессе деформации, снимается в результате рекристаллизации в ходе самой деформации.

Задания для выполнения работы (для подгруппы 2–4 человека)

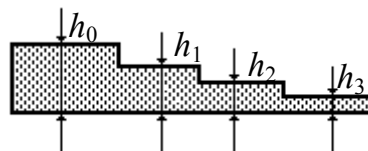
1. Для образцов меди, деформированных на 30–40 %, определить температуру рекристаллизации меди по изменению твердости после нагрева на различную температуру (по графической зависимости «твердость – температура»). За центр температурного интервала принять температуру рекристаллизации меди, определенную по формуле А.А. Бочвара. Температурный шаг от центра интервала в сторону уменьшения и увеличения температуры принять 50 °С.

Сравнить температуру рекристаллизации меди, определенную по формуле А.А. Бочвара, и найденную экспериментально; если они отличаются, – объяснить причину. Температура плавления меди составляет 1083 °С.

2. Провести холодную деформацию образцов технической чистой меди на различную степень деформации и определить изменение твердости деформированных образцов в зависимости от степени деформации.

Степень деформации рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = (h_0 - h_K) \cdot 100 / h_0, \%$$



где h_0 – толщина образца до деформации, h_K – толщина образца после деформации.

Результаты измерений внести в табл. 1 и построить графическую зависимость твердости от степени деформации.

Таблица 1

Результаты эксперимента: твердость деформированной меди

№ п/п	Исходная толщина h_0 , мм	Конечная толщина h_k , мм	Степень деформации ε , %	Твердость HV	Примечание

3. Провести горячую деформацию образцов технически чистой меди на различную степень деформации и определить изменение твердости горячедеформированных образцов в зависимости от степени деформации. Результаты измерений внести в табл. 1 и построить графическую зависимость твердости от степени горячей деформации.

4. Холоднодеформированные образцы меди подвергнуть рекристаллизационному отжигу в течение 10 минут и определить изменение твердости отожженных образцов в зависимости от степени деформации. Результаты измерений внести в табл. 1 и построить графическую зависимость.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Оборудование и материалы, используемые в работе.
3. Основные положения по деформации, наклепу и рекристаллизации металлов (кратко).
4. Описание экспериментальной части работы и полученные результаты с необходимым графическим материалом, анализом, выводами.
5. Обоснованное решение указанной преподавателем задачи.

Задачи

1. Объясните старинный цирковой номер: почему согнутую силой подкову предлагалось разогнуть зрителям, а не наоборот?
2. Детали из низкоуглеродистой стали, полученные штамповкой в холодном состоянии, имели после штамповки неодинаковую твердость в различных участках: она колебалась от 120 HV до 200 HV . Твердость стали до обработки составляла 100 HV . Объясните, почему сталь получила разную твердость.
3. Объяснить, можно ли отличить по микроструктуре металл, деформированный в холодном состоянии, от металла, деформированного в горячем состоянии, и указать, в чем заключается различие микроструктуры.

4. Три образца низкоуглеродистой стали подвергались холодной деформации: первый на 5 %, второй на 15 %, третий на 30 %, а затем нагревались до 700 °С. Указать, в каком образце сформируется более крупное зерно. Как повлияет размер зерна на свойства стали?

5. Объяснить, почему при горячей обработке давлением не рекомендуется проводить последнюю операцию с малой степенью обжатия и как может такая деформация влиять на величину зерна и свойства металла.

6. Объяснить, можно ли создать значительное упрочнение свинца, если его подвергнуть деформации при комнатной температуре,

$$(t_{\text{пл}} \text{Pb} = 327,4 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

7. Указать, как повлияет на значение твердости, определенной, например, шариком по Бринеллю, повторное измерение на участке, в непосредственной близости от него.

8. Волочение проволоки проводят в несколько переходов. Если волочение выполняют без промежуточных операций отжига, то проволока на последних переходах дает разрывы. Объяснить причины разрывов и указать меры для предупреждения этого.

9. Прутки латуни после изгиба в холодном состоянии подвергают рекристаллизации для снятия наклепа. Указать, какие по размеру зерна сформируются по всему сечению прутка после рекристаллизации.

10. Объяснить, к какому виду деформации – холодной или горячей – надо отнести:

а) прокатку олова при комнатной температуре ($t_{\text{пл}} \text{Sn} = 232 \text{ } ^\circ\text{C}$);

б) деформацию стали при 400 °С ($t_{\text{пл}} \text{стали} = 1500 \text{ } ^\circ\text{C}$).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ

Цель работы

1. Изучить основные разновидности диаграмм состояния двойных сплавов.
2. Научиться определять по диаграмме состояния возможность проведения термической обработки сплавов, их упрочнения.

Порядок выполнения работы

1. Прочитайте внимательно основные сведения о диаграммах состояния сплавов, о возможностях термической обработки сплавов, особенно с целью упрочнения.
2. Выполните все пункты задания на карточке (по указанию преподавателя). Проанализируйте полученный материал и сделайте выводы о возможностях использования диаграмм состояния для практической работы со сплавами.
3. Поясните, какие сплавы металлических систем могут подвергаться упрочняющей термической обработке.

Основные положения

Для практической работы с двойными сплавами необходимо знать их структуру, возможность ее изменения с изменением температуры и состава сплава и, таким образом, судить о свойствах сплавов и о возможностях изменения свойств в нужном направлении. Необходимость изменить структуру и свойства сплавов может возникнуть, если при получении детали методом литья произошла внутрикристаллическая ликвация, если нужно упрочнить сплав термической обработкой и в некоторых других случаях. Для определения возможности проведения термической обработки и назначения ее температурного режима нужно знать закономерности изменения фазового состава в зависимости от температуры и химического состава сплава в данной системе. Графическая зависимость, содержащая эту информацию, называется **диаграммой состояния**. Диаграммы состояния позволяют получать разностороннюю информацию о сплавах. С их помощью можно судить о литейных свойствах сплавов и соответственно о возможности получения из них отливок, о склонности сплавов к внутрикристаллической ликвации и ликвации по удельному весу при кристаллизации, о пластичности раз-

личных сплавов и возможности их пластического деформирования при изготовлении изделий.

Чаще всего для построения диаграмм состояния металлических систем используют термический анализ, основанный на том, что плавление, кристаллизация и все структурные изменения сплавов в твердом состоянии происходят с тепловыми эффектами (с поглощением или выделением тепла). Следовательно, снимая кривые нагрева или охлаждения сплавов разного состава какой-либо системы, можно зафиксировать температуры, при которых происходят те или иные изменения в структуре. Если затем эту информацию представить графически в координатах «температура – состав сплава», то получится диаграмма состояния системы. На диаграмме состояния будут по крайней мере две линии: начала кристаллизации (*ликвидус*) и окончания кристаллизации (*солидус*). У многих сплавов, кроме того, происходят различные превращения в твердом состоянии, что тоже отражается линиями на диаграмме.

В зависимости от характера взаимодействия компонентов в сплаве, соответствия или различия в их атомно-кристаллическом строении возможно образование различных фаз: твердых растворов, механической смеси кристаллов отдельных компонентов, химических соединений и др. Это взаимодействие описывается различными видами диаграмм состояния с разными возможностями изменения структуры и проведения термической обработки сплавов.

Определение состава и количества фаз

В процессе кристаллизации изменяются и концентрация фаз, и количество каждой фазы. В любой точке диаграммы, когда в сплаве одновременно существуют две фазы, можно определить количество обеих фаз и их концентрацию. Для этого служат правило отрезков и правило концентраций.

Правило концентраций

Для определения *состава фаз*, находящихся в равновесии при любой температуре, лежащей между линиями ликвидус и солидус (например, в точке *c*, рис. 1), нужно провести через эту точку прямую, параллельную оси концентраций, до пересечения с линиями солидус и ликвидус (линия *acb*). Точки *a* и *b* пересечения этой прямой с линиями диаграммы, ограничивающими данную область, определяют присутствующие в сплаве фазы (в нашем случае – жидкость и кристаллы α). Проекция точки *a* пересечения этой линии с ликвидусом на ось концентраций (точка *a'*) указывает состав жидкой фазы, а проекция точки *b* пересече-

ния с солидусом (b') – состав твердой фазы. Линия ab , соединяющая составы фаз, находящихся в равновесии, называется *конодой*.

Правило отрезков

Количество твердой фазы в точке c определяется отношением длины отрезка ac , примыкающего к ликвидусу, к длине всей коноды ab . Количество жидкости – отношением длины отрезка bc , примыкающего к солидусу, к длине всей коноды:

$$Q_{\alpha} = \frac{ac}{ab} \cdot 100\%;$$

$$Q_{\text{ж}} = \frac{bc}{ab} \cdot 100\%.$$

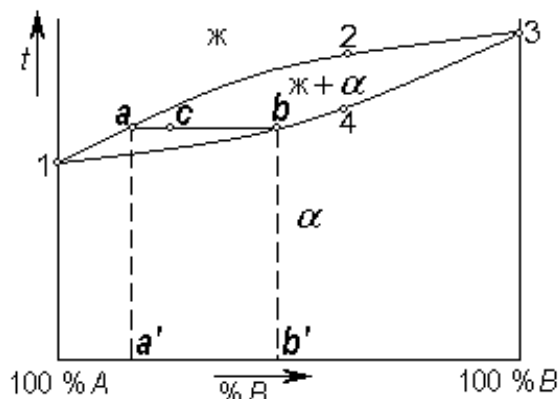


Рис. 1. Определение состава и количества фаз

Это понятно, если проследить изменение этих отрезков при охлаждении: отрезок ac будет расти, а отрезок bc , – наоборот, уменьшаться. Количество твердой фазы при охлаждении растет, а количество жидкости уменьшается до полного ее исчезновения.

1. Диаграмма с полной нерастворимостью компонентов в твердом состоянии

В этой системе в жидком состоянии компоненты А и В растворяются друг в друге, а в твердом не растворяются. По вертикальной оси на диаграммах всегда откладывается температура, а по горизонтальной – состав сплава в процентах. На приведенной диаграмме (рис. 2) в точке x_1 содержится 100 % компонента А, вправо от этой точки увеличивается количество компонента В в сплавах, и в точке x_3 содержится 100 % В. Точка a соответствует температуре плавления компонента А, а точка c – компонента В.

Если рассматривать диаграмму при понижении температуры (сверху вниз), то пересече-

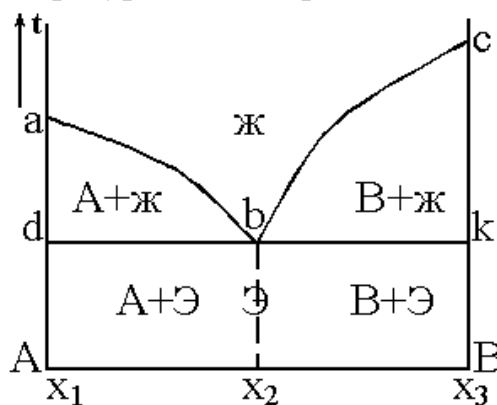


Рис. 2. Диаграмма состояния сплавов с полной нерастворимостью компонентов в твердом состоянии

ние каждой линии соответствует изменению фазового состояния, строения сплавов данной системы. На рис. 2 линия abc является геометрическим местом температур начала кристаллизации сплавов и называется линией *ликвидус*. Выше этой линии все сплавы системы А-В находятся в жидком состоянии.

Линия dbk является геометрическим местом температур конца кристаллизации и называется линией *солидус*. Ниже нее все сплавы находятся в твердом состоянии. Следовательно, между линиями ликвидус и солидус сплав находится в двухфазном состоянии (и жидком, и твердом), т. е. в областях $abda$ и $bckb$ идут процессы кристаллизации (при охлаждении) и плавления (при нагревании).

При охлаждении из жидкого состояния на линиях ab и bc начинается процесс кристаллизации. Поскольку компоненты этой системы не растворяются друг в друге и химически не взаимодействуют, то при кристаллизации образуются кристаллы чистых компонентов. Причем в области $abda$ более благоприятные условия для образования в жидкости зародышей компонента А и роста из них кристаллов, а в области $bckb$ – компонента В. Поэтому на линии ab начинается кристаллизация компонента А, а на линии bc – компонента В. При последующем понижении температуры эти процессы продолжают до линии солидус dbk .

Точка b на диаграмме называется *эвтектической*, она принадлежит одновременно линии ab и линии bc . При кристаллизации сплава эвтектического состава (x_2) в точке b одновременно формируются кристаллы компонентов А и В, в результате чего образуется мелкая механическая смесь кристаллов А и В, которая называется *эвтектикой*. Эвтектика сохраняется в этом сплаве и при последующем охлаждении в твердом состоянии.

При кристаллизации компонентов А и В в областях $abda$ и $bckb$ состав оставшейся жидкости непрерывно меняется. В первом случае она обедняется компонентом А, во втором – В. Когда охлаждение доходит до линии dbk , состав оставшейся жидкости становится равным эвтектическому (x_2). Поэтому на линии dbk , так же как и в точке b , кристаллизуется эвтектика.

В твердом состоянии (ниже линии dbk) структура *доэвтектических сплавов* (в интервале концентраций x_1-x_2) будет состоять из кристаллов компонента А и эвтектики, структура *эвтектического сплава* (состава x_2) – из одной эвтектики, структура *заэвтектических сплавов* (в интервале концентраций x_2-x_3) – из кристаллов компонента В и эвтектики. Дальнейшее охлаждение в твердом состоянии не приводит к каким-либо изменениям в структуре, так как никаких линий в нижней части диаграммы нет.

Оценим возможность термической обработки сплавов системы с полной нерастворимостью компонентов в твердом состоянии.

Термической обработкой называют изменение структуры и свойств сплавов путем нагрева их до определенной температуры, выдержки и охлаждения с необходимой скоростью. Если посмотреть на диаграмму на рис. 2, то видно, что нагрев и охлаждение сплавов данной системы в твердом состоянии не приводят к изменению структуры, а следовательно – и свойств. Это значит, что упрочняющая термическая обработка сплавов подобных систем невозможна.

2. Диаграмма с полной растворимостью компонентов в твердом состоянии

В данном случае компоненты С и D растворяются друг в друге в твердом состоянии во всем интервале концентраций, от 0 до 100 % (рис. 3). С учетом этого следует рассматривать диаграмму системы сплавов С–D. На рис. 3 точки *a* и *b* – температуры плавления (кристаллизации) компонентов С и D соответственно. Верхняя линия является линией ликвидус, следовательно, выше нее все сплавы данной системы находятся в жидком состоянии. Нижняя линия – линия солидус, ниже которой все сплавы находятся в твердом состоянии. Кристаллизация при охлаждении жидкости начинается на линии ликвидус, при этом образуются кристаллы твердого раствора С в D (или D в С), заканчивается этот процесс на линии солидус. Ниже солидуса, т. е. в твердом состоянии, структура сплавов – это кристаллы твердого раствора замещения. При дальнейшем охлаждении до комнатной температуры изменений в структуре не происходит. Поскольку нагрев и охлаждение сплавов данной системы в твер-

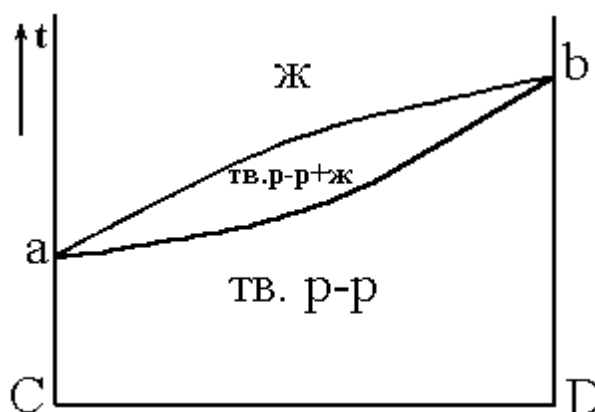


Рис. 3. Диаграмма состояния сплавов с полной растворимостью компонентов в твердом состоянии

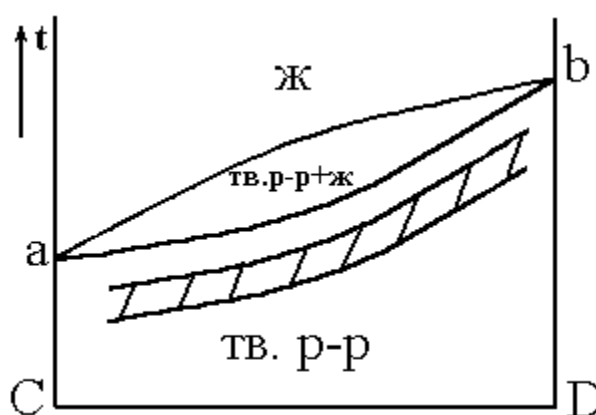


Рис. 4. Режим диффузионного отжига

дом состоянии не приводят к изменению структуры, упрочняющая термическая обработка сплавов подобных систем невозможна.

Если в процессе кристаллизации произошла *внутрикристаллическая ликвация*, то устранить или уменьшить неоднородность по составу в сплаве можно термической обработкой – *диффузионным отжигом* (или *гомогенизацией*).

Для этого необходимо нагреть сплав до высоких температур с целью ускорения диффузионных процессов, выдержать при этих температурах достаточно длительное время (часы или десятки часов) и затем медленно охладить. Режим диффузионного отжига показан на рис. 4 (заштрихованный интервал температур).

3. Диаграмма состояния с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

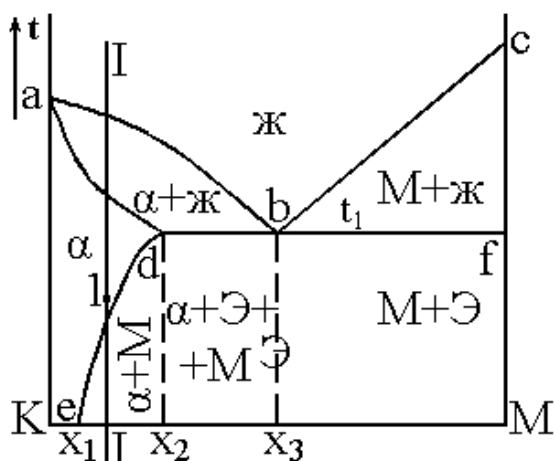


Рис. 5. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью одного компонента в твердом состоянии

В этой системе (рис. 5) компонент К в компоненте М в твердом состоянии не растворяется, а М в К растворяется в ограниченных количествах. Обозначим твердый раствор компонента М в К буквой α . Такой твердый раствор с ограниченной растворимостью может образоваться как по типу замещения, так и по типу внедрения. При температуре t_1 в твердом растворе α может раствориться x_2 компонента М, а при комнатной температуре – x_1 , т. е. с понижением температуры растворимость М в твердом растворе α уменьшается.

Линия abc – ликвидус диаграммы, следовательно, при более высоких температурах все сплавы данной системы будут в жидком состоянии.

Линия adb – солидус, ниже нее сплавы находятся в твердом состоянии.

При охлаждении доэвтектических сплавов (с концентрацией компонента М до x_3) в области $abda$ будет происходить кристаллизация твердого раствора α , а в заэвтектических сплавах (с концентрацией М больше x_3) в области $bcsb$ – кристаллизация компонента М. При этом в сплавах с концентрацией М до x_2 кристаллизация заканчивается на линии ad формированием структуры, полностью состоящей из кристаллов

твердого раствора α , которая сохраняется и при дальнейшем охлаждении. Точка b на диаграмме – эвтектическая. В сплаве эвтектического состава (x_3) в точке b при постоянной температуре t_1 происходит кристаллизация эвтектики, которая представляет собой смесь мелких кристаллов твердого раствора α и компонента М. Если проанализировать процессы, идущие при кристаллизации в областях $abda$ и $bcbf$, то можно увидеть, что состав жидкости здесь непрерывно меняется, и при температуре t_1 (на линии dbf) становится эвтектическим. Таким образом, на линии dbf из жидкости эвтектического состава кристаллизуется эвтектика, сохраняющаяся в сплавах при дальнейшем охлаждении.

Линия de на диаграмме (рис. 5) показывает предельную растворимость компонента М в твердом растворе α , понижающуюся с уменьшением температуры от x_2 до x_1 . Поэтому при охлаждении доэвтектических сплавов ниже линии de из твердого раствора α будут выделяться избыточные атомы компонента М с образованием мелких кристаллов (частиц) этого компонента. Эти частицы при медленном охлаждении будут расти, укрупняться. Точно такой же процесс будет происходить и в сплавах состава x_2 – x_3 . Это значит, что в них при температурах ниже линии db тоже будут выделяться частицы компонента М.

Для систем с твердыми растворами с ограниченной растворимостью компонентов, зависимой от температуры (подобных системе на рис. 5), возможна упрочняющая термическая обработка.

Сущность ее заключается в следующем: если взять сплав состава I–I со структурой, состоящей из кристаллов α и частиц М, нагреть его до температуры точки I (выше линии de), выдержать при этой температуре, чтобы все частицы М растворились в твердом растворе α , и быстро охладить, то компонент М не успеет выделиться из твердого раствора. После охлаждения структура сплава будет представлять собой пересыщенный твердый раствор α' . Этот процесс называется **закалкой**. При выдержке закаленного сплава при комнатной или несколько повышенной температуре из пересыщенного твердого раствора будет выделяться избыточный компонент М с образованием *дисперсных* (очень мелких) частиц: $\alpha' \rightarrow \alpha + M_{\text{дисп}}$. Такой процесс называется **старением** (при комнатной температуре – *естественное старение*, а при повышенных температурах – *искусственное старение*).

Образующиеся при старении мелкодисперсные частицы являются эффективными препятствиями для движения дислокаций и тем самым упрочняют сплав, повышают его прочностные характеристики. Таким образом, *упрочняющая термическая обработка сплавов подобных систем заключается в закалке и старении*.

В реальных сплавах могут встречаться варианты, когда оба компонента ограниченно растворяются друг в друге в твердом состоянии. Тогда в системе будет два твердых раствора. Пример такой диаграммы показан на рис. 6.

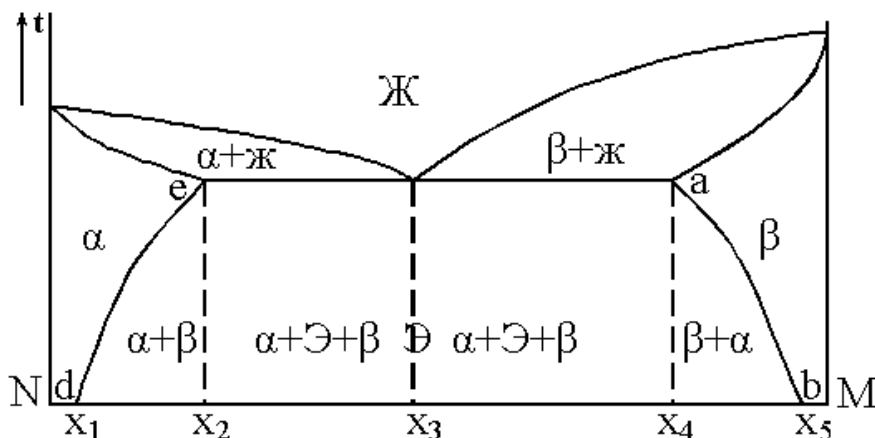


Рис. 6. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

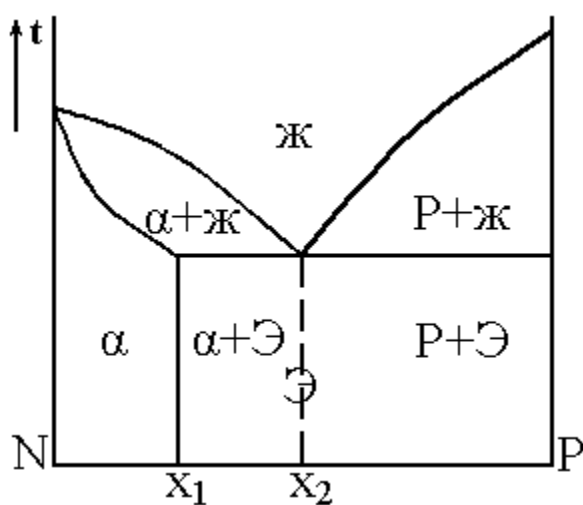


Рис. 7. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью, не зависящей от температуры

Здесь есть твердый раствор компонента М в N(α) и твердый раствор компонента N в M(β). Линии de и ab показывают соответственно предельную растворимость компонентов М и N в твердых растворах α и β в зависимости от температуры. Сплавы такой системы также могут подвергаться упрочняющей термической обработке (закалке и старению).

Если растворимость компонента в твердом растворе не зависит от температуры, то термическая обработка (закалка) становится невозможной, так как нельзя получить пересыщенный твердый раствор, необходимый для образования при последующем старении дисперсной упрочняющей фазы. Пример такой диаграммы показан на рис. 7.

Здесь концентрация компонента Р в твердом растворе α постоянна и равна x_1 .

4. Диаграмма состояния с образованием химического соединения между компонентами

Если в процессе кристаллизации компоненты образуют устойчивое химическое соединение, то оно играет роль самостоятельного компонента в системе. С учетом этого любую диаграмму с химическим соединением можно анализировать, разложив ее условно на более простые диаграммы, аналогичные рассмотренным выше.

На рис. 8 показана диаграмма с образованием химического соединения A_mD_n между компонентами А и D.

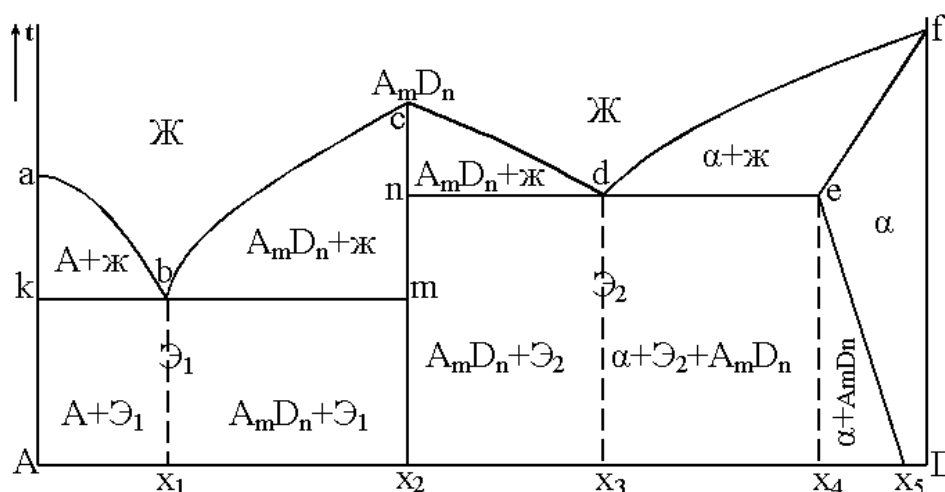


Рис. 8. Диаграмма состояния сплавов с образованием химического соединения

Эту диаграмму условно можно разделить на 2 простых диаграммы: $A-A_mD_n$ и A_mD_n-D (линии ликвидус abc и cdf , линии солидус kbt и nfe). Первая из них – типичная диаграмма с полной нерастворимостью компонентов в твердом состоянии, а вторая – диаграмма с ограниченной растворимостью компонентов. С учетом этого и указаны фазы в областях диаграммы на рис. 8.

В этой системе две эвтектики (точки b и d); одна из них ($Э_1$) состоит из кристаллов $A + A_mD_n$, а другая ($Э_2$) из кристаллов $A_mD_n + \alpha$. Компонент А ограниченно растворяется в D с образованием твердого раствора α . Как видно из рис. 8, для сплавов в правой части системы возможна упрочняющая термическая обработка (закалка и старение).

5. Диаграмма состояния с фазовым превращением в твердом состоянии

Если один или оба компонента при нагревании и охлаждении в твердом состоянии меняют свое кристаллическое строение, то это сказывается на виде диаграммы. На ней появляются дополнительные ли-

нии, характеризующие изменение кристаллической решетки компонентов и их взаимодействие после такого изменения с образованием новых фаз в твердом состоянии.

Такая диаграмма показана на рис. 9.

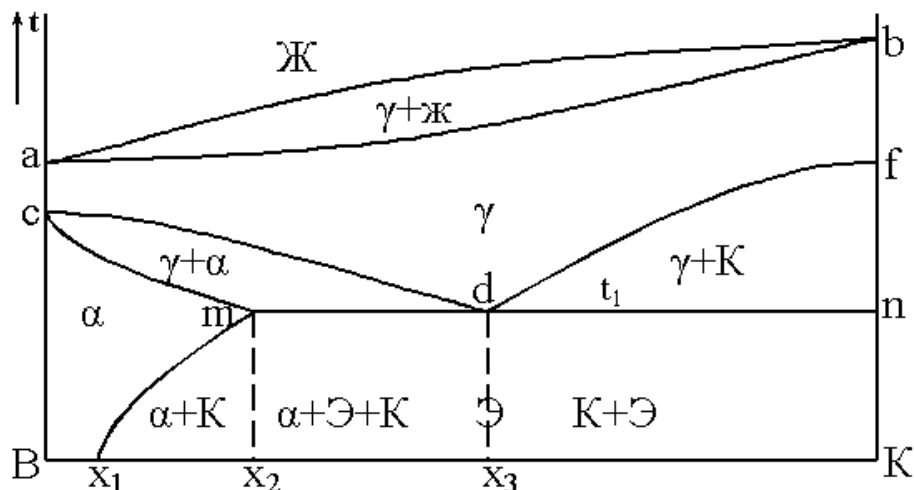


Рис. 9. Диаграмма состояния сплавов с фазовым превращением в твердом состоянии

Для удобства рассмотрения эту диаграмму условно можно разделить на две, первая из которых – верхняя часть диаграммы, показывающая процессы, идущие при кристаллизации жидкости (сверху и до линии cdf). Это диаграмма с полной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Вторая условная диаграмма – это нижняя часть системы В–К, показывающая процессы, идущие в сплавах в твердом состоянии (ниже линии солидус ab). Это диаграмма с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии.

При рассмотрении этих условных простых диаграмм следует использовать знания по вышеизложенному материалу. В системе В–К имеются два типа твердых растворов: γ – твердый раствор с неограниченной растворимостью компонентов и α – твердый раствор с ограниченной растворимостью компонента К в компоненте В. Предел растворимости составляет x_2 при температуре t_1 и x_1 – при комнатной температуре. Отличаются эти твердые растворы кристаллическим строением.

В точке c происходит изменение кристаллической решетки компонента В, а в точке f – компонента К. При охлаждении сплавов на линии cdf начинается превращение твердого раствора γ в другие фазы (в связи с изменением кристаллической решетки компонентов). При этом в сплавах с концентрацией до x_3 (левая часть диаграммы) образуются кристаллы твердого раствора α , а в сплавах с концентрацией К больше x_3 – кристаллы компонента К. Заканчивается это превращение γ на ли-

нии mdn при температуре t_1 образованием механической смеси типа эвтектической (такая смесь называется *эвтектоидной*) из кристаллов твердого раствора α и компонента К. Линия te показывает предельную растворимость К в твердом растворе α в зависимости от температуры.

Как видно из рис. 9, для сплавов таких систем можно проводить упрочняющую термическую обработку.

Задание для выполнения работы

1. Проанализировать диаграмму состояния сплава по указанию преподавателя:

- а) определить тип диаграммы;
- б) заполнить все области диаграммы;
- в) пояснить обозначения фаз и структурных составляющих;
- г) определить состав указанного сплава;
- д) определить состав фаз в указанной точке;
- е) определить количественное соотношение фаз в указанной точке.

При выполнении двух последних пунктов воспользоваться *правилом концентраций* и *правилом отрезков*.

Контрольные вопросы

1. Что такое ликвидус диаграммы состояния?
2. Что такое солидус диаграммы состояния?
3. Какая структура называется эвтектикой?
4. Как выглядит диаграмма состояния сплавов с полным отсутствием растворимости компонентов?
5. Как выглядит диаграмма состояния сплавов с полной взаимной растворимостью компонентов?
6. Чем отличается диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов от диаграммы для сплавов с полной растворимостью?
7. Что происходит при нагреве сплава выше линии предельной растворимости?
8. Что происходит при быстром охлаждении сплава, нагретого выше линии предельной растворимости?
9. Как определить состав фаз в двухфазной области диаграммы состояния?
10. Как определить количество фаз в двухфазной области диаграммы состояния?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

МИКРОСТРУКТУРА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы

Изучить микроструктуру отожженных углеродистых сталей.

Материалы и оборудование для выполнения работы

1. Металлографические микроскопы.
2. Коллекция шлифов сталей.
3. Альбом фотографий микроструктур углеродистых сталей.
4. Тренажер «Диграмма состояния *железо–цементит*».

Порядок выполнения работы

1. Изучить содержание основных положений работы.
2. Разобраться с помощью тренажера со стальной частью диаграммы *железо–цементит*.
3. Получить навыки определения под микроскопом элементов структуры стали: феррита, цементита, перлита, для чего:
 - а) рассмотреть фотографии микроструктур в альбоме;
 - б) рассмотреть под микроскопом подобранные шлифы для изучения структурных составляющих и зарисовать схемы рассмотренных структур.
4. Изучить микроструктуру образцов, относящихся к различным классам стали (доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные), определить, к какому из названных классов относится каждый образец. Зарисовать схему микроструктуры рассмотренных образцов и обозначить на рисунках структурные составляющие.
5. В образце доэвтектоидной стали определить содержание углерода в процентах.

Основные положения

На диаграмме состояния *железо–цементит* (рис. 1) сплавы, относящиеся к сталям, расположены в интервале концентраций углерода до 2,14 %, т. е. левее точки *E*. При температурах ниже 727 °С все отожженные углеродистые стали состоят из двух фаз – феррита и цементита. **Феррит** – это твердый раствор углерода в железе с объемноцентрированной кубической решеткой (Fe_{α}). Максимальная растворимость углерода в Fe_{α} составляет около 0,02 % (точка *P*). **Цементит** – это карбид железа Fe_3C , содержащий 6,67 % С.

При температурах выше линии GSE равновесной фазой является **аустенит** – твердый раствор углерода в железе с гранцентрированной кубической решеткой (Fe_γ). Предельная растворимость углерода в Fe_γ – 2,14 % (точка E).

В результате фазовых превращений в твердом состоянии, при малых скоростях охлаждения, в сталях будут образовываться следующие структуры: перлит, избыточный феррит, вторичный цементит и третичный цементит.

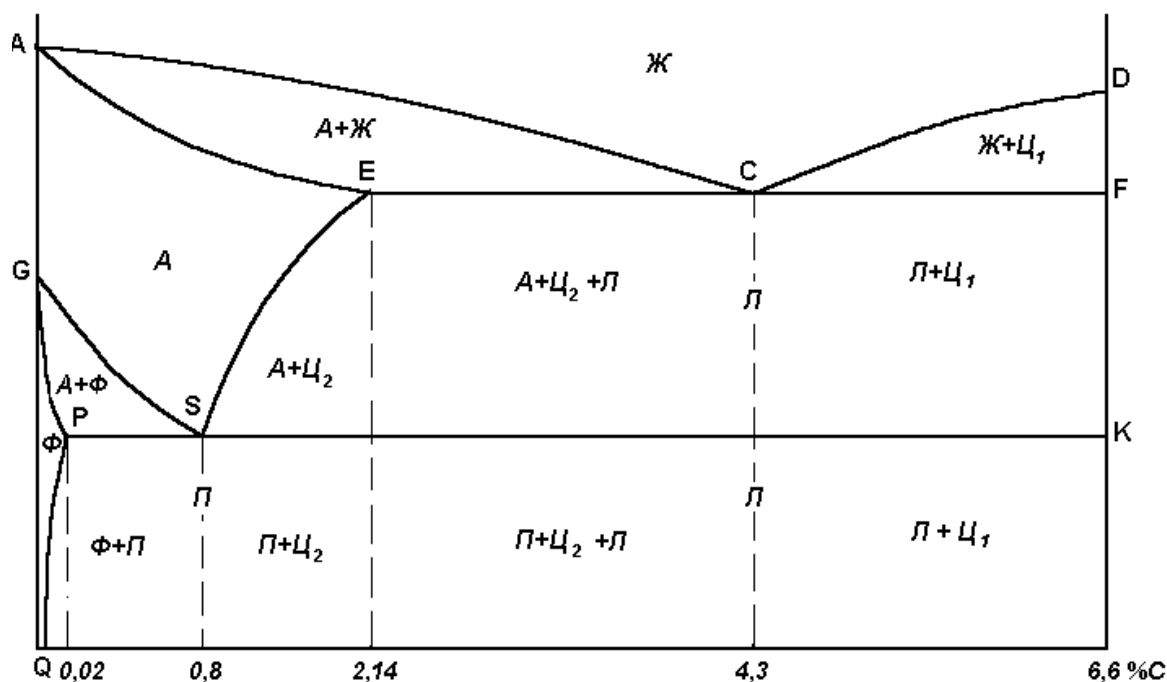


Рис. 1. Диаграмма состояния железо–цементит

Ниже линии GS в результате полиморфного превращения железа часть аустенита превращается в феррит с последующим перераспределением углерода между этими фазами. На линии SE из аустенита начинает выделяться избыточный углерод с образованием вторичного цементита. На линии PQ из феррита выделяется третичный цементит. Во всех сплавах правее точки P при небольшом переохлаждении до температур ниже 727°C аустенит эвтектоидного состава (0,8 % C) распадается на эвтектоидную смесь феррита и цементита, называемую **перлитом**, причем цементит может быть в виде пластинок или зерен (Приложение, рис. 4).

Сталь, содержащая 0,8 % C, называется **эвтектоидной**. Стали, содержащие менее 0,8 % C, называют **доэвтектоидными**, а стали, содержащие более 0,8 % C, – **заэвтектоидными**.

Металлографический анализ металлов и сплавов заключается в исследовании структуры материалов при больших увеличениях с помо-

щью микроскопа, а наблюдаемая структура называется *микроструктурой*. Изучение под микроскопом структуры металлов возможно лишь при достаточно интенсивном отражении световых лучей от исследуемой поверхности. Поэтому поверхность образца должна быть специально подготовлена. Образец, поверхность которого подготовлена для металлографического анализа, называется *микрошлифом*. Для изготовления микрошлифа необходимо вырезать образец из исследуемого металла, получить на нем плоскую, блестящую поверхность, а затем шлиф травят. Существует несколько методов травления, из которых наиболее распространен метод избирательного растворения фаз. Метод основан на различии физико-химических свойств отдельных фаз и пограничных участков зерен. В результате различной интенсивности растворения создается рельеф поверхности шлифа. Для травления микрошлиф погружают полированной поверхностью в раствор избранного состава и через некоторое время вынимают. Если полированная поверхность станет слегка матовой, травление считается законченным, шлиф сразу же промывают спиртом и высушивают фильтровальной бумагой.

Микрошлифы сталей травят 3–4%-м раствором HNO_3 в спирте, после чего структурно свободные феррит и цементит по сравнению с темным (коричневатым) перлитом выглядят белыми.

При охлаждении доэвтектоидной стали превращение аустенита в феррит начинается с границ отдельных зерен аустенита, и зерна одной фазы постепенно заменяются на другие. Размер и количество ферритных зерен при этом превращении в значительной степени зависят от скорости охлаждения аустенита. При рассмотрении в микроскоп феррит наблюдается в виде светлых зерен неодинаковой яркости (Приложение, рис. 1). По мере увеличения концентрации углерода в доэвтектоидной стали количество зерен феррита убывает, а количество перлита увеличивается (Приложение, рис. 2).

В сплавах, содержащих 0,5–0,75 % С, зерна феррита располагаются по границам зерен другой структурной составляющей – перлита – в виде разорванной сетки (Приложение, рис. 3).

В доэвтектоидной стали перлит в большинстве случаев имеет пластинчатое строение. Темные пластинки, видимые в перлите, представляют собой тени, отбрасываемые на участки феррита выступающими после травления участками цементита. Структура перлита в доэвтектоидных и заэвтектоидных сталях определяется условиями выполнения отжига. Форма и размер частиц цементита в перлите существенно влияют на его свойства. Так, например, перлит с зернистой структурой более пластичен и имеет меньшую твердость, чем пластинчатый. Твердость зернистого перлита 160–220 *HВ*, а пластинчатого – 200–250 *HВ*.

С уменьшением размера цементитных частиц твердость и прочность перлита возрастает. Структура перлита определяет и обрабатываемость стали при резании. Доэвтектоидные стали хорошо обрабатываются резанием, если перлит имеет пластинчатую структуру, а эвтектоидные и заэвтектоидные – зернистую.

В заэвтектоидных сталях возможно выделение вторичного цементита в виде сплошной сетки по границам зерен перлита (рис. П. 5). Это происходит после полного отжига и является значительным дефектом, ухудшающим прочность, вязкость и обрабатываемость стали. Еще одной, но более редко встречающейся формой выделения цементита, также сильно ухудшающей механические свойства, является образование его в виде игл (вследствие значительного перегрева).

Итак, можно выделить четыре типа структур сталей.

Первый тип структуры – феррит и третичный цементит – наблюдается в низкоуглеродистых сталях, содержащих до 0,02 % С (рис. 1, т. *P*). Такие стали называются *техническим железом*.

Второй тип структуры – феррит и перлит – наблюдается в доэвтектоидных сталях, содержащих от 0,02 до 0,8 % С (рис. 1, т. *S*). Чем больше в доэвтектоидной стали углерода, тем больше в ней перлита.

Третий тип структуры – перлит – наблюдается в эвтектоидной стали, содержащей 0,8 % С.

Четвертый тип структуры – вторичный цементит и перлит – наблюдается в заэвтектоидной стали с содержанием углерода от 0,8 до 2,14 % (рис. 1, т. *E*).

Отличие доэвтектоидных сталей от заэвтектоидных по микроструктуре

В доэвтектоидных и заэвтектоидных сталях имеется одна общая для обоих типов структур составляющая – перлит. Отличить при микроанализе до- и заэвтектоидные стали друг от друга можно только по избыточным выделениям: если в структуре находится избыточный феррит, то сталь доэвтектоидная, а если вторичный цементит, то сталь заэвтектоидная.

Имеются три металлографических способа отличить доэвтектоидные стали от заэвтектоидных:

а) при травлении раствором азотной кислоты избыточные феррит и цементит под микроскопом выглядят как светлые участки структуры, по сравнению с перлитом. Относительное весовое количество избыточного феррита в доэвтектоидных сталях может изменяться от 100 % (сталь состава точки *P*) до 0 % (сталь состава точки *S*). В то же время,

количество вторичного цементита в заэвтектоидных сталях может изменяться в узких пределах – от 0 % (сталь состава точки *S*, рис. 1) до 20 % (сталь состава точки *E*, рис. 1).

Таким образом, если в отожженной стали, наряду с темным перлитом, обнаруживается светлая составляющая, образованная из отдельных зерен и занимающая более 20 % всей площади шлифа, видимой в микроскоп, то эта составляющая является избыточным ферритом, и следовательно, сталь – доэвтектоидная;

б) если относительное количество светлой составляющей меньше 20 % или если при микроанализе трудно произвести количественную оценку, то эта светлая составляющая может оказаться как избыточным ферритом, так и вторичным цементитом. В этом случае следует использовать индикаторный травитель – горячий щелочной раствор пикрата натрия, который окрашивает цементит в темно-коричневый цвет, оставляя феррит светлым;

в) если избыточная фаза занимает менее 20 % площади шлифа, протравленного азотной кислотой, то при наличии некоторого опыта можно отличить вторичный цементит от избыточного феррита по форме и оттенку.

После отжига сетка избыточного феррита неравномерна по ширине и составлена из отдельных зерен, в то время как сетка вторичного цементита на шлифе выявляется в виде непрерывных тонких линий практически одинаковой ширины. Сетка более твердого вторичного цементита после полировки слегка выступает над более мягким перлитом в виде рельефа. Вторичный цементит может выделяться из аустенита также в виде изолированных игл, как по границам, так и внутри колоний перлита. Наконец, цементит выглядит под микроскопом более светлым по сравнению с ферритом.

Металлографическое определение углерода в отожженных сталях

Если углеродистая сталь хорошо отожжена, т. е. приведена в равновесное состояние, то микроструктурным анализом можно определить содержание в ней углерода.

Такие определения фактически выполняют только для доэвтектоидных сталей, так как в заэвтектоидных сталях значительное изменение в содержании углерода мало и почти незаметно изменяет микроструктуру.

Углерод в доэвтектоидной стали распределен между избыточным ферритом и перлитом. В феррите содержатся тысячные доли процента углерода, которыми можно пренебречь и считать, что практически весь углерод в доэвтектоидной стали находится в перлите. В перлите содер-

жится 0,8 % С. В доэвтектоидной стали на перлит приходится только часть сплава, и содержание углерода в весовых процентах пропорционально площади шлифа, занимаемой перлитом. Эта пропорция вытекает из примерного равенства удельных весов феррита и перлита; в противном случае по микроструктуре можно было бы судить только об объемном соотношении.

Содержание углерода в доэвтектоидной стали:

$$\% \text{ C} = 0,8 \cdot F_{\text{П}} / 100,$$

где $F_{\text{П}}$ – площадь, занятая перлитом (в %) в поле зрения микроскопа.

$F_{\text{П}}$ чаще всего оценивают на глаз. Такой метод может показаться слишком грубым; в действительности же он дает хорошие результаты. Если абсолютная ошибка в оценке площади, занимаемой перлитом, составляет 10 %, то абсолютная ошибка в определении содержания углерода составляет всего 0,08 %.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Основные положения по теме работы.
3. Описание отдельных стадий выполнения работы с указанием используемого оборудования, с необходимыми пояснениями, цифровыми данными, зарисовками микроструктур и их описаниями.
4. Анализ полученных результатов, выводы.

Контрольные вопросы

1. Какое содержание углерода в эвтектоидной стали?
2. Какую кристаллическую решетку имеют α - и γ -железо?
3. Что такое аустенит, феррит, перлит, цементит?
4. Укажите название областей на стальной части диаграммы.
5. Какие процессы протекают в процессе охлаждения стали при 727 °С?
6. Какое максимальное содержание углерода в аустените?
7. Какое максимальное содержание углерода в феррите?
8. Как влияет содержание углерода на свойства стали?



Рис. 1

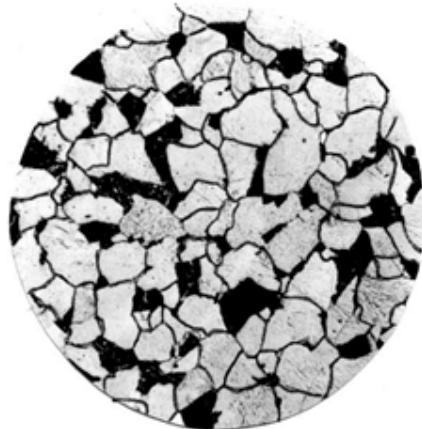


Рис. 2



Рис. 3



Рис. 4

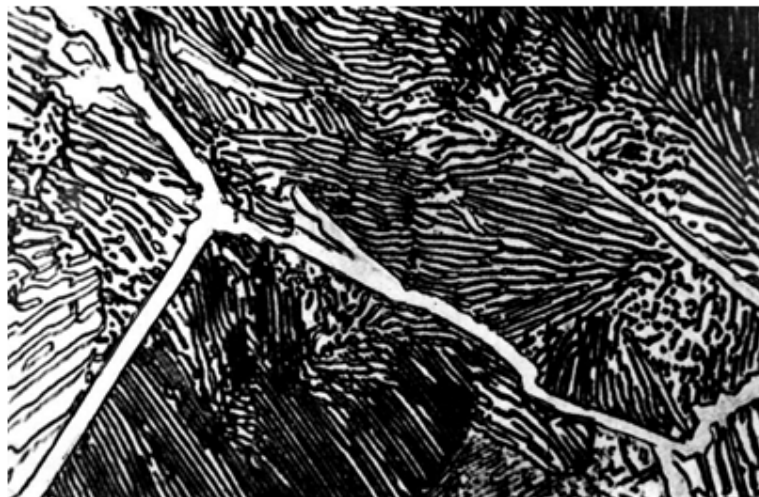


Рис. 5

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ЧУГУНОВ

Цель работы

1. Изучить основные разновидности чугунов, их строение, свойства и маркировку.
2. Познакомиться с основами выбора марки чугуна для изготовления деталей машин, изделий.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Металлографические шлифы чугунов.
2. Металлографические микроскопы ММУ-3, МИМ-7 и т. п.

Порядок выполнения работы

1. Прочитайте внимательно основные сведения по теме работы и разберитесь с классификацией чугунов, их строением, свойствами, областью применения каждой группы материалов.
2. Изучите чугуновую часть диаграммы *железо–углерод*.
3. Изучите под микроскопом металлографические шлифы чугунов и зарисуйте их структуры. На рисунках обозначьте все структурные составляющие и определите, к какой группе относится каждый из изучаемых образцов чугуна.
4. Выполните 1-2 задания, данные преподавателем, по выбору материала для изготовления изделий.

Основные положения

Чугун – это железоуглеродистый сплав с содержанием углерода от 2,14 до 6 %. Кроме этих элементов, в чугуне содержится еще ряд примесей (кремний, марганец, сера, фосфор и др.). С целью улучшения свойств в чугуны могут вводиться легирующие элементы, такие как хром, никель, медь и др.

Чугун, по сравнению со сталью, имеет как преимущества, так и недостатки. Положительными свойствами этого материала являются: хорошие литейные свойства (более низкая, чем у стали, температура плавления, меньшая усадка, хорошая жидкотекучесть), хорошая обрабатываемость резанием (кроме одной разновидности – белого чугуна), достаточно высокая работоспособность в условиях трения, способность гасить вибрации, небольшая стоимость.

Недостатком чугуна являются его низкие пластические свойства и ударная вязкость, что препятствует использованию чугуна для изготовления деталей, работающих при значительных динамических, ударных нагрузках, и делает невозможным в большинстве случаев использование обработки давлением (ковки, штамповки, прокатки и т. д.) для изготовления чугунных изделий.

По структуре различают чугуны, в которых углерод находится в виде химического соединения с железом Fe_3C – цементита, и чугуны, в которых углерод в основном находится в свободном состоянии, в виде графита.

Первая разновидность называется **белым чугуном**. Структура белых чугунов описывается чугуновой частью диаграммы железо–углерод (рис. 1).

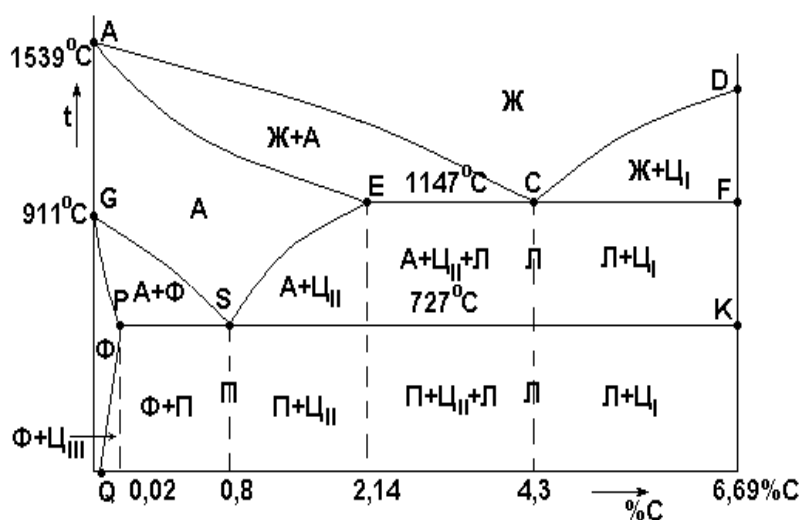


Рис. 1. Диаграмма железо-углерод: Ж – жидкий раствор; А – аустенит (твердый раствор углерода в γ -Fe); Ц – цементит (Fe_3C); Ф – феррит (твердый раствор углерода в α -Fe); П – перлит (эвтектоидная смесь феррита и цементита); Л – ледебурит (эвтектическая смесь аустенита и цементита, ниже линии PSK – смесь перлита и цементита)

Согласно диаграмме существует три разновидности белых чугунов: **доэвтектический** со структурой перлит, ледебурит и вторичный цементит; **эвтектический** со структурой ледебурит и **заэвтектический** со структурой ледебурит и первичный цементит (рис. 2).

Получают белый чугун при ускоренном охлаждении в процессе отливки деталей, заготовок. Способствует также получению этой разновидности чугуна повышенное содержание в нем хрома, марганца. Структура белого чугуна определяет его механические свойства: это твердый хрупкий материал, имеющий предел прочности при растяжении $\sigma_B = 100\text{--}400$ МПа ($10\text{--}40$ кг/мм²), твердость HB 300–700 и относительное удлинение $\delta = 0,1\text{--}0,2$ %. Вследствие низкой пластичности белый чугун применяется очень редко, в основном для изделий, работаю-

щих в условиях абразивного и гидроабразивного износа, когда его повышенная хрупкость не играет решающей роли.

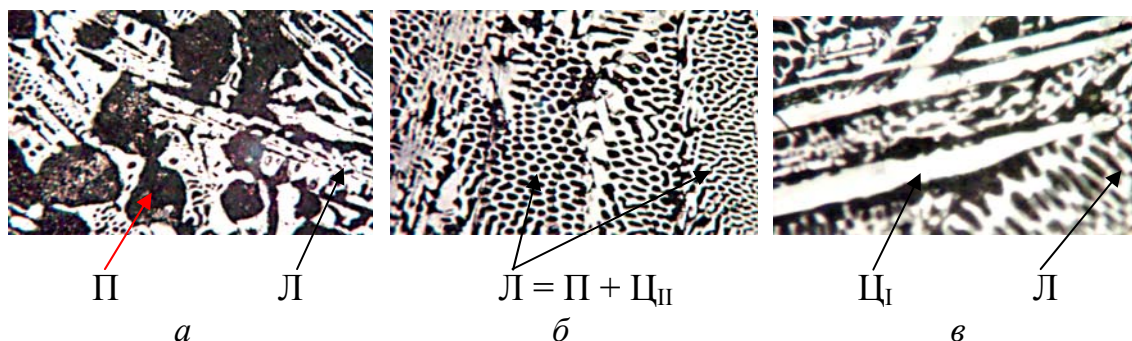


Рис. 2. Микроструктура белых чугунов: а – доэвтектического; б – эвтектического; в – заэвтектического

В ряде случаев изготавливают детали с так называемой отбеленной поверхностью. Их поверхностный слой представляет собой белый чугун и имеет повышенную твердость и износостойкость, а сердцевина имеет структуру другой разновидности чугуна (с наличием графита), что обеспечивает необходимый комплекс механических свойств. *Примерами таких изделий с отбеленной поверхностью являются валки для холодной прокатки металла, шары для шаровых мельниц.*

Чугуны, в которых углерод находится в свободном виде, классифицируют по форме графитовых включений:

1. **Серый чугун.** В нем содержится графит в виде пластинчатых включений.
2. **Ковкий чугун** с хлопьевидными включениями графита.
3. **Высокопрочный чугун,** в котором графит имеет шаровидную форму.

Металлическая основа этих чугунов может быть *перлитной, ферритной* или *феррито-перлитной*. Схематические структуры рассматриваемых чугунов показаны на рис. 3. Поскольку графитовые включения отрицательно сказываются на механических свойствах металла, особенно на пластичности, то чем менее разветвленную форму они имеют, тем меньше их отрицательное влияние. Самая неудачная с точки зрения механических свойств форма графита – пластинчатая (пластичность при этом самая низкая), а наиболее благоприятная – шаровидная форма включений, обеспечивающая максимальную пластичность (рис. 3). Это связано с тем, что графитовые включения играют роль трещин, пустот в чугуне и являются концентраторами напряжений. Чем более компактную форму имеют эти включения, тем более «мягкий» получается концентратор напряжений и тем меньше снижение механических свойств металла за счет графита.

Структура металлической основы (твердость)	Тип чугуна и форма графита		
	Серый с пластинчатым графитом	Ковкий с хлопьевидным графитом	Высокопрочный с шаровидным графитом
Перлит (250 НВ)			
Перлит и феррит (200 НВ)			
Феррит (150 НВ)			
δ , %	0,2-0,5	5-10	10-15

Рис. 3. Схемы микроструктур чугунов, содержащих графит

Серый чугун получают при медленном охлаждении металла при литье изделий, а также при повышенном содержании кремния, углерода. Обозначается он буквами СЧ, после которых ставится цифра, показывающая предел прочности при растяжении σ_b в кг/мм² (ГОСТ 1412-85), например СЧ12 ($\sigma_b = 12$ кг/мм²). Применяется серый чугун для изготовления слабонагруженных деталей, работающих в легких условиях. Например, корпуса редукторов, насосов, электродвигателей, различные крышки, отопительные батареи и т. п.

Ковкий чугун получают из белого чугуна путем специального отжига. Это длительная (70–80 часов) термическая обработка, при которой белый чугун медленно нагревается до температур 950–1000 °С и после определенной выдержки медленно охлаждается по определенной схеме. При таком отжиге происходит графитизация цементита белого чугуна с образованием хлопьевидных включений графита. Обозначается ковкий чугун буквами КЧ, после которых следуют цифры, показывающие предел прочности при растяжении σ_b в кг/мм² – первая цифра и относительное удлинение δ в % – вторая цифра (ГОСТ 1215 в редакции 1992 г.), например КЧ30-6 ($\sigma_b = 30$ кг/мм², $\delta = 6$ %). Применяется этот чугун для изготовления деталей, работающих в более тяжелых условиях по сравнению с деталями из серого чугуна – при повышенных нагрузках, при знакопеременных и небольших ударных нагрузках. Например: картеры редукторов, коробок передач автомобилей; кронштейны рессор, различные крюки; фланцы и т. п.

Высокопрочный чугун получают путем модифицирования при выплавке серого чугуна магнием или церием в количестве 0,05 %. Модификаторы способствуют формированию шаровидных включений графита в место пластинчатых. Обозначаются высокопрочные чугуны буквами ВЧ и цифрой, показывающей предел прочности при растяжении σ_b (ГОСТ 7293-85), например ВЧ 40 ($\delta_b = 40$ кг/мм²). Применяется высокопрочный чугун для изготовления ответственных деталей, работающих в довольно сложных условиях при повышенном нагружении. *Например: коленчатые и распределительные валы легковых автомобилей; прокатные валки; корпуса турбин; детали кузнечно-прессового оборудования и др.*

Представляет интерес использование чугунов для деталей, работающих в специфических условиях (агрессивные среды, высокие температуры и др.). Для этого в чугуны вводят легирующие элементы, способствующие повышению необходимых свойств. Такие чугуны называют **легируемыми**, или чугунами специального назначения. Они дешевле легированных сталей и вследствие лучших литейных свойств оказываются предпочтительнее для получения отливок.

Таблица 1

Марки и механические свойства чугунов

Марка чугуна	σ_b , МПа (кг/мм ²)	δ , %	НВ
СЧ10	100 (10)	—	190
СЧ15	150 (15)	—	210
СЧ20	200 (20)	—	230
СЧ35	350 (35)	—	275
КЧ 30-6	300 (30)	6	100-163
КЧ 35-10	350 (35)	10	100-163
КЧ 45-7	450 (45)	7	150-207
КЧ 60-3	600 (60)	3	200-269
ВЧ 35	350 (35)	22	140-170
ВЧ 40	400 (40)	15	140-202
ВЧ 50	500 (50)	7	153-245
ВЧ 70	700 (70)	2	228-302

Примечание: Для серых чугунов толщина стенки отливки – 15 мм, для ковких чугунов размер отливки – 16 мм.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Краткая характеристика основных видов чугунов, особенности их строения и свойств.
3. Диаграмма *железо–углерод* с подробным рассмотрением ее чугунной части.

4. Рисунки структур чугунов, изученных под микроскопом, с подробными пояснениями структурных составляющих и типа чугуна.

5. Выбор материала для изделий по заданиям, данным преподавателем, с подробными пояснениями, анализом.

Задания по выбору материала для деталей

1. Выберите материал для изготовления дробы для дробеструйных аппаратов очистки деталей. Дробь при работе аппарата не должна деформироваться и должна иметь высокую твердость и износостойкость. Опишите структуру выбранного материала.

2. Станину станка изготавливают методом литья с последующей обработкой резанием. В процессе работы станина не испытывает ударных нагрузок. Условия работы довольно легкие. Выберите материал для ее изготовления, расшифруйте марку и поясните структуру данного чугуна.

3. Корпуса редукторов изготавливают из чугуна методом литья с последующей обработкой резанием. Материал должен обладать прочностью $\sigma_b = 500$ МПа, относительным удлинением 1,5 % и иметь твердость $HB230$. Выберите и обоснуйте марку чугуна, расшифруйте ее и поясните структуру.

4. Почему белые чугуны ограниченно применяются в машиностроении? Дайте подробное пояснение. Какие разновидности белых чугунов существуют и какова их структура?

5. Произошла поломка коленчатого вала дизельного двигателя. После исследования микроструктуры было дано заключение, что структура данного сплава состоит из зерен перлита с включениями пластинчатого графита. По техническим условиям данный материал должен обладать $\sigma_b \geq 650$ МПа, $\delta \geq 2$ %, $HB \geq 220-300$. Из какого материала был изготовлен коленчатый вал? Из-за чего произошла поломка, и что вы рекомендуете для предотвращения разрушения вала в дальнейшем?

6. Выберите материал для корпуса небольшого электродвигателя. Условия работы легкие, нагрузки небольшие. Корпус отливается с последующей обработкой резанием. Расшифруйте марку чугуна и поясните его структуру.

7. Для добычи гравия из реки Томь используют земснаряды. Шарнирные соединения труб для транспортировки гравия делают из чугуна. Условия работы: большой гидроабразивный износ, ударные нагрузки, постоянная вибрация. Выберите и обоснуйте марку чугуна.

8. Выберите материал для изготовления отопительных батарей. Способ их изготовления – литье. Расшифруйте выбранную марку и поясните структуру.

Контрольные вопросы

1. Сколько углерода содержится в чугунах?
2. Что происходит при кристаллизации белых чугунов при температуре 1147 °С?
3. Чем отличается структура серого чугуна от белого?
4. В чем отличие структуры серого и высокопрочного чугуна?
5. Какой чугун является самым прочным?
6. Какие графитные включения способствуют наибольшей пластичности?
7. Какие превращения происходят в процессе охлаждения белого эвтектического чугуна из жидкого состояния до комнатной температуры?
8. Какой из чугунов лучше всего обрабатывается резанием?
9. Какой чугун является самым твердым?
10. Как получить отливку из серого чугуна?
11. Как получить отливку из белого чугуна?
12. Как получают ковкий чугун?
13. Как получают высокопрочный чугун?
14. Назовите основные преимущества чугуна по сравнению со сталью.
15. Назовите основные недостатки чугуна по сравнению со сталью.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ЗАКАЛКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы

1. Изучить теоретические основы выбора температуры закалки углеродистых сталей.
2. Изучить влияние среды охлаждения (скорости охлаждения) на твердость стали при закалке.
3. Установить влияние содержания углерода в стали на результаты закалки.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Нагревательные печи с автоматическими приборами для регулирования температуры.
2. Баки с различными охлаждающими средами (вода, масло).
3. Твердомеры Роквелла с алмазными наконечниками.
4. Образцы углеродистых сталей с различным содержанием углерода.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными теоретическими положениями.
2. Выполнить в соответствии с заданием экспериментальную часть.
3. Провести анализ полученных результатов и сделать необходимые выводы по результатам работы всей подгруппы.

Основные положения

Цель любого процесса *термической обработки* заключается в том, чтобы нагревом до определенной температуры, выдержкой и последующим охлаждением с определенной скоростью вызвать желаемое изменение структуры металла или сплава и соответственно изменение свойств. Следовательно, основными факторами воздействия при термической обработке являются температура, время выдержки и скорость последующего охлаждения.

В практике машиностроения различают первичную и вторичную термическую обработки. Назначение *первичной термической обработки* заключается в подготовке структуры к последующим операциям механической и окончательной термической обработки. К этому виду обработки относятся различные виды отжига и нормализации. Назначение *вторичной (окончательной) обработки* – получение необходимых

эксплуатационных свойств деталей и изделий. К окончательной термической обработке относятся закалка и отпуск.

Цель закалки конструкционных и инструментальных сталей – достижение **максимально высокой твердости и прочности**. Сущность **закалки** заключается в получении пересыщенного твердого раствора. Пересыщение твердого раствора вызывает искажения кристаллической решетки, которые приводят к появлению дислокаций, компенсирующих эти искажения. Высокая плотность дислокаций затрудняет пластическую деформацию в металле и повышает его прочность и твердость.

Закалка применима к сплавам, в которых могут образовываться ограниченные твердые растворы. При нагреве таких сплавов увеличивается растворимость компонентов. Если охлаждать сплав с большой скоростью, не оставляя времени на диффузию, то в процессе охлаждения выделение избыточных атомов растворенного компонента не произойдет. Тогда при комнатных температурах зафиксируется пересыщенный твердый раствор. Еще большее пересыщение может быть получено в сплавах, которые испытывают полиморфные превращения при нагреве и охлаждении. Наибольший эффект при закалке наблюдается в железоуглеродистых сплавах – сталях. Аустенит (твердый раствор углерода в γ -железе) может растворить углерода в сотню раз больше, чем феррит (твердый раствор углерода в α -железе). Поэтому если нагревать сталь выше температур перестройки решетки и охлаждать, не давая углероду возможности выделяться из аустенита, то при обратной перестройке решетки возникает очень большое пересыщение α -железа атомами углерода, которое и вызывает значительное изменение свойств стали.

Скорость охлаждения, при которой углерод не успевает выделяться из твердого раствора, называется **критической скоростью охлаждения**. Для каждой стали она может быть определена по диаграмме изотермического превращения переохлажденного аустенита. Геометрически – это касательная к кривой начало превращения аустенита в феррито-карбидную смесь.

На рис. 1 представлена диаграмма изотермического превращения (или С-образная диаграмма) для стали с 0,8 % углерода.

Для углеродистых сталей время до начала распада аустенита очень мало ($\tau_{\text{инк}} = 0,5 \div 1,0$ с), и критическая скорость достигается только при охлаждении в воде или в водных растворах солей.

При очень малой скорости охлаждения (V_1) аустенит будет превращаться в **перлит** (грубая смесь кристаллов феррита и цементита). С увеличением скорости охлаждения (V_2 и V_3) число центров зарождения феррита и цементита увеличивается и размеры кристаллов этих фаз

уменьшаются. Более *дисперсные* (мелкозернистые) структуры – **сорбит**, **троостит** – имеют более высокую твердость, чем перлит. При скорости охлаждения больше $V_{кр}$ превращение аустенита в смесь феррита и цементита произойти не может, так как скорость диффузии углерода при температурах ниже 200 °С очень мала. Однако γ -решетка должна перестроиться в α -решетку, обладающую меньшим запасом энергии при низких температурах. Образуется пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе. Решетка железа сильно искажается, становится тетрагональной, а не кубической. Возникает большое количество дислокаций и других дефектов, поэтому сплав имеет высокую твердость и прочность, но очень низкую пластичность. Такая структура носит название **мартенсит**.

Мартенсит – это пересыщенный твердый раствор углерода в тетрагональной решетке α -железа.

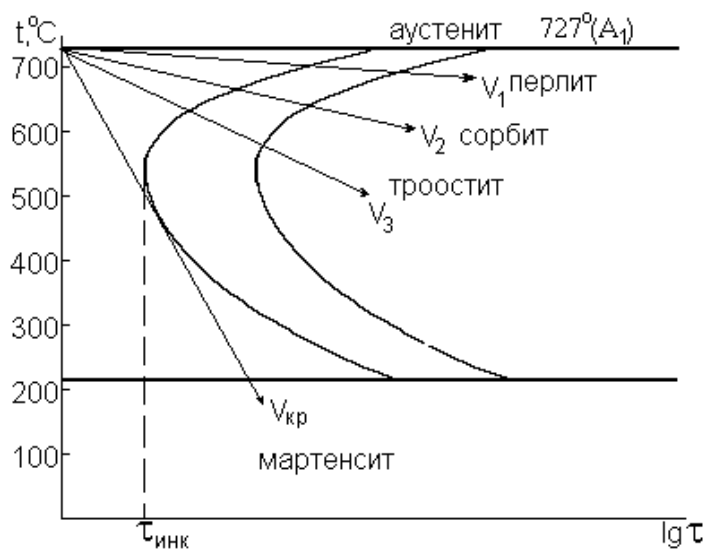


Рис. 1. Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита эвтектоидной стали

Основным фактором, определяющим твердость и прочность мартенсита, являются искажения кристаллической решетки α -железа, вызванные внедренными атомами углерода. Чем больше содержание углерода в мартенсите, тем больше *тетрагональность* решетки и выше твердость мартенсита (рис. 2).

Исходными условиями выбора температуры закалки являются требуемые свойства, которые должна обеспечить закаленная сталь.

Конструкционная сталь (<0,8 % С) применяется для изготовления деталей машин, механизмов и различного рода конструкций. Стали должны после закалки обладать высокими прочностными свойствами, особенно высокой усталостной прочностью, так как детали машин и механизмов испытывают сложные знакопеременные нагрузки.

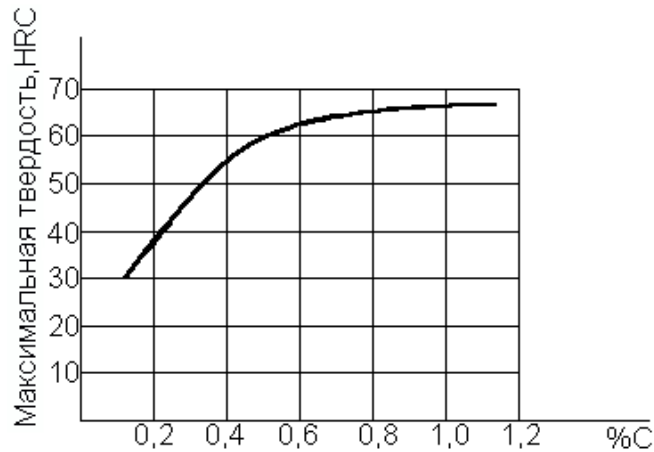


Рис. 2. Твердость мартенсита в зависимости от содержания углерода

На рис. 3 представлена левая (так называемая «стальная» часть) диаграммы железо–цементит). С помощью диаграммы проследим за превращениями, происходящими при нагреве сталей.

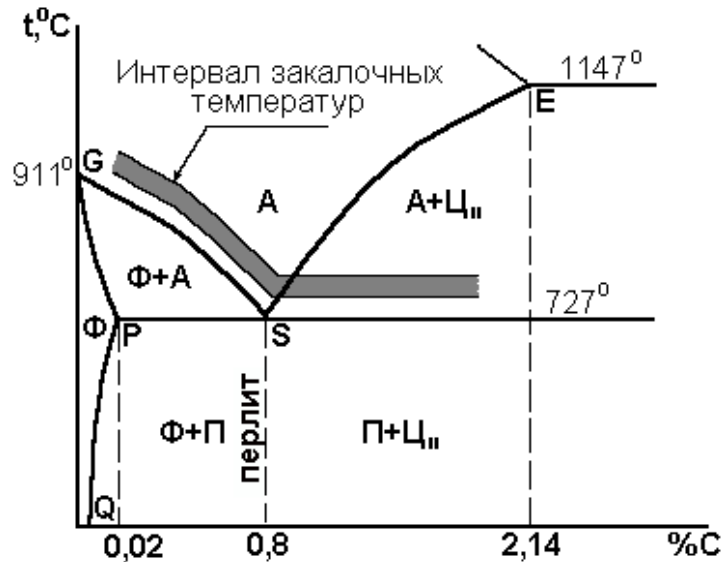


Рис. 3. «Стальная» часть диаграммы Fe-Fe₃C

При нагреве выше линии *PSK* (или критической температуры A_{c1}), но ниже *GS* (критическая температура A_{c3}) структура стали будет состоять из зерен аустенита и феррита.

При последующем охлаждении со скоростью, равной или больше критической, аустенит превратится в мартенсит, а феррит превращений не испытывает. После такой закалки структура будет состоять из очень твердых кристаллов мартенсита и мягких, пластичных кристаллов феррита. Отсюда низкая твердость и прочность, а главное – низкая усталостная (циклическая) прочность стали. Следовательно, такая закалка не обеспечит высокие эксплуатационные свойства конструкционных сталей.

Если при закалке нагреть доэвтектоидную сталь выше линии GS (Ac_3), то произойдет превращение феррита и перлита в аустенит. Последующее охлаждение с критической скоростью позволит получить однородный мартенсит, характеризующийся высокой прочностью и значительной усталостной прочностью.

Большое влияние на свойства стали после закалки оказывает температура нагрева и время выдержки при этой температуре. Чем выше температура нагрева и длительнее выдержка при этой температуре, тем интенсивнее происходит рост аустенитных зерен. Рост зерна при нагреве вызывается стремлением сплава к уменьшению поверхностной энергии зерен. Из крупнозернистого аустенита после охлаждения получатся крупные кристаллы мартенсита (крупноигльчатый мартенсит). Это приведет к высокой хрупкости стали.

Следовательно, для доэвтектоидных (конструкционных) сталей температура закалки должна быть выше точки Ac_3 (линии GS), однако это превышение не должно быть большим.

Для получения оптимальных свойств после закалки необходимо производить нагрев до температуры, определяемой эмпирической формулой

$$t_{\text{зак. доэвт}} = Ac_3 + (30 \div 50) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Все заэвтектоидные стали – инструментальные. Материалы, идущие на изготовление инструментов (особенно режущих), должны обеспечивать высокие твердость и износостойкость, высокую прочность. Эти свойства получают в ущерб пластичности стали, в противном случае инструмент не будет обладать высокими режущими свойствами.

При нагреве выше линии SK (Ac_1) превращение претерпевает лишь перлит (рис. 3), а цементит не успевает раствориться в аустените. После нагрева до этих температур структура стали – аустенит и цементит. При охлаждении со скоростью больше критической получается структура, состоящая из твердых и износостойких кристаллов мартенсита и кристаллов цементита, имеющих еще бóльшую твердость и износостойкость. Нагрев до более высоких температур (выше линии SE , или точки Ac_{cm}) не приведет к повышению твердости, но резко увеличится размер зерен аустенита (так как кристаллы цементита растворятся и уже не будут сдерживаться их рост), что отрицательно скажется на механических свойствах.

Следовательно, для заэвтектоидных (инструментальных) сталей температура закалки должна быть выше точки Ac_1 (линии SK).

Нагрев под закалку инструментальных сталей осуществляется до температур

$$t_{\text{зак. заэвт}} = Ac_1 + (30 \div 50) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Область оптимальных температур нагрева сталей под закалку представлена на рис. 3.

Методические указания по выполнению работы

Студенты получают образцы различных марок углеродистых сталей. Для группы студентов в 2–3 человека преподаватель указывает конкретные марки стали для проведения экспериментов (ВСт3; 10; 45; У8; У12).

Студенты определяют содержание углерода в стали по обозначению марки. Зная содержание углерода, выбирают по диаграмме состояния системы «железо-цементит» оптимальную температуру закалки для данной стали.

Исходя из температуры нагрева и размеров образцов, студентам необходимо выбрать время нагрева образцов в печи.

Время нагрева стали под закалку складывается из времени прогрева образца до заданной температуры и времени выдержки при температуре закалки. Длительность выдержки при температуре закалки определяется временем, необходимым для превращения исходной структуры в аустенит. Общее время нагрева под закалку можно определить по данным табл. 1, в которой приведены нормы нагрева стали при термической обработке в лабораторных электрических печах.

Скорость охлаждения, обеспечивающая получение структуры мартенсита, определяется экспериментально. Наиболее распространенными охлаждающими средами в термических цехах являются вода и водные растворы солей и щелочей, минеральные масла, возможно применение в качестве охлаждающей среды воздуха (спокойного или циркулирующего). Охлаждая образцы, нагретые до температур закалки в различных средах, определяют оптимальную среду охлаждения. Образцы, получившие в результате нагрева и охлаждения структуру мартенсита (твердость стали соответствует значению на рис. 2), являются закаленными. Образцы, не получившие максимально возможной твердости для данной стали, закаленными не являются.

Таблица 1

Нормы времени нагрева стальных заготовок в лабораторных электрических печах

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

Кроме того, в ходе данной лабораторной работы готовятся закаленные образцы для проведения следующей лабораторной работы – «Отпуск закаленной углеродистой стали». Производится закалка 3–4 образцов одной марки стали, которые будут подвергнуты на следующем занятии отпуску при различных температурах.

Все результаты проведенного эксперимента сводятся в табл. 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента: твердость сталей после охлаждения

№ п/п	Марка стали	Режим закалки			Твердость, <i>HRC</i>	Структура
		Температура нагрева, °С	Время нагрева, мин.	Среда охлаждения, °С/с		

По результатам работы студенты строят следующие графики:

- а) зависимость твердости стали от скорости охлаждения (принимая скорость охлаждения: в воде – 600 °С/с, в масле – 150 °С/с, на воздухе – 30 °С/с);
- б) зависимость твердости закаленной стали от содержания углерода.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Краткие сведения о выборе оптимальных температур закалки и скорости охлаждения углеродистых сталей.
3. Таблица с данными по твердости сталей до и после термообработки, графики по результатам работы.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. В каком температурном интервале образуется сорбит при изотермическом превращении аустенита?
2. К чему приводит повышение температуры нагрева доэвтектоидной стали под закалку от ($A_{c1} + 50^\circ$) до ($A_{c3} + 50^\circ$)?
3. Почему мартенсит имеет тетрагональную решетку?
4. С какой целью проводят закалку стали?
5. Чем отличается перлит от сорбита и троостита?
6. От чего зависит степень дисперсности (размер зерна) продуктов перлитного превращения?
7. От чего зависит температура нагрева стали под закалку?

8. Чем отличается мартенсит от аустенита, из которого он образовался?
9. Чем отличается структура стали У12 после закалки с температуры ($A_{c1} + 50^\circ$) от структуры после закалки с температуры ($A_{c_{cm}} + 50^\circ$)?
10. Как влияет повышение содержания углерода в доэвтектоидной стали на температуру нагрева стали под закалку?
11. Что является обязательным результатом закалки?
12. Каков механизм перлитного превращения?
13. От чего зависит закаливаемость стали (твердость после закалки)?
14. Как называется пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе?
15. Как изменяются свойства закаленной стали при увеличении содержания углерода до 0,8 %?
16. Чем объясняется высокая твердость и прочность закаленной стали?
17. Объясните, почему для конструкционных сталей не применяют закалку от температур несколько выше A_{c1} .
18. Почему при закалке необходимо охлаждать сталь со скоростью выше критической?
19. Что такое критическая скорость охлаждения?
20. Чем объясняется устойчивость и неустойчивость аустенита в различных температурных интервалах?
21. Каков механизм мартенситного превращения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ОТПУСК ЗАКАЛЕННОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель работы

1. Ознакомиться с процессами, происходящими при отпуске закаленной стали.
2. Изучить влияние температуры нагрева закаленной стали на твердость.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Нагревательные печи с автоматическими приборами регулирования температуры.
2. Твердомеры Роквелла с алмазными наконечниками.
3. Закаленные образцы углеродистых конструкционных и инструментальных сталей.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными теоретическими положениями.
2. Выполнить в соответствии с заданием экспериментальную часть.
3. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы по результатам работы всей подгруппы.

Основные положения

Как было установлено в лабораторной работе «Закалка углеродистых сталей», закаленные стали имеют высокие твердость и прочность, но очень низкие пластические свойства, т. е. сталь в закаленном состоянии очень хрупка и ненадежна в эксплуатации. Причиной высокой твердости и хрупкости является пересыщение твердого раствора на основе α -Fe углеродом, искажение его кристаллической решетки и появление дислокаций, компенсирующих эти искажения. Для изменения таких свойств стали применяют следующую **обязательную** операцию термобработки – отпуск. **Отпуск** – это нагрев закаленной стали ниже критических температур с целью придания стали **необходимых эксплуатационных свойств** и уменьшения внутренних напряжений после закалки.

Пересыщенный твердый раствор углерода в α -Fe (*мартенсит*) обладает большим запасом свободной энергии и поэтому не является стабильным. Следовательно, в закаленной стали должны протекать про-

цессы, приводящие систему к более устойчивому состоянию, т. е. углерод должен выделяться из решетки мартенсита. Эти процессы идут и при комнатной температуре, но с бесконечно малой скоростью. При нагреве закаленной стали скорость диффузии увеличивается: чем выше температура, тем выше подвижность атомов углерода. Таким образом, происходит распад пересыщенного твердого раствора с образованием равновесных фаз: карбидов и феррита. Рассмотрим последовательно этапы распада мартенсита при нагреве.

При нагреве до 150 °С скорость распада мартенсита ввиду малой подвижности атомов настолько мала, что заметных изменений в строении закаленной стали не наблюдается даже с применением весьма точных методов исследования.

При более высоких температурах нагрева (180–250 °С) начинается выделение углерода из решетки мартенсита и образование очень мелких карбидов, связанных с мартенситом. Частичное уменьшение концентрации углерода в твердом растворе снижает тетрагональность решетки мартенсита, поэтому твердость и прочность стали должны уменьшаться. Однако образующиеся очень мелкие карбиды оказывают сопротивление движению дислокаций под действием приложенных нагрузок, поэтому прочность почти не снижается.

Процесс распада мартенсита завершается при нагреве до температур 400–450 °С. Чем выше температура, тем более интенсивно происходит распад, так как скорость диффузии углерода из твердого раствора возрастает. Мартенсит превращается в мягкий феррит, карбиды немного укрупняются, однако все еще остаются мелкими и являются препятствием для движения дислокаций. Сталь с такой структурой имеет высокие прочностные и пластические характеристики, особенно высокий предел текучести.

При температурах выше 500–550 °С идет процесс укрупнения частиц карбидов, они приобретают округлую форму. Первый процесс называется *коагуляцией*, второй – *сфероидизацией*. Структура будет состоять из зерен феррита и крупных, сферической формы, карбидов. Сталь обладает высокой вязкостью и высокими пластическими свойствами при достаточной прочности.

В зависимости от процессов, происходящих при отпуске, и от изменений структуры и свойств (рис. 1) различают три вида отпуска:

- 1) низкотемпературный отпуск – от 160 до 250 °С;
- 2) среднетемпературный отпуск – от 300 до 450 °С;
- 3) высокотемпературный отпуск – от 500 до 650 °С.

Низкий (низкотемпературный) отпуск применяется для деталей, от которых требуются **высокие твердость и износостойкость**. Низкий отпуск назначается для повышения вязкости и пластичности стали без заметного снижения твердости. Этот отпуск применяется в основном для режущих и мерительных инструментов. При таком отпуске получается структура, состоящая из менее напряженного, чем после закалки, мартенсита и очень мелких карбидов. Такая структура называется **мартенсит отпуска**.

Средний (среднетемпературный) отпуск применяется для изделий, от которых требуются **высокие упругие свойства**. Мелкие кристаллы цементита игольчатой формы, образующиеся при таком отпуске, являются большим препятствием для дислокаций, что обеспечивает высокую упругость и прочность стали. В результате отпуска сильно повышается предел текучести стали и незначительно снижается предел прочности. Структура, получаемая при среднем отпуске, называется **троостит отпуска**. Она состоит из мелких зерен феррита и игольчатых кристаллов цементита. Такому отпуску подвергают пружины, рессоры, торсионы и другие детали, которые работают при знакопеременных нагрузках и должны быстро восстанавливать свою форму после деформации. Обычно для изготовления упругих элементов используют стали с содержанием углерода от 0,5 до 0,7 %, как углеродистые, так и легированные. Эти конструкционные стали выделены в особую группу **рессорно-пружинных сталей**.

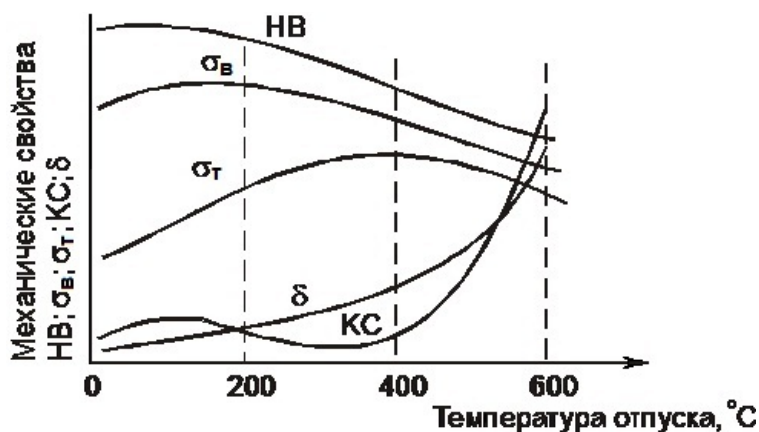


Рис. 1. Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной углеродистой стали

Высокий (высокотемпературный) отпуск применяют для **ответственных деталей машин с высокой надежностью**, испытывающих при эксплуатации сложные виды нагружения: статические, ударные и знакопеременные нагрузки. Структура после высокого отпуска состоит из более крупных зерен феррита и довольно крупных кристал-

лов цементита округлой формы и называется *сорбит отпуска*. Высокий отпуск обеспечивает максимальную пластичность и ударную вязкость в сочетании с достаточной прочностью.

Закалка в сочетании с высоким отпуском носит название *улучшение*. Такому виду обработки подвергается особая группа конструкционных сталей, носящая название *улучшаемые стали*. Они могут быть углеродистыми и легированными, содержание углерода – от 0,3 до 0,5 %. Улучшение конструкционных сталей позволяет повысить конструктивную прочность деталей (понижить чувствительность к надрезам и перекосам, к переходам от одного сечения детали к другому, к изменению размеров детали и т. д.).

Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной углеродистой стали представлено на рис. 1.

В табл. 1 приведены данные о влиянии термической обработки на механические свойства конструкционной углеродистой стали с 0,45 % углерода в отожженном состоянии, а также после закалки и отпуска при 300 °С (средний отпуск) и при 600 °С (высокий отпуск).

Данные табл. 1 говорят о том, что сталь в улучшенном состоянии имеет более высокие характеристики прочности (σ_B и σ_T), пластичности (δ , Ψ) и вязкости (KCU) по сравнению со сталью в отожженном состоянии. Отсюда и возникло название «улучшение» – механические характеристики стали улучшаются.

Таблица 1

Механические свойства стали с 0,45 % С после термической обработки

Термическая обработка	Механические свойства				
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	Ψ , %	KCU , Дж/см ²
Отжиг при 850 °С	650	450	20	6	60
Закалка с 850 °С в воде и отпуск при 300 °С	1080	890	10	52	75
Закалка с 850 °С в воде и отпуск при 600 °С	750	520	17	68	160

Кроме того, из табл. 1 видно, что после среднетемпературного отпуска закаленная конструкционная сталь приобретает весьма высокие предел прочности (σ_B) и условный предел текучести (σ_T) при хороших характеристиках пластичности (δ , Ψ) и ударной вязкости (KCU).

Методические указания по выполнению работы

1. Закаленные в ходе предыдущей лабораторной работы («Закалка углеродистой стали») образцы различных марок углеродистых сталей подвергнуть отпуску при температурах 200, 400 и 600 °С.
2. Исходной структурой стали перед отпуском должен быть мартенсит, поэтому отпускать необходимо только закаленные в воде образцы.
3. Время отпуска принять равным 0,5 часа. Охлаждение после отпуска производить на воздухе.
4. Замерить твердость образцов после отпуска на приборе Роквелла, результаты внести в табл. 2.
5. По результатам замеров построить графики зависимости твердости *HRC* от температуры отпуска для всех исследованных сталей.
6. Сделать выводы.

Таблица 2

Результаты эксперимента: твердость отпущенных сталей

№ п/п	Марка стали	Твердость после закалки, <i>HRC</i>	<i>t</i> отпуска, °С	Время нагрева и выдержки τ , мин.	Твердость после отпуска, <i>HRC</i>	Структура
-------	-------------	-------------------------------------	----------------------	--	-------------------------------------	-----------

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Краткие сведения о превращениях при нагреве закаленной стали.
3. Таблица с данными по режимам отпуска, твердости и структуре исследуемых сталей до и после отпуска.
4. Графики изменения твердости закаленной стали в зависимости от температуры отпуска.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое отпуск?
2. После какого вида термической обработки производится отпуск?
3. С какой целью проводится отпуск?
4. К каким видам изделий применяется низкотемпературный отпуск?
5. К каким видам изделий применяется среднетемпературный отпуск?
6. К каким видам изделий применяется высокотемпературный отпуск?
7. Какие процессы протекают в структуре стали при отпуске?
8. Что представляет собой структура мартенсита отпуска?
9. Что такое троостит отпуска?

10. Что такое сорбит отпуска?
11. С каким процессом при отпуске связано уменьшение напряжений в стали?
12. В каком температурном интервале отпуска наиболее интенсивно протекают процессы сфероидизации и коагуляции цементита?
13. Как изменяются свойства закаленной стали с ростом температуры отпуска?
14. Какая структура образуется при отпуске до 200 °С?
15. Какая структура образуется при отпуске до 400 °С?
16. Какая структура образуется при отпуске до 600 °С?
17. Чем отличается сорбит отпуска от троостита отпуска?
18. Как изменяется прочность стали σ_B при отпуске до 600 °С?
19. Как изменяется предел текучести σ_T при отпуске до 400 °С?
20. Как изменяются характеристики пластичности δ и Ψ при отпуске до 600 °С?
21. Какую операцию необходимо выполнить, если при отпуске получены более низкие твердость HRC и прочность σ_B , чем требовалось?
22. Какую операцию необходимо выполнить, если при отпуске получили более высокие твердость HRC и прочность σ_B , чем требовалось?
23. Какую температуру отпуска выбрать для изделий, от которых требуются высокие упругие свойства?
24. Какую температуру отпуска надо выбрать для изделий, от которых требуются высокие твердость и износостойкость?
25. Что произойдет в структуре стали, если после отпуска при 600 °С произвести дополнительный отпуск при 200 °С?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Цель работы

1. Изучить возможности упрочнения алюминиевых сплавов термической обработкой.
2. Изучить закономерности изменения структуры и механических свойств дуралюмина при термической обработке.
3. Ознакомиться с технологией термической обработки алюминиевых сплавов.

Материалы и оборудование для выполнения работы

1. Образцы из дуралюмина марки Д16.
2. Прибор измерения твердости по методу Бринелля ТШ-2.
3. Нагревательные печи.
4. Бачок с водой.

Порядок выполнения работы

1. Изучить необходимый теоретический материал по теме занятия. Ознакомиться с механизмом упрочнения алюминиевых сплавов термической обработкой, с изменениями их структуры при закалке и старении.
2. Измерить твердость дуралюмина по Бринеллю в исходном (отожженном) состоянии.
3. Провести закалку образцов сплава и замерить твердость после нее.
4. Провести искусственное старение закаленного сплава при температурах 100, 200 и 300 °С с выдержкой при этих температурах в течение 20 минут, кроме этого провести старение сплавов при температуре 200 °С с выдержками 5 и 10 минут.
5. Измерить твердость образцов после старения.
6. По результатам измерений построить графические зависимости твердости от температуры и продолжительности старения.
7. Проанализировать и объяснить полученные результаты.

Основные положения

Термическая обработка алюминиевых сплавов, в зависимости от производственной ситуации и эксплуатационных условий работы детали, может преследовать различные цели:

- 1) повышение пластичности и снижение твердости с целью улучшения обрабатываемости резанием и давлением (это реализуется при проведении смягчающей термической обработки – *отжига*);

2) повышение сопротивления деформации с целью повышения твердости и прочности (такая задача решается проведением упрочняющей термической обработки – *закалкой* и *старением*).

Поскольку указанные изменения свойств алюминиевых сплавов связаны с изменением их структуры, рассмотрим особенности ее формирования при различных видах термической обработки. С этой целью необходимо использовать диаграмму состояния, соответствующую данным сплавам.

Дуралюмин представляет собой сплав алюминия с медью и магнием (а также с небольшим количеством марганца и кремния), поэтому рассмотрим диаграмму состояния сплавов системы *алюминий–медь* (рис. 1). Это диаграмма с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии.

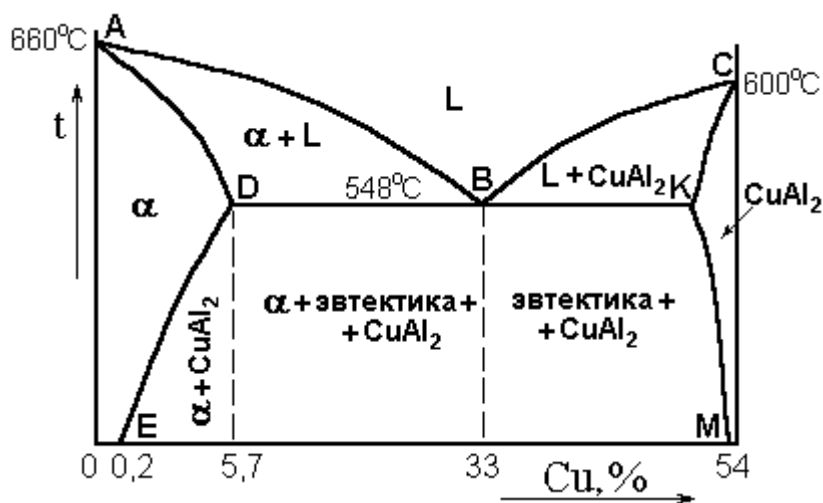


Рис. 1. Диаграмма состояния алюминий – медь

В соответствии с приведенной диаграммой, при температурах выше линии *ABC*, называемой линией *ликвидус*, сплавы находятся в жидком состоянии; ниже этой линии протекают процессы кристаллизации.

Растворимость меди в алюминии достигает 5,7 % при 548 °С.

С понижением температуры растворимость меди быстро уменьшается до значений $\leq 0,2$ % при 20 °С. В области, ограниченной линиями *ADE0A*, существует *твердый раствор меди в алюминии* (условное обозначение – α). В области правее линий *СКМ* существует *химическое соединение* CuAl_2 . В области, ограниченной линиями *ABDA*, формируются из жидкости кристаллы твердого раствора меди в алюминии α , а в области, ограниченной линиями *BCKB*, – кристаллы химического соединения CuAl_2 . Оставшаяся часть жидкости при понижении температуры до 548 °С изменяется по составу и при достижении эвтектического состава (33 % меди) кристаллизуется в виде эвтектики. Эта *эвтектика* представляет собой механическую

смесь кристаллов твердого раствора α и CuAl_2 . Соединение CuAl_2 также может изменяться по составу, о чем свидетельствует форма области в правой части диаграммы (ограниченная слева линиями *СКМ*).

Линия *DE* на диаграмме показывает *предельную растворимость* меди в твердом растворе α в зависимости от температуры. С понижением температуры растворимость меди уменьшается с 5,7 % (точка *D* при 548 °С) до $\leq 0,2$ % (точка *E* при 20 °С). Поэтому при охлаждении доэвтектических сплавов ниже линий *ED* и *DB* из твердого раствора α выделяются избыточные атомы меди с образованием частиц CuAl_2 .

Широкое применение в технике получили деформируемые алюминиевые сплавы – *дуралюмины*. Это сплавы с содержанием 3–5 % меди в алюминии.

В равновесном (отожженном) состоянии, согласно диаграмме (рис. 1), структура дуралюмина состоит из зерен твердого раствора меди в алюминии α и частиц соединения CuAl_2 (рис. 2, *а*). При этом частицы CuAl_2 крупные. Такая структура обеспечивает сплаву хорошую пластичность ($\delta = 18\text{--}20$ %) при относительно невысоких значениях прочности ($\sigma_B = 200\text{--}220$ МПа) и твердости.

Если сплав алюминия с 4 % меди со структурой, показанной на рис. 2, *а*, нагреть до температур выше линии *DE*, но ниже *AD*, то частицы CuAl_2 начнут диссоциировать. Атомы меди и алюминия перейдут в твердый раствор α . Когда этот процесс завершится, вся медь (в данном случае 4 %) будет находиться в твердом растворе и структура станет однофазной, как показано на рис. 2, *б*. Если затем сплав быстро охладить, то медь не успеет выделиться из твердого раствора и сохранится в нем после охлаждения. В результате такой обработки сформируется твердый раствор α' , пересыщенный медью (рис. 2, *в*), так как согласно диаграмме состояния при комнатной температуре в этом растворе может содержаться не более 0,2 % меди. В данном случае в твердом растворе α' будет содержаться 4 % меди.

Такой процесс получения пересыщенного твердого раствора α' путем нагрева сплава до температур выше линии *DE* на диаграмме (в однофазную область), выдержки и последующего быстрого охлаждения называется *закалкой*. В результате закалки формируется пересыщенный твердый раствор замещения. Упрочнение при этом происходит только за счет искажений кристаллической решетки, обусловленных разными размерами атомов алюминия и меди. Торможение дислокаций за счет этих искажений невелико. Поэтому после закалки значительного упрочнения дуралюмина не происходит – его прочность составляет $\sigma_B = 250\text{--}270$ МПа, однако пластичность возрастает до $\delta = 20\text{--}24$ %, что позволяет пластически деформировать сплав в этом состоянии.

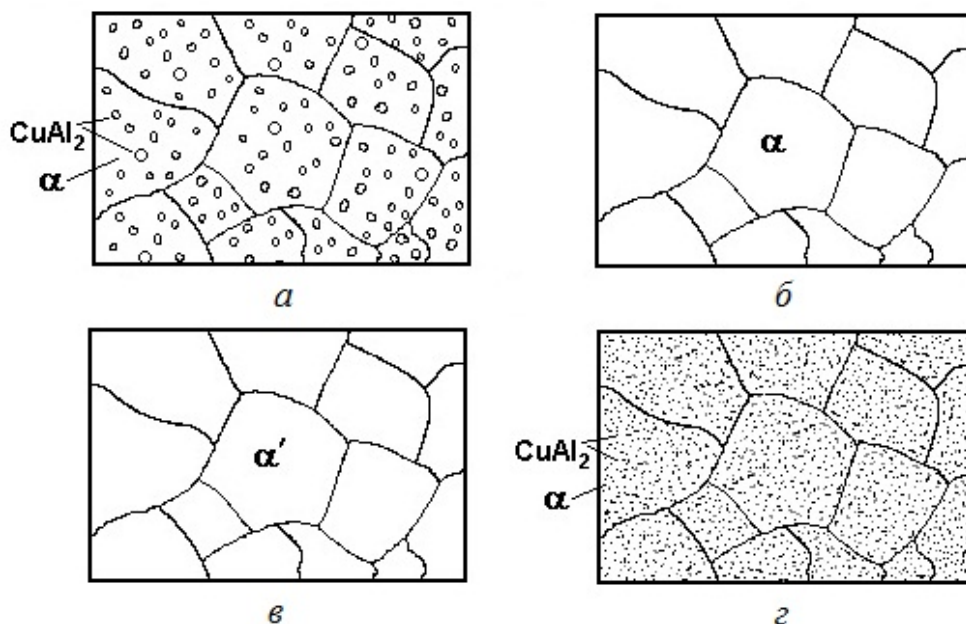


Рис. 2. Изменения микроструктуры дуралюмина при термической обработке

Для более эффективного упрочнения алюминиевых сплавов их необходимо после закалки подвергать **старению** – длительной выдержке (от 4 до 6 суток) при комнатной температуре или более короткой выдержке (несколько часов или несколько десятков минут, в зависимости от марки сплава) при повышенной температуре (100–180 °С). В первом случае старение называют *естественным*, а во втором – *искусственным*.

В процессе старения происходят следующие изменения в структуре закаленного сплава. Пересыщенный твердый раствор α' в закаленном сплаве – структура неравновесная и неустойчивая, поэтому при последующей выдержке сплава в течение определенного времени (при комнатной или повышенной температуре) в этом твердом растворе происходит диффузионное перераспределение атомов меди. В результате в отдельных участках сплава сначала образуются *обогащенные медью зоны*. Размер обогащенных медью зон на начальной стадии старения составляет: толщина – 5–10 Å, диаметр – 40–100 Å. Затем они растут до толщин 40 Å и диаметра ≥ 300 Å. Постепенно в этих зонах при возрастании концентрации меди формируются *дисперсные* (очень мелкие) *частицы химического соединения CuAl₂* с кристаллической решеткой, отличной от гранецентрированной решетки твердого раствора α (рис. 2, г).

Формирование в структуре сплава зон с высокой концентрацией меди и дисперсных частиц химического соединения CuAl₂ является сильным препятствием для движения дислокаций при пластической деформации и приводит к значительному упрочнению материала ($\sigma_B = 400\text{--}650$ МПа) при незначительном снижении пластичности ($\delta = 10\text{--}18\%$).

При увеличении температуры и продолжительности искусственного старения идет процесс интенсивной коагуляции (объединения) дисперсных частиц. При этом количество их уменьшается, а расстояние между ними – увеличивается, что облегчает прохождение дислокаций между частицами и ведет к снижению прочности сплава. Поэтому для каждого сплава необходимо выбирать оптимальный режим старения, который должен обеспечивать сохранение в структуре дисперсной упрочняющей фазы CuAl_2 , состоящей из максимального количества частиц минимально размера.

Такой механизм упрочнения характерен для всех алюминиевых сплавов, а тип образующегося химического соединения зависит от состава конкретного сплава.

Состав и обозначение деформируемых алюминиевых сплавов, упрочняемых термической обработкой

Дуралюмины обозначаются буквой Д с цифрами, являющимися условными номерами сплавов, например: Д1, Д6, Д16, Д18 и т. д. Структурное состояние сплава также может обозначаться в его марке. Если сплав находится в отожженном (мягком) состоянии, после цифр ставится буква М, а если сплав повышенного качества (содержит меньше примесей) – буква А. Для обозначения сплавов, подвергнутых закалке и старению, ставится буква Т («твердый») после естественного старения и Т1 после искусственного старения, например Д16Т.

При добавлении в сплав цинка и магния (дополнительно к находящимся в нем меди, хрому, марганцу) создаются условия, позволяющие еще значительно повышать его прочностные свойства термической обработкой. Такие сплавы называют *высокопрочными* и обозначают буквой В с цифрами, соответствующими номеру сплава.

Некоторые марки и состав алюминиевых сплавов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Марки и состав деформируемых алюминиевых сплавов

Марка сплава	Химический состав, % (вес.)							
	Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Cr	Zr
Д1	4,3	0,6	0,6	0,7	0,7	–	–	–
Д16	4,2	0,6	1,5	0,5	0,5	–	–	–
Д18	2,6	0,6	0,4	0,5	0,5	–	–	–
В95	1,7	0,4	2,3	0,5	0,5	6,0	0,2	–
В96	2,3	0,4	2,6	0,5	0,5	8,5	–	0,15

Режимы термической обработки дуралюминов и высокопрочных алюминиевых сплавов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы термической обработки алюминиевых сплавов

Марка сплава	Вид термической обработки	Температура нагрева, °С	Время выдержки	Охлаждающая среда
Д1, Д16, Д18	Закалка. Старение	500; 20–30	0,5–3,0 ч.; 4–6 суток	Вода. Воздух
В95, В96	Закалка. Старение	470; 120–140	0,5–3,0 ч.; 16–24 час.	Горячая вода (80–90 °С). Воздух

Для алюминиевых сплавов данного типа проводят также смягчающий (разупрочняющий) *отжиг* при 350–430 °С с выдержкой при этих температурах в течение 1–2 часов и последующим медленным охлаждением. При этом в структуре сплава образуются зерна твердого раствора α с максимально крупными частицами химического соединения CuAl_2 (в дуралюминах) или MgZn_2 , CuMgAl_2 (в высокопрочных сплавах).

Прессование вызывает структурное упрочнение, так называемый *пресс-эффект*. Деформируемые алюминиевые сплавы применяются для изготовления изделий пластической деформацией. Это могут быть листы, прутки, заклепки, изделия разных профилей. Из дуралюминов изготавливают обшивку, шпангоуты и лонжероны самолетов, кузова автомобилей, строительные конструкции и т. д.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Используемые материалы и оборудование.
3. Краткое изложение теоретического материала, видов и обозначения алюминиевых сплавов.
4. Построить графики изменения твердости и провести анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается суть упрочняющей термической обработки алюминиевых сплавов?
2. Какую структуру имеет дуралюмин в отожженном состоянии?
3. Какие изменения происходят в структуре алюминиевых сплавов при закалке?
4. Что такое старение и какие его разновидности вы знаете?

5. Как изменяется структура закаленного сплава при старении?
6. Каков механизм упрочнения алюминиевых сплавов при термической обработке?
7. Почему слабо упрочняется сплав при высокой температуре старения?
8. Что такое дуралюмин?
9. Почему необходимо быстро охлаждать сплав при закалке?
10. Как можно снизить твердость и повысить пластичность дуралюмина?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

МИКРОСТРУКТУРА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Цель работы

1. Познакомиться с особенностями микроструктуры металла сварного шва.
2. Изучить влияние развиваемого при сварке тепла на изменение структуры металла околошовной зоны.
3. Исследовать изменение свойств по сечению сварного соединения.

Материалы и оборудование для выполнения работы

Коллекция шлифов сварных соединений, металлографический микроскоп, твердомер, альбом фотографий микроструктур сварного соединения.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться по методическому пособию с процессом образования сварного соединения.
2. По диаграмме *железо–углерод* и схеме сварного соединения изучить характерные зоны и участки, их структуру и свойства.
3. Выявить и описать дефекты на образцах.
4. Изучить микроструктуру сварного соединения по альбому.
5. С помощью микроскопа изучить и зарисовать микроструктуру характерных зон сварного соединения.
6. Произвести определение химического состава шва и основного металла по микроструктуре.
7. Произвести замер твердости по сечению сварного соединения.

Основные положения

Характерные зоны в сварных соединениях и особенности их образование, структура и свойства

Процесс образования сварного соединения начинается с нагрева и расплавления основного и электродного металлов.

После образования сварочной ванны жидкий металл подвергается металлургической обработке – раскислению (удалению кислорода), рафинированию (удалению вредных примесей) и легированию. В этот же период происходит выделение газов из жидкого металла.

Последний период – кристаллизация металла шва.

Следует отметить, что одновременно с образованием сварочной ванны и кристаллизацией происходит нагрев околошовной зоны основного (свариваемого) металла. Поэтому в процессе сварочной операции каждый объем металла сварного соединения претерпевает нагрев до разных максимальных температур и затем охлаждается с различной скоростью. Таким образом, каждый характерный участок металла в сварном соединении после сварки имеет свою термическую историю, которая может быть описана термическим циклом сварки.

Термический цикл сварки (также как и любая термическая обработка) представляет собой изменение температуры сварного соединения во времени.

В зависимости от реальных условий процесса сварки, скорости нагрева и охлаждения и достигаемые температуры могут изменяться в очень широких пределах. Наибольшая скорость наблюдается при контактной сварке, особенно при точечной и роликовой. В этих случаях время протекания электрического тока часто составляет доли секунды. При газовой сварке скорость нагрева и охлаждения значительно меньше. Условились режимы сварки, при которых скорости нагрева и охлаждения очень большие, называть *жесткими*. Под *мягким* режимом понимают такие режимы, при которых металл нагревается и охлаждается медленно.

Сварное соединение состоит из следующих зон (см. рис. 1, с. 98).

1. Металл шва – это та зона, в которой в связи с нагревом выше температуры ликвидуса свариваемый металл расплавлялся в процессе сварки, перемешивался с металлом электрода и затем кристаллизовался. Структура шва характеризуется столбчатой формой кристаллов. При дальнейшем охлаждении металл шва претерпевает вторичную перекристаллизацию. Особенностью кристаллизации сварочной ванны является то, что, в отличие от кристаллизации слитка, кристаллизация шва протекает при одновременном нагреве от источника тепла и охлаждения в виде отвода тепла в основной металл. Металл шва (за счет перехода легирующих элементов из покрытия или электродного стержня) часто отличается по химическому составу от основного металла. Как известно, литая структура металла шва обладает меньшей прочностью и повышенной хрупкостью по сравнению с основным металлом, который, как правило, имеет более высокую прочность и ударную вязкость за счет обработки его давлением (прокатка,ковка и т. п.).

Равнопрочность литого металла шва с основным металлом при сварке достигается за счет легирования шва.

2. Зона сплавления охватывает те объемы металла, которые в процессе сварки нагревались до температур выше линии солидуса, но ниже линии ликвидуса. В этой области происходило частичное рас-

плавление основного металла. В эту зону в процессе сварки могли проникать различные элементы, которые вводились в электрод. Ширина зоны сплавления зависит от свойств металла (что определяет температурный интервал $T_d - T_c$) и от способа сварки.

3. Зона термического влияния представляет тот объем основного металла, который при сварке нагревался ниже температуры плавления и вызвал изменение структуры и свойств.

Характер структуры и свойств в отдельных зонах сварного соединения может быть определен из рассмотрения диаграммы состояния свариваемого сплава. Наибольшее применение в промышленности находят низкоуглеродистые стали, отличающиеся хорошей свариваемостью. Для анализа изменения микроструктуры малоуглеродистой стали при сварке воспользуемся диаграммой *железо–углерод*. Намечая на диаграмме состояния температурные границы характерных зон и участков, перенесем эти границы на график распределения температур. Из точек пересечения горизонтальных линий с кривой охлаждения опустим перпендикуляры на рисунок сварного соединения. Это дает возможность определить линейные границы отдельных участков.

При сварке плавлением низкоуглеродистых сталей применяются сварочные материалы, при которых металл шва получается низкоуглеродистым и низколегированным. Такие стали малочувствительны к скорости охлаждения и не закаляются. Микроструктура шва получается, как правило, феррито-перлитной.

Переходная зона, или *зона сплавления* (иногда ее называют границей сплавления), отмечена на рис. 1 цифрой 1. У низкоуглеродистых сталей она невелика. Обычно она имеет ширину 0,08–0,1 мм при дуговой сварке и 0,15–0,20 мм при газовой и электрошлаковой сварке. Структура данной зоны обычно крупнозернистая (феррит + перлит).

Зона термического влияния нагревается до температур ниже солидуса и в зависимости от температуры нагрева разделяется на ряд участков.

Участок перегрева (2) у низкоуглеродистой стали включает металл, нагретый от температур 1000–1100 °С до температур, близких к температуре плавления. В связи с этим здесь развивается крупное зерно; характерным признаком перегрева является повышенная хрупкость. Иногда в участке перегрева встречается так называемая видманштеттова структура. Эта структура впервые была обнаружена Видманштеттом при исследовании метеоритного железа и характеризуется ориентированным расположением феррита. При правильно выбранных режимах сварки структура участка перегрева – крупнозернистый перлит и феррит.

Участок нормализации (3) охватывает металл, нагреваемый в процессе сварки несколько выше критической точки A_{c3} (для низкоуглеро-

дистой стали до температур 900–1100 °С). Благодаря процессу перекристаллизации при нагреве и охлаждении и оптимальной температуре этого нагрева имеет место значительное измельчение зерна. Механические свойства этого участка весьма высокие по сравнению со свойствами других участков зоны термического влияния.

Участок неполной перекристаллизации (рис. 1) нагревается до температур, лежащих в интервале от точки A_{c1} до A_{c3} . Металл этого участка в процессе нагрева и охлаждения подвергается только частичной перекристаллизации. Процесс перекристаллизации доэвтектоидной стали протекает следующим образом. До нагрева основной металл имеет структуру феррит и перлит со значительным преобладанием феррита, поскольку сталь низкоуглеродистая. При нагреве в точке A_{c1} наблюдается эвтектоидное превращение перлита в аустенит, феррит же при этой температуре никаких превращений не претерпевает. При охлаждении зерна феррита остаются без изменения, а аустенит переходит в мелкозернистый перлит. Таким образом, отличительной чертой структуры этого участка будет наличие мелких зерен перлита рядом с зернами феррита, имеющими обычные, характерные для основного металла размер и форму.

Участок рекристаллизации (рис. 1) может иметь разную структуру в зависимости от предшествовавшей обработки. У горячекатаной или отожженной перед сваркой стали структура металла, нагревавшегося до температур ниже A_{c1} , не меняется.

Если металл перед сваркой был наклепан (путем холодной прокатки, штамповки, гибки, обработки резанием), то структурные превращения наблюдаются и на участках, которые нагревались ниже температуры A_{c1} . В холоднодеформированном металле при нагреве происходит процесс рекристаллизации, заключающийся в том, что из деформированных, вытянутых зерен вырастают новые, равноосные зерна. Величина этих новых зерен зависит от степени деформации. Температура начала процесса рекристаллизации вычисляется по формуле

$$T_p = K \cdot T_{пл},$$

где K – коэффициент, зависящий от чистоты металла. У металлов обычной технической чистоты $K = 0,3–0,4$; $T_{пл}$ – температура плавления, К.

Если же основной металл перед сваркой холодной пластической деформации не подвергался, то рекристаллизация не происходит и участка рекристаллизации не будет.

Участок синеломкости (рис. 1) по структуре совершенно не отличается от основного металла. Температура нагрева этого участка – 200–500 °С. Характерным для него является снижение ударной вязкости из-за выделения примесей по границам зерен в виде субмикроскопических частиц.

Механические свойства зон и участков сварного соединения неодинаковы. Наиболее низкими механическими свойствами будут обладать металл шва, граница сплавления, участок перегрева и участок синеломкости. Низкие механические характеристики шва объясняются литой структурой металла и вероятностью наличия дефектов (включений, газовых пор, непроваров и т. п.). Переходная зона, как известно, состоит из литых зерен и крупных зерен перегретого основного металла с характерной для них низкой прочностью. На участке синеломкости прочность снижается из-за выпадения примесей по границам зерен. Особенно резко проявляется это явление при эксплуатации сварных конструкций при повышенных температурах.

Возможности термической обработки сварных соединений

Структурную неоднородность сварного соединения можно в некоторой степени устранить путем термической обработки. Если на термическую обработку возлагается только задача снятия внутренних напряжений (возникших в результате сварки), то достаточно ограничиться низкотемпературным отжигом с последующим медленным охлаждением. Обычно для снятия внутренних напряжений применяют отжиг при 500–600 °С, а иногда и при более низких температурах.

Однако часто на термическую обработку возлагают и другие задачи:

1. Получение мелкого зерна путем перекристаллизации.
2. Выравнивание структуры по сечению шва и зоны термического влияния.
3. Выравнивание химического состава путем диффузии.
4. Придание основному и наплавленному металлу заданных свойств и структуры.

В любом случае, прежде чем решиться на термическую обработку сварного соединения, нужно тщательно изучить геометрию и размеры сварного соединения, неоднородность химического состава и структуры. Как правило, после этого требуется экспериментальная проверка принятых решений.

Следует отметить, что прочность сварного соединения зависит также от дефектов, не связанных со структурными превращениями. Это неправильное формирование шва, образование наплывов и подрезов, образование трещин при неравномерной усадке шва. Последнее объясняется тем, что жидкий металл имеет больший объем, нежели твердый. При затвердевании объем шва будет уменьшаться, а основной металл, как правило, препятствует этой усадке. В результате могут образоваться внутренние напряжения и трещины.

Задания по выполнению работы

1. Изучить коллекцию сварных образцов и определить дефекты, которые выявляются внешним осмотром.
2. Определить характерные зоны сварного соединения.
3. Изучить и зарисовать микроструктуру сварного соединения.
4. Определить содержание углерода (по микроструктуре) в шве и в основном металле.
5. Произвести замер твердости по сечению сварного соединения.
6. Ответить на контрольные вопросы.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Материалы и оборудование.
3. Рисунок диаграммы *железо–углерод* и схемы сварного соединения.
4. Краткая характеристика микроструктуры и свойств зон и участков сварного соединения.
5. Изображение микроструктуры характерных участков и зон сварного соединения.
6. Расчет содержания углерода в шве и в основном металле.
7. Рисунки дефектов сварных швов.
8. График изменения твердости по сечению шва.

Контрольные вопросы

1. Из каких этапов состоит процесс образования сварного соединения?
2. Что такое термический цикл сварки?
3. Попробуйте нарисовать термический цикл при сварке (в координатах *температура–время*). Сравните с графиком какого-либо вида термической обработки, например: закалки в воду, нормализации. Проанализируйте, в чем сходство и различие вида кривых.
4. Что такое мягкий и жесткий режим сварки? Как их получить практически при ручной дуговой сварке, контактной и других способах?
5. Из каких зон состоит сварное соединение?
6. Опишите характерные признаки зон сварного соединения. Как эти зоны образуются при сварке?
7. Как добиваются равнопрочности сварного шва с основным металлом?
8. Всегда ли нужно добиваться равнопрочности шва и основного металла?
9. От каких факторов зависит ширина зоны сплавления?

10. Что называется зоной термического влияния?
11. Из каких участков состоит зона термического влияния?
12. От чего зависит величина зоны термического влияния?
13. Отличается ли химический состав металла в зоне термического влияния от химического состава основного свариваемого металла?
14. Какие изменения происходят в металле участка перегрева?
15. Каковы свойства металла на участке нормализации?
16. Назовите структурные превращения металла на участке неполной перекристаллизации.
17. Что такое наклеп и рекристаллизация?
18. Какие дефекты влияют на качество шва?
19. Каковы причины образования трещин в шве?
20. Как устранить внутренние напряжения в сварном соединении?

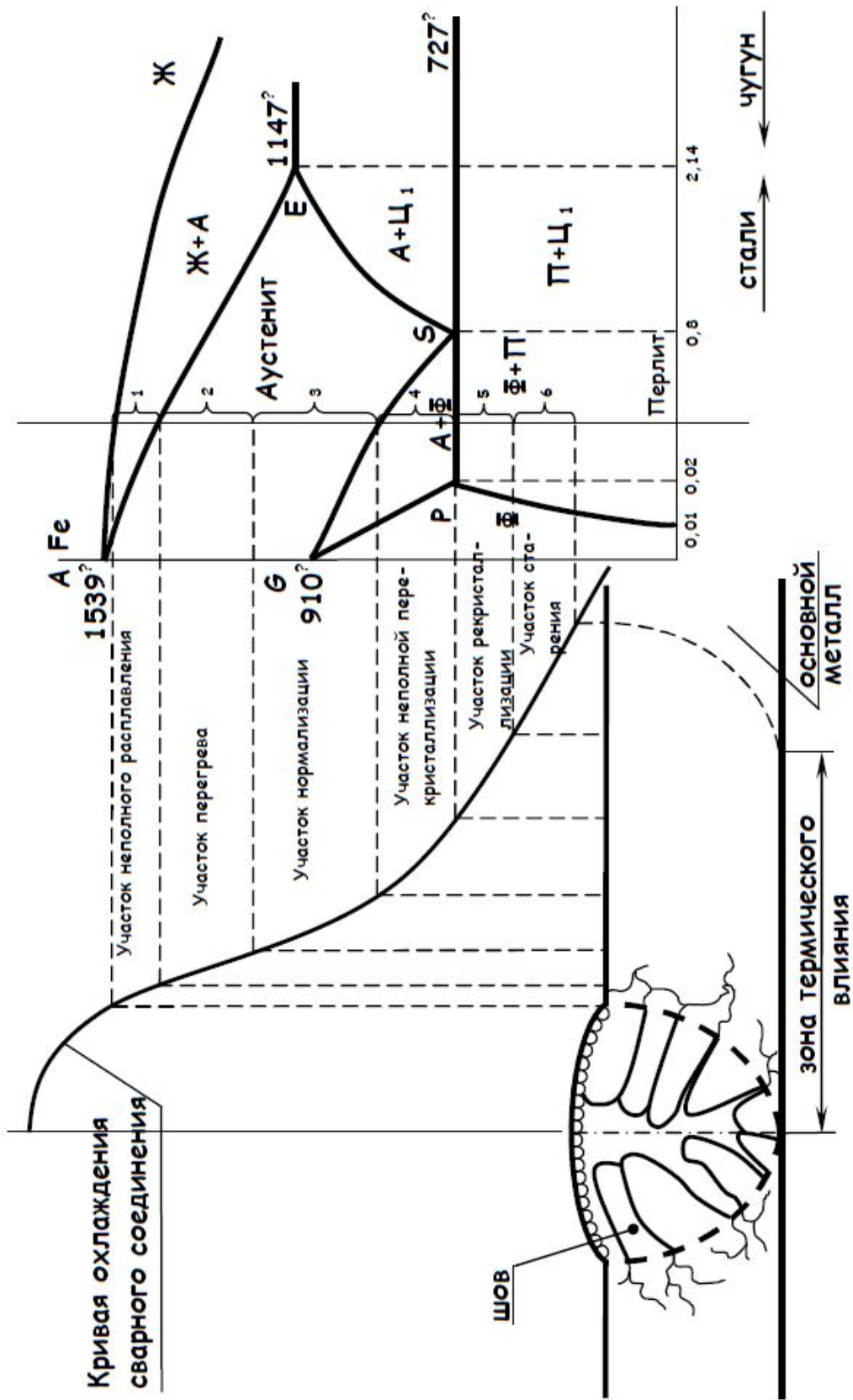


Рис. 1. Микроструктура сварного шва

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

Испытания материалов на растяжение

Цель работы

1. Ознакомиться с проведением испытания материалов на растяжение.
2. Научиться определять показатели прочности и пластичности материалов.

Оборудование и материалы для выполнения работы

Разрывная машина МИРИ–100К, штангенциркуль, измерительная линейка, набор образцов.

Порядок выполнения работы

1. Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными теоретическими положениями.
2. Выполнить в соответствии с заданием экспериментальную часть.
3. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы по результатам работы всей подгруппы.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Сведения об определении механических характеристик прочности и пластичности.
3. Протокол испытаний.
4. Выводы по работе.

Основные положения

Образцы для испытаний. Для испытания на растяжение применяют пропорциональные цилиндрические или плоские образцы (из листового материала) диаметром или толщиной в рабочей части 3 мм и более (рис. 1. а, б).

Для замера деформаций на расчетной части образца отмечают отрезок, называемый расчетной длиной. Наиболее распространены цилиндрические образцы, у которых выдерживается пропорциональное соотношение между начальной расчетной длиной l_0 и диаметром d_0 : $l_0 = 5 d_0$ (короткие, пятикратные образцы) и $l_0 = 10 d_0$ (длинные, десятикратные). Такие образцы называют пропорциональными.

У плоских образцов соотношение между расчетной длиной и размерами поперечного сечения остается таким же, как для цилиндрических образцов, но вместо диаметра фигурирует площадь поперечного сечения F_0 .

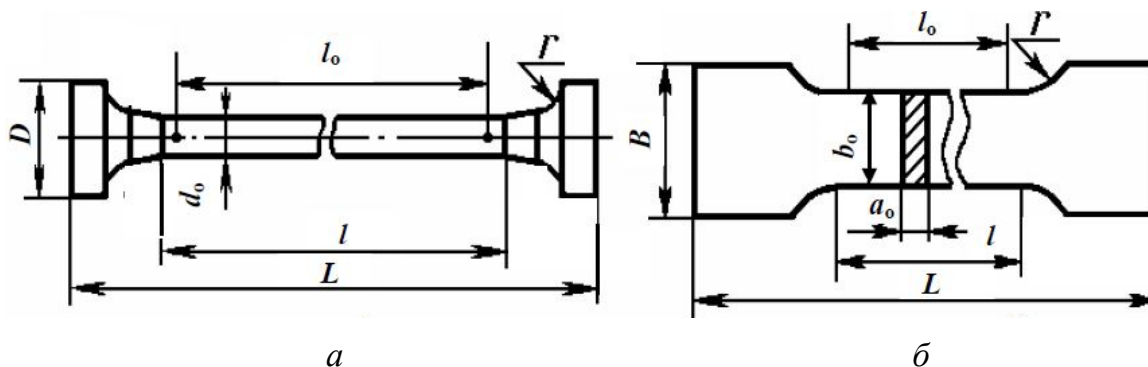


Рис. 1. Цилиндрические (а) и плоские (б) образцы, применяемые при испытании на растяжение: d_0 – начальный диаметр образца; a_0 – начальная толщина; b_0 – начальная ширина; l_0 – начальная расчетная длина; l – рабочая длина; D – диаметр головок; B – ширина захватов; L – общая длина образца

Так как площадь поперечного сечения $F_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}$, то для короткого цилиндрического образца

$$l_0 = 5 d_0 = 5 \sqrt{\frac{4 F_0}{\pi}} = 5,65 \sqrt{F_0},$$

для длинного образца

$$l_0 = 10 d_0 = 10 \sqrt{\frac{4 F_0}{\pi}} = 11,3 \sqrt{F_0}.$$

Расчетную длину l_0 с погрешностью до 1 % ограничивают на рабочей длине образца l кернами или рисками. При этом l должна составлять: от $l_0 + 0,5 d_0$ до $l_0 + 2 d_0$ – для цилиндрических образцов;

от $l_0 + 1,5 \sqrt{F_0}$ до $l_0 + 2,5 \sqrt{F_0}$ – для плоских образцов.

Формы и размеры головок и переходных частей цилиндрических и плоских образцов определяются способом крепления образцов в захватах испытательной машины. Способ крепления должен предупреждать проскальзывание образцов в захватах, смятие опорных поверхностей, деформацию головок и разрушение образца в местах перехода от рабочей части к головкам и в головках.

Испытательная машина. Испытанию на растяжение подвергают конструкционные пластичные стали, инструментальные стали, находящиеся в отожженном состоянии, цветные металлы. Испытания на растяжение проводятся на испытательной машине (рис. 2) при условии ее

соответствия требованиям ГОСТ 28840-90. Машина предназначена для статических испытаний образцов различных материалов на растяжение и изгиб: металлов и сплавов – по ГОСТ 1497-84, ГОСТ 6996, ГОСТ 10006; пластмасс – по ГОСТ 12262-80. Испытание на растяжение заключается в деформировании образца в условиях однородного и одноосного напряженного состояния до разрушения.

Машина представляет собой агрегат, состоящий из стойки с системой управления 1, стойки для испытания на изгиб 2, стойки для испытания на растяжение 3 и насосной установки 4 (рис. 2). Стойка на растяжение состоит из корпуса 5, траверсы с верхним подвижным захватом 6, нижним неподвижным захватом 7 и рабочих цилиндров с колоннами 8.



Рис. 2. Универсальная испытательная машина МИРИ – 100К

Основные характеристики:

Наибольшая нагрузка – 100 кН.

Наименьшая нагрузка – 2 кН.

Высота/ширина рабочего пространства – 400 мм.

Рабочий ход активного захвата – 400 мм.

Пределы допускаемой погрешности измерения нагрузки – $\pm 1\%$.

Диапазон захватываемых образцов:

– круглых (диаметр) – $5 \div 12$ мм;

– плоских (толщина \times ширина) – $5-20 \times 40$ мм;

– с головками (диаметр) – $5 \div 15$ мм.

Потребляемая мощность – 2,5 кВт.

Механические испытания осуществляются путем деформирования образцов при контролируемой нагрузке, перемещении, деформации и скорости изменения параметров.

Работа заключается в нагружении закрепленного в захватах образца испытательной нагрузкой. Нагружение осуществляется подачей рабочей жидкости (масло) к рабочим цилиндрам машины. Подача происходит в результате работы масляного насоса насосной установки 4. Контролируемое давление рабочей жидкости (масла), создаваемое в рабочих цилиндрах, вызывает перемещение верхней траверсы 5. Образец при этом удерживается верхним и нижним захватами 6 и 7. Раскрывание и закрывание захватов происходит также при подаче рабочей жидкости в полости цилиндров захватов. Управление процессом испытания осуществляется с помощью системы управления на стойке 1.

1. Машинная диаграмма растяжения

Конструкционные материалы должны обладать определенными механическими свойствами – прочностью, пластичностью.

Прочность – способность материала сопротивляться пластической деформации и разрушению. **Пластичность** – способность материала к пластической деформации без разрушения.

Деформацию растяжения можно охарактеризовать *абсолютным удлинением* или *абсолютной деформацией* Δl , равной разности длин образца после растяжения l_k и до него l_0 : $\Delta l = l_k - l_0$.

При испытаниях автоматически вычерчивается первичная диаграмма растяжения (рис. 3) в координатах «нагрузка P – удлинение Δl ».

На диаграмме « P – Δl » выделяют три участка деформации.

1. *Участок упругой деформации* до нагрузки $P_{упр}$. Упругая деформация полностью исчезает после снятия нагрузки. Пока сила P не достигнет определенной величины, вызванные ею деформации будут исчезать при разгрузке. Процесс разгрузки изобразится той же линией, что и нагружение.

Прямолинейный участок диаграммы OA указывает на пропорциональную зависимость между нагрузкой P и удлинением Δl . Закон пропорциональности установлен Р. Гуком в 1670 г.

2. *Участок равномерной пластической деформации* от нагрузки $P_{упр}$ до нагрузки P_{max} . При нагружении образца более $P_{упр}$ появляется остаточная (пластическая) деформация. Пластическое деформирование идет при возрастающей нагрузке, так как металл упрочняется в процессе деформирования. Упрочнение металла при деформировании называется *наклепом*.

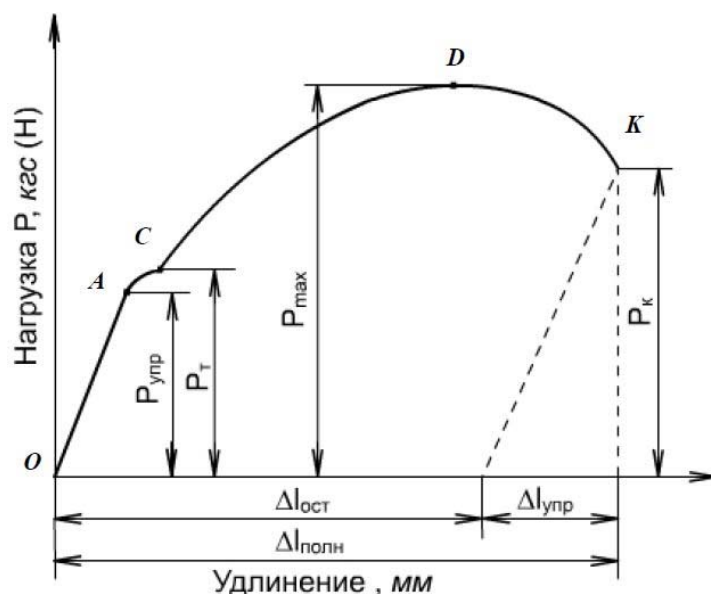


Рис. 3. Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

3. Участок сосредоточенной пластической деформации – от P_{\max} до P_k . После достижения максимального значения нагрузки P_{\max} в наиболее слабом месте появляется местное утонение образца – шейка (рис. 4, б), в которой и протекает дальнейшее пластическое деформирование (деформация шейки). Образование шейки характерно для пластичных материалов, которые имеют диаграмму растяжения с максимумом.

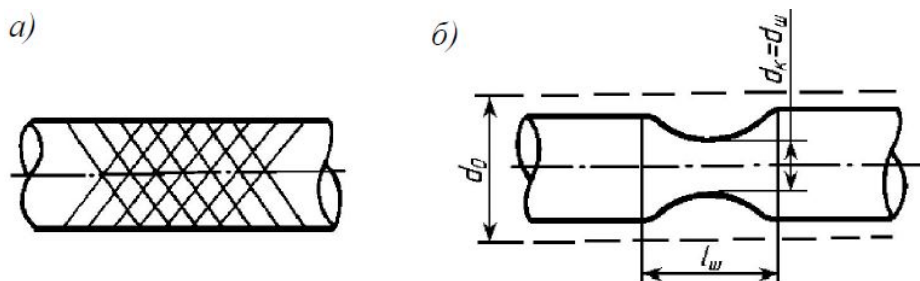


Рис. 4. Образование линий сдвига (а) и местного сужения – шейки (б) при испытании образца на растяжение

Быстрое уменьшение площади сечения шейки вызывает падение нагрузки от P_{\max} до P_k . В момент, соответствующий точке K диаграммы, происходит разрыв образца по наименьшему сечению шейки. При этом упругая деформация образца $\Delta l_{\text{упр}}$ исчезает, а пластическая $\Delta l_{\text{ост}}$ остается (рис. 3).

До точки D диаграммы во всех сечениях поперечные размеры образца уменьшались одинаково. С момента образования шейки вся деформация образца локализуется на малой длине ($l_{\text{ш}} \approx 2d_0$) в области шейки, а остальная часть практически не деформируется (рис. 4, б).

Свойство материала деформироваться при практически постоянной нагрузке называется *текучестью*. Участок диаграммы растяжения AC , который в некоторых материалах может быть практически параллельным оси абсцисс, называется *площадкой текучести*.

В процессе текучести на отшлифованной поверхности образца можно наблюдать появление линий (полос скольжения), наклоненных примерно под углом 45° к оси образца (рис. 4, *a*). Эти линии являются следами взаимных сдвигов кристаллов, вызванных касательными напряжениями.

Для определения упругой деформации в момент разрыва необходимо из точки K диаграммы провести прямую, параллельную прямолинейному участку OA , так как упругие деформации при разрыве также подчиняются закону Гука.

При деформировании твердого тела внутри него возникают внутренние силы. Величину сил, приходящуюся на единицу площади поперечного сечения образца, называют *напряжением*. За единицу механического напряжения в системе СИ принята единица паскаль (Па): $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ и $1 \text{ кгс/мм}^2 = 10 \text{ МПа}$.

2. Диаграмма условных напряжений Механические характеристики материалов

Чтобы исключить влияние размеров и формы деталей, во-первых, испытания проводят на стандартных образцах ГОСТ 1497-84. Во-вторых, результаты пересчитывают на относительные величины: прикладываемую нагрузку – в *механическое напряжение* $\sigma = \frac{P}{F_0}$; абсолютную деформацию – в *относительную деформацию* $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$.

Перестроенная таким образом диаграмма называется *диаграммой условных напряжений* (рис. 5). Такое название объясняется тем, что площадь образца в процессе испытания изменяется.

Предел пропорциональности. Значению нагрузки $P_{\text{пц}}$, при которой нарушается линейная зависимость между нагрузкой P и удлинением Δl (закон пропорциональности), на диаграмме соответствует точка A . Напряжение, вызванное нагрузкой $P_{\text{пц}}$, называется *пределом пропорциональности* и вычисляется по формуле

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0}. \quad (1.1)$$

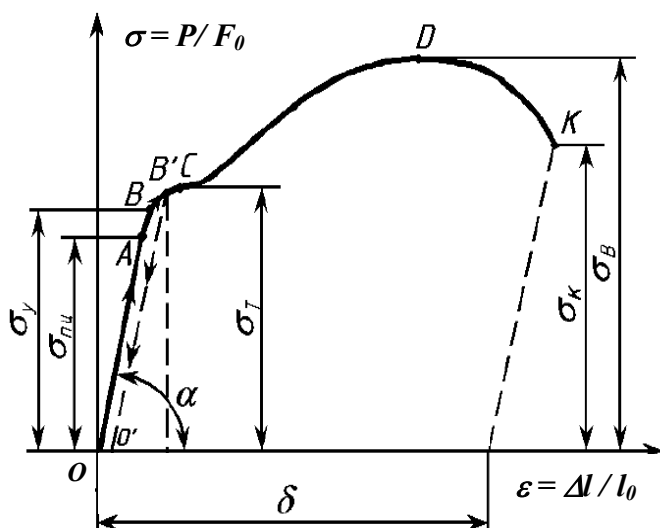


Рис. 5. Диаграмма условных напряжений низкоуглеродистой стали

Таким образом, пределом пропорциональности называется напряжение, после которого нарушается закон Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

где E – модуль нормальной упругости, или модуль жесткости. Модуль E графически изображается тангенсом угла наклона прямолинейного участка к оси абсцисс диаграммы условных напряжений

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \operatorname{tg} \alpha. \quad \text{Величина}$$

модуля зависит от природы сплава и почти не изменяется при изменении состава или структуры. Например, для стали $E = (2,0 \div 2,2) \cdot 10^5$ МПа, для чугуна $E = (0,75 \div 1,6) \cdot 10^5$ МПа.

Предел упругости. Наибольшему значению нагрузки $P_{\text{упр}}$, при которой образец еще не дает при разгрузке остаточной деформации, соответствует точка B . Упругая стадия растяжения образца изображается участком OB диаграммы.

Наибольшее напряжение, до которого остаточная деформация при разгрузке не обнаруживается, называется пределом упругости. Это напряжение вызывается силой $P_{\text{упр}}$ и определяется по формуле

$$\sigma_{\text{уп}} = \frac{P_{\text{уп}}}{F_0}. \quad (1.2)$$

Предел упругости является характеристикой, не связанной с законом Гука. Точка B может располагаться как выше, так и ниже точки A . Эти точки, а следовательно и значения напряжений $\sigma_{\text{пл}}$ и $\sigma_{\text{уп}}$ близки и обычно различием между ними пренебрегают.

Предел текучести – напряжение, при котором происходит рост деформации без увеличения растягивающей нагрузки. Величина предела текучести вычисляется по формуле

$$\sigma_m = \frac{P_m}{F_0}. \quad (1.3)$$

У большей части технических металлов и сплавов на диаграмме отсутствует явно выраженная площадка текучести. В этом случае предел текучести определяется с допуском 0,2 %, т. е. *условный предел текучести* ($\sigma_{0,2}$) – напряжение, при котором образец получает остаточное (пластическое) удлинение, равное 0,2 % своей расчетной длины:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}. \quad (1.4)$$

Предел прочности (временное сопротивление разрыву) – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке P_{\max} , которую выдерживает образец:

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}. \quad (1.5)$$

Напряжение в момент отрыва образца. Обозначив через P_k величину растягивающей нагрузки в момент разрыва, получим

$$\sigma_k = \frac{P_k}{F_0}. \quad (1.6)$$

Определяемое таким образом напряжение при разрыве образца не может быть использовано в качестве характеристики механических свойств металлов и сплавов. Оно получено делением нагрузки в момент разрыва на первоначальную площадь поперечного сечения образца, а не на действительную его площадь при разрыве, которая значительно меньше начальной вследствие образования шейки.

Механические характеристики $\sigma_{\text{пл}}$, $\sigma_{\text{уп}}$, σ_T и σ_B называются **характеристиками прочности материалов**. В практических расчетах оценка механических свойств преимущественно проводится по пределу текучести σ_T и пределу прочности σ_B . Например, для малоуглеродистой стали (0,2 % С), имеющей площадку текучести, $\sigma_T = 300$ МПа, $\sigma_B = 450$ МПа.

Кроме перечисленных выше характеристик прочности материала, при испытании на растяжение определяют также *относительное удлинение* после разрыва δ и *относительное сужение* после разрыва ψ .

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100 \% ; \quad (1.7)$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100 \% , \quad (1.8)$$

где l_0 – первоначальная расчетная, а l_k – конечная расчетная длина образца; $F_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}$ – начальная площадь поперечного сечения, $F_k = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4}$ – площадь поперечного сечения в наиболее тонком месте шейки после разрыва (см. рис. 4).

Механические характеристики δ и ψ являются *характеристиками пластичности материала*: чем они больше, тем материал пластичнее. Для сталей, например, $\delta = 8 \div 45 \%$, $\psi = 40 \div 65 \%$.

3. Диаграмма растяжения хрупких материалов

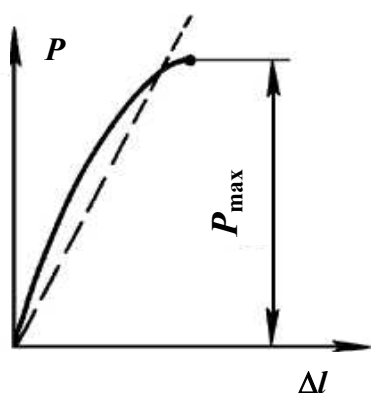


Рис. 6. Диаграмма растяжения чугуна

Хрупкие материалы, например чугун, дают диаграмму растяжения иного характера (рис. 6). Чугун разрушается внезапно без образования шейки при малых деформациях, составляющих $0,5 \div 0,6 \%$ от расчетной длины образца l_0 .

Диаграмма не имеет выраженного прямолинейного участка (отклонение от закона Гука начинается очень рано), площадки текучести и зоны упрочнения. При испытании на растяжение хрупких материалов определяют, как правило, только максимальную нагрузку P_{\max} . При практических расчетах для хрупких материалов отклонение от закона Гука не учитывают и криволинейную диаграмму заменяют условной прямолинейной.

4. Диаграммы растяжения пластмасс

Диаграммы растяжения пластмасс (рис. 7) отличаются от тех, что имеются у металлов, поскольку полимеры характеризуются вязкоупругим поведением под нагрузкой. Деформация полимера – это сумма *упругой, высокоэластичной и вязкотекучей* деформаций. Эти составляющие общей деформации зависят от структуры материала, температуры и условий деформирования.

Все полимеры и пластмассы имеют модули упругости, которые в $100 \div 1000$ раз меньше, чем у металлов. При повышении температуры пластмассы становятся более вязкими. При увеличении скорости деформирования не успевает развиваться высокоэластичная деформация и возрастает склонность к хрупкому разрушению. При длительном дей-

ствии нагрузки уменьшается прочность и появляется ползучесть. Пористые пластмассы имеют наименьшую прочность.

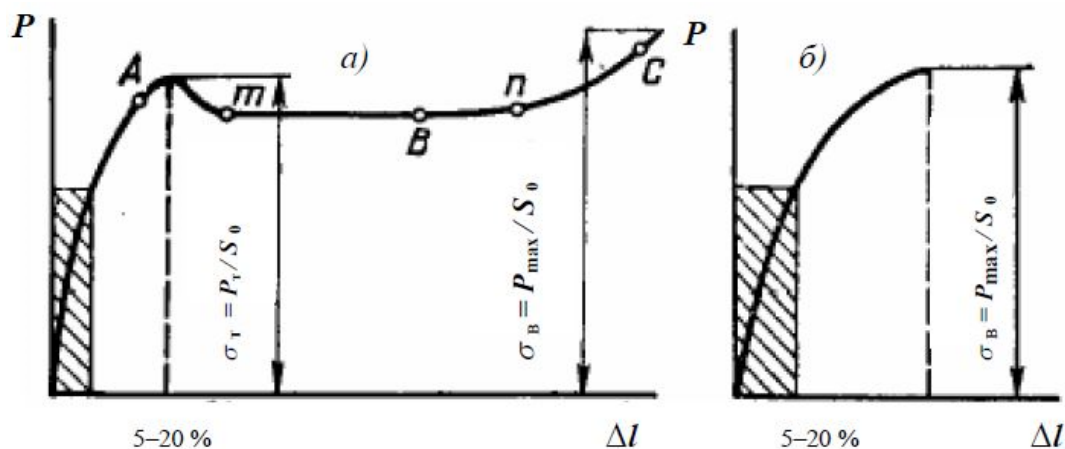


Рис. 7. Диаграммы растяжения пластмасс: а – вязкие аморфные и кристаллические термопласты; б – хрупкие термопласты, реактопласты, вязкие термопласты с ориентированной структурой. Заштрихованная область – допустимые нагрузки и удлинения. А, В, С – точки разрушения полимеров с разной молекулярной массой: $M_A < M_B < M_C$

Термопласты разрываются с остаточной деформацией порядка десятков и сотен процентов (рис. 7, а). Высокоэластичная деформация возникает при вытягивании макромолекул под действием напряжений. При растяжении образца появляется шейка. Пластическое течение представляет постепенное развитие шейки по всему образцу (участок *mn* на рис. 7, а). Высокоэластичная деформация при снятии напряжения не исчезает. Прочность термопластов максимальна вдоль вытянутых молекул.

Пластическая деформация кристаллических полимеров (рис. 7, а) сопровождается *рекристаллизацией*, которая состоит из трех последовательных этапов: разрушение кристаллов под действием напряжения; вытягивание молекул вдоль направления растяжения на участке с разрушенными кристаллами; образования новых, ориентированных кристаллов между параллельно ориентированными молекулами. Новые кристаллы фиксируют высокоэластичную деформацию, которая сохраняется после снятия нагрузки.

Хрупкость пластмасс возрастает при увеличении количества связей, степени кристаллизации полимеров. Для уменьшения хрупкости применяют пластификаторы, а также волокнистые наполнители. Реактопласты прочнее термопластов, их свойства меньше зависят от температуры. Различие связей между молекулами сказывается на виде диаграмм (рис. 7, б). Сетчатая структура мешает развиваться высокоэластичной деформации и реактопласты, как и хрупкие материалы (например, чугун), разрываются с незначительной остаточной деформацией.

5. Порядок проведения испытаний

Перед испытанием необходимо ознакомиться с устройством машины МИРИ-100К и правилами поведения в лаборатории (вводный инструктаж).

До испытания проводится измерение штангенциркулем размеров образца (см. рис. 1) по рабочей части l_0 и d_0 с погрешностью до 0,1 мм. Для этого проводится измерение длины рабочей зоны, отмеченной на образце накерненными точками, и диаметра образца в трех сечениях расчетной зоны. За расчетный диаметр принимается среднее значение по выполненным трем замерам. Рассчитывается начальная площадь поперечного сечения F_0 .

На рабочей части образца наносят метки на расстоянии 5 или 10 мм друг от друга. Благодаря меткам можно определить деформацию как каждого 5 или 10-миллиметрового промежутка и всей рабочей длины образца.

Образец устанавливается в захваты испытательной машины и производится его растяжение.

1. Определение предела текучести и предела прочности. После проведения испытания по машинной диаграмме растяжения определяют нагрузку P_T , соответствующую пределу текучести, и наибольшую разрушающую нагрузку P_{max} . Используя значения P_T , P_{max} и площадь F_0 по формулам (1.3 и 1.4), определяют прочностные характеристики материала σ_T и σ_B .

2. Определение характеристик пластичности материала. После испытания части разорванного образца складывают и штангенциркулем измеряют конечную расчетную длину l_k , а также толщину в наиболее тонком месте шейки d_k . При разрыве образца в средней части расчетной длины измерение l_k производится между крайними рисками, как показано на рис. 8. Измерив l_k по формулам (1.7–1.8), определяют характеристики пластичности материала на растяжение δ и ψ .

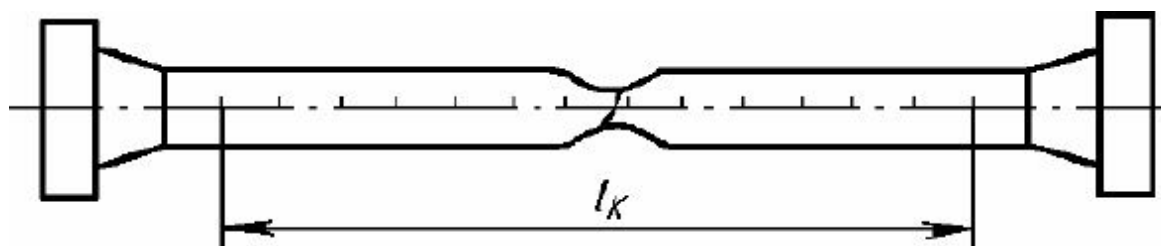


Рис. 8. Определение конечной расчетной длины при разрыве образца в средней части

3. Определение предела пропорциональности. Условный предел пропорциональности находится тогда, когда по диаграмме трудно точно определить точку, до которой сохраняется линейная зависимость между прикладываемой нагрузкой и удлинением образца.

Величину нагрузки $P_{\text{пц}}$ можно с некоторым приближением определить графически на диаграмме растяжения (рис. 9, а). Отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением должно достигнуть такой величины, когда тангенс угла наклона кривой деформации с осью нагрузок увеличится на 50 % своего значения на линейном участке.

- Из начала координат проводят прямую OM , совпадающую с начальным линейным участком диаграммы растяжения.

- Проводят прямую линию AB , параллельную оси абсцисс.

- На прямой AB откладывают отрезок kn , равный половине отрезка mk .

- Через точку n и начало координат проводят прямую On . Тангенс угла наклона β прямой On к оси ординат и будет на 50 % больше тангенса угла наклона α прямолинейного участка OM диаграммы растяжения.

- Параллельно линии On проводят касательную линию CD к диаграмме растяжения.

- Точка касания K определяет нагрузку $P_{\text{пц}}$.

- В соответствии с формулой (1.1) рассчитывают значение предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$.

4. Определение условного предела текучести с допуском 0,2 %.

Вследствие неполного контакта между головками образца и гнездами для них в траверсе в начале диаграммы получается криволинейный участок, который следует исключить, продолжив прямолинейный участок диаграммы до пересечения с осью абсцисс в точке O (рис. 9, б).

- Вычисляют величину пластической деформации, которая составляет 0,2 % от начальной расчетной длины l_0 .

- Найденную величину увеличивают пропорционально масштабу диаграммы, и отрезок $OE = 0,002l_0$ (рис. 9, б) откладывают от точки O .

- Из точки E проводят прямую, параллельную OA . Точка пересечения прямой с диаграммой соответствует нагрузке $P_{0,2}$.

- По формуле (1.6) рассчитывают значение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$.

5. Определение работы, затраченной на деформацию образца.

Для оценки качества испытанного материала необходимо определить работу, затраченную на разрыв образца.

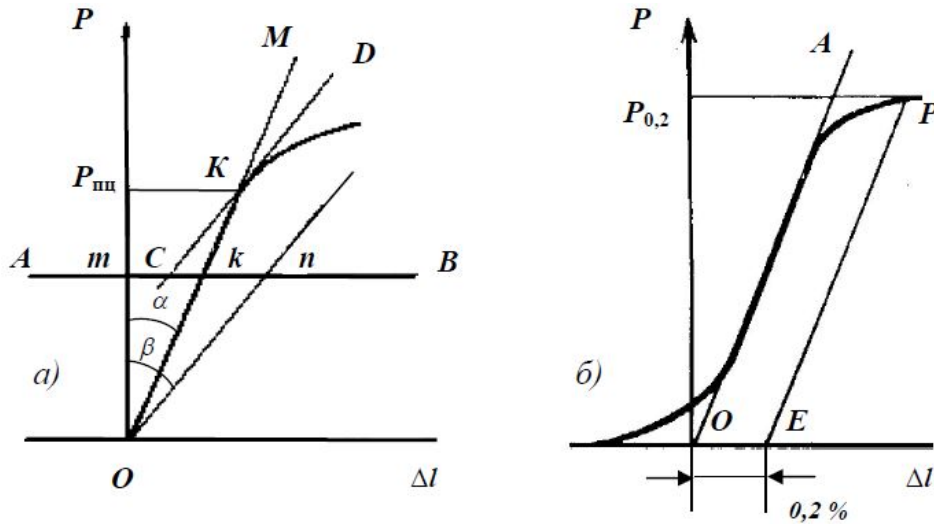


Рис. 9. Начальные участки диаграммы растяжения: а – для определения условного предела пропорциональности; б – для определения условного предела текучести

- Работу деформации в пределах упругости можно выразить через площадь диаграммы OAA_1O (рис. 10).
- Работа, затраченная на образование пластической деформации, графически определяется площадью $OACDKK_1$.
- Полная работа (A), затраченная при растяжении образца до его разрушения, численно равна площади диаграммы растяжения $OACDKK_2O$ с учетом тех же масштабов сил и удлинений: 1 см^2 площади диаграммы соответствует работе деформации $1 \text{ кг}\cdot\text{см}$.
- Удельная работа (a) – отношение полной работы A , затраченной на разрушение образца, к начальному объему средней цилиндрической части образца V :

$$a = A / V$$

характеризует способность материала образца поглощать энергию разрыва, вязкость материала и сопротивляемость его динамическим воздействиям нагрузки.

Для упрощения расчетов работу, затраченную на пластическое деформирование, определяют как площадь прямоугольника с основанием $\Delta l_{\text{ост}}$ и высотой P_{max} (рис. 3).

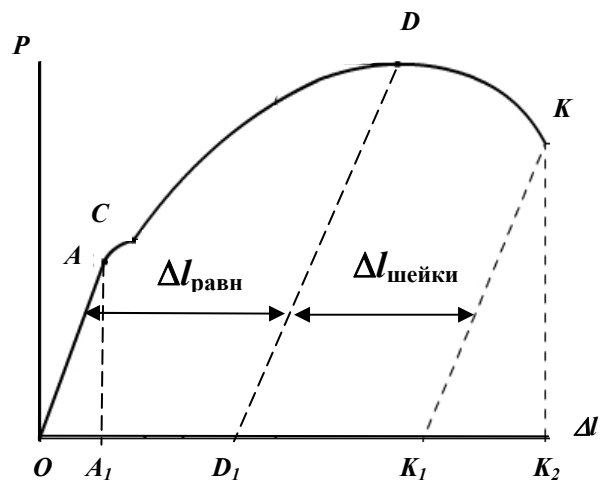


Рис. 10. Полная диаграмма растяжения

6. Обработка результатов испытаний:

1. Замерить конечную рабочую длину и диаметр в шейке образца с помощью штангенциркуля.
2. Определить по диаграмме растяжения величины нагрузок $P_{\text{пц}}$, P_T , P_{max} , $P_{0,2}$ (с учетом масштаба).
3. Определить характеристики прочности $\sigma_{\text{пц}}$, σ_T , σ_B , $\sigma_{0,2}$.
4. Вычислить значения характеристик пластичности δ и ψ .
5. Зарисовать диаграмму растяжения образца в координатах $P - l$, соблюдая масштаб, с указанием точек, соответствующих $P_{\text{пц}}$, P_T , P_{max} , $P_{0,2}$.
6. Зарисовать диаграмму растяжения, пересчитанную в координаты $\sigma - \varepsilon$, с указанием точек, соответствующих $\sigma_{\text{пц}}$, σ_T , σ_B , $\sigma_{0,2}$.
7. Сравнить значения рассчитанных величин со значениями, полученными машиной в автоматическом режиме и отраженными в протоколе испытаний.

Протокол испытаний

Марка материала _____

№ п/п	Снимаемые параметры	Обозначение	Размер	Численная величина
<i>Исходные данные</i>				
1	Рабочая длина образца до испытания	l_0	мм	
2	Диаметр образца до испытания	d_0	мм	
3	Площадь поперечного сечения до испытания	F_0	мм ²	
4	Масштаб записи диаграммы по деформации	M		
<i>Результаты испытаний</i>				
5	Нагрузка, соответствующая пластическому удлинению образца на 0,2 %	$P_{0,2}$	кгс	
6	Максимальная нагрузка при испытании	P_{max}	кгс	
7	Нагрузка в момент разрушения	P_k	кгс	
8	Диаметр образца в момент разрушения	d_k	мм	
9	Площадь поперечного сечения образца в месте разрушения	F_k	мм ²	
10	Рабочая длина образца после испытания	l_k	мм	
<i>Характеристики прочности и пластичности</i>				
11	Условный предел текучести	$\sigma_{0,2}$	кгс/мм ²	
12	Временное сопротивление (предел прочности)	σ_B	кгс/мм ²	
13	Относительное остаточное удлинение	δ	%	
14	Относительное остаточное сужение	ψ	%	
15	Удельная работа на разрушение образца	a		

Контрольные вопросы

1. Какие образцы применяются для испытания материалов на растяжение?
2. Объясните принцип работы испытательной машины.
3. Какой вид имеет диаграмма растяжения для пластичного материала, для хрупкого материала?
4. Чем объясняется наличие участка упрочнения на диаграмме растяжения?
5. Как графически определить модуль продольной упругости E ?
6. Что такое предел пропорциональности, предел упругости, предел прочности (временное сопротивление разрыву)?
7. До какой точки диаграммы растяжения образец деформируется равномерно?
8. Какие механические характеристики определяют прочностные свойства материала?
9. Какие механические характеристики определяют пластические свойства материала?
10. Как определить расчетную длину образца после испытания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Цель работы:

1. Изучить метод определения ударной вязкости.
2. Получить практические навыки по определению ударной вязкости металлических сплавов.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Маятниковый копер МК–30А.
2. Инструментальный микроскоп ММИ-2.
3. Штангенциркуль.
4. Измерительная линейка.
5. Набор образцов.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Сведения об определении ударной вязкости различных материалов.
3. Протокол испытаний.
4. Выводы по работе.

Основные положения

При обработке, а также при эксплуатации металлических изделий могут иметь место процессы пластической деформации, протекающие с различной скоростью. Одни детали машин могут деформироваться в течение ряда лет, другие – за малые доли секунды. При различных условиях эксплуатации изделий скорость деформации может меняться в широчайшем диапазоне – от 10^{-6} до 10^6 с⁻¹. Соответственно, механические свойства металлов могут очень сильно меняться: материал может быть прочным при статических нагрузках, но раскалываться при ударных. Этот факт определяет необходимость проведения динамических испытаний, являющихся ценным, а иногда необходимым дополнением к статическим испытаниям гладких образцов.

Ударные испытания выявляют такие различия между материалами, которые не отражаются при обычных (статических) испытаниях гладких образцов. Например, значения *предела прочности* для мелкозернистого железа ($36,5$ кгс/мм²) и крупнозернистого железа ($34,5$ кгс/мм²) мало отличаются, тогда как в значениях ударной вязкости имеется существенное различие: $13,1$ кгс·м/см² и $2,6$ кгс·м/см² соответственно.

Пластичность также неоднозначно зависит от скорости деформации. В большинстве случаев при ударных испытаниях образцов характеристики пластичности оказываются ниже, чем при аналогичных статических испытаниях. В определенных условиях при высокоскоростной деформации некоторые металлы могут проявлять повышенную пластичность. Так, например, получается при штамповке взрывом (*динамическое сжатие*) металлов с гексагональной решеткой. Характер изменения пластичности и вязкости (*работы деформации*) с увеличением скорости деформации зависит от типа разрушения – *срез или отрыв*. Если при заданной схеме нагружения и температуре материал разрушается путем отрыва, то сопротивление разрушению мало меняется при переходе от статической к динамической деформации. В этом случае пластичность с увеличением скорости уменьшается. Если же разрушение происходит путем среза, то сопротивление разрушению существенно возрастает с ускорением деформации, а пластичность может не меняться или тоже повышаться.

Динамические испытания на ударную вязкость проводят как при комнатной температуре, так и при повышенных и пониженных температурах. Для обеспечения соответствующего температурного режима используют термостаты, в которые помещают образцы и доводят их до нужной температуры с непрерывным контролем. Для обеспечения требуемой температуры испытания образцы перед установкой на копер должны быть переохлаждены или перегреты, исходя из того, что они могут быть испытаны не позднее чем через 5–7 с после извлечения из термостата.

Ударная вязкость определяется при следующих отрицательных температурах: 0, 20, 40, 60, 80, 100 °С, а для специальных целей – и при промежуточных (между указанными выше) температурах. Температурой испытания считается температура у поверхности дна надреза в момент начала разрушения. Для охлаждения до минус 60 °С в качестве охлаждающей жидкости применяется смесь сухого льда с незамерзающей при температуре испытания жидкостью, например: спирт, денатурированный спирт и другие нетоксичные жидкости. При каждой температуре испытаний стандартно необходимо определять ударную вязкость не менее чем на трех образцах, если в дополнительных требованиях не указано другое число образцов. В протокол испытания вносятся величины ударной вязкости для всех образцов.

Свойство материала терять вязкость, хрупко разрушаться при понижении температуры называется *хладноломкостью*. Воздействию низких температур подвергаются стальные конструкции в северных районах страны, охлаждаемые до *климатических температур* (–60 °С); обшивка самолетов, детали ракет и космических аппаратов, охлаждаемые до *температуры жидкого кислорода* (–183 °С); узлы и трубопроводы

холодильной и криогенной техники, охлаждаемые до *температуры жидкого гелия* ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$). Хладноломкость материалов оценивается порогом хладноломкости.

Порог хладноломкости – это температура (интервал температур), при которой происходит переход от вязкого разрушения к хрупкому разрушению; сопровождается резким снижением ударной вязкости. Нижний (t_H) и верхний (t_B) пределы порога хладноломкости определяют в серии ударных испытаний при разных температурах (рис. 1). *Порог хладноломкости* характеризуется одной цифрой (значением температуры полухрупкости), указывающей середину порога t_{50} (т. е. температуру, при которой имеет место 50 % волокнистого излома).

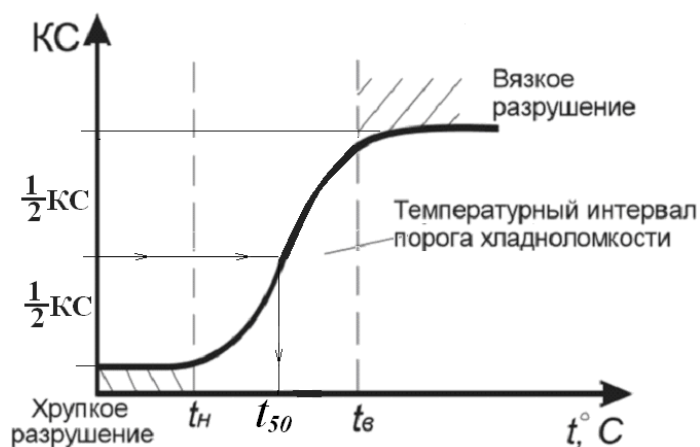


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости от температуры и определение порога хладноломкости

Тип разрушения определяет вид излома металла (рис. 2): хрупкому разрушению соответствует хрупкий излом с блестящим, кристаллическим строением, вязкому разрушению – вязкий излом, имеющий матовое волокнистое строение. При переходе из вязкого состояния в хрупкое меняется вид излома металла: доля волокнистой составляющей в изломе уменьшается, а кристаллической – увеличивается.

Очевидно, чем выше пластические свойства материала и чем менее резко они уменьшаются, тем более надежен этот материал при низких температурах. *Эффективными мерами снижения* порога хладноломкости t_{50} и повышения надежности работы являются: уменьшения содержания углерода, создание мелкозернистой структуры; понижение содержания вредных примесей, легирование стали никелем Ni с последующим термическим улучшением.

Уровень ударной вязкости зависит и от способа выплавки стали: электросталь имеет наибольшую, бессемеровская – наименьшую, мартеновская – промежуточную величину ударной вязкости.

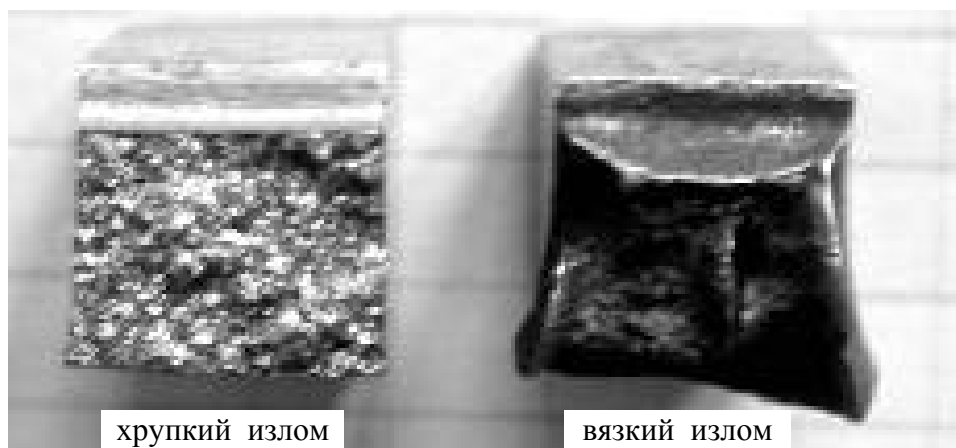


Рис. 2. Виды изломов стали

Ударная вязкость в значительной мере отражает состояние поверхности образца, так как распределение деформации в образце неравномерно и часто бывает сосредоточено в основном в поверхностных слоях. Наличие твердых поверхностных слоев понижает ударную вязкость, а мягкие поверхностные слои повышают ее. Например, если надрезы на стальном образце, предназначенном для испытания на ударную вязкость, сделаны до термической обработки, то даже небольшое обезуглероживание поверхности, приводящее к образованию мягкого и пластичного феррита, может повысить ударную вязкость вдвое. Поэтому при ударных испытаниях предписывается изготовлять надрез на подготавливаемых образцах (ГОСТ 9454-78) после их термической обработки.

Наряду с определением ударной вязкости имеет значение вид излома ударных образцов. В изломе не допускаются газовые поры, шлаковые включения, расслоения и другие дефекты. Однако применять ударные испытания для чугунов, литых алюминиевых и магниевых сплавов – нецелесообразно, так как сопротивление отрыву этих материалов достигается уже при статических нагрузках.

Таким образом, испытания на ударную вязкость являются одним из наиболее чувствительных методов контроля, чутко реагирующих на небольшие изменения состояния металла.

Маятниковый копер для испытания на ударную вязкость и проведение испытания

В настоящее время испытания на ударную вязкость проводят при 20 °С на маятниковых копрах (рис. 3) на образцах с концентраторами различной формы. Характеристики копра МК-30А представлены в табл. 1. Число «30» в маркировке копра показывает максимальную работу удара в кДж, которую может совершать маятник при проведении испытаний (ГОСТ 10708-82).

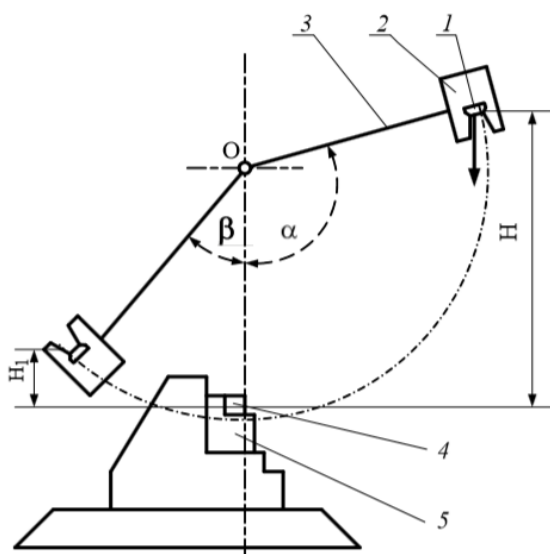


Рис. 3. Кинематическая схема маятникового копра: 1 – нож; 2 – маятник; 3 – штанга; 4 – образец; 5 – опоры

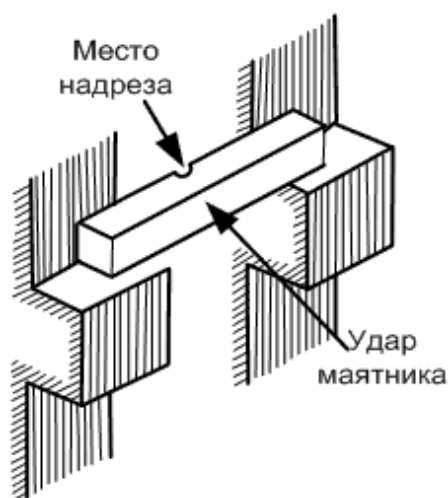


Рис. 4. Расположение образца на опорах копра

Копер состоит из чугунной станины в виде массивной плиты с двумя вертикальными колоннами. При испытании образец 4 устанавливается горизонтально на опоры 5 копра так, чтобы концентратор располагался симметрично относительно опор (рис. 4). Расстояние между опорами копра должно быть 40 мм. Образец разрушается ударом ножа 1, закрепленного на маятнике 2, который вращается вокруг оси O и соединен с ней штангой 3. Маятник свободно падает с высоты H , определяемой углом подъема маятника α . Направление удара – поперек образца, со стороны, противоположной надрезу. Удар падающего маятника должен приходиться по ослабленному месту (сечению), т. е. в зоне надреза. Надрез является концентратором напряжения. Чем он острее, тем сильнее действует концентратор напряжения.

Маятник, поднятый на определенный угол, обладает запасом энергии. Запас энергии определяется как произведение веса маятника на высоту подъема его центра тяжести. В конце свободного падения маятник, встретившись с образцом и затратив на его разрушение часть энергии, поднимается на определенный угол β . Работу, затраченную на разрушение образца, определяют как разность запасов энергии маятника до и после удара по формуле

$$K = G (H - H_1), \text{ кгс} \cdot \text{м},$$

где G – вес маятника, кг; H и H_1 – высота подъема центра тяжести маятника относительно точки встречи с образцом соответственно до и после удара.

Таблица 1

Основные технические данные копра МК-30А

Характеристика	Значение
Тип копра	маятниковый
Вид испытаний	двухопорный ударный изгиб
Подъем маятника	вручную
Расстояние между опорами	от 40 до 100 мм
Радиус закругления ножа в поперечном сечении	$3 \pm 0,5$ мм
Радиус окружности передней кромки ножа	67 мм
Угол заострения ножа молота	$40 \pm 1^\circ$
Число ступеней запаса энергии	16
Наибольший запас потенциальной энергии маятника	30 кгм (~300 Дж)
Цена деления шкалы отсчетного маятника	0,2 кгм
Предел допустимой абсолютной погрешности измерения	$\pm 0,1$ кгм
Скорость движения маятника в момент удара	$5 \pm 0,5$ м/с

Измерительное устройство копра градуируют непосредственно в единицах затраченной работы, что позволяет не вычислять работу разрушения по формуле, а отсчитывать ее непосредственно по шкале измерительного устройства. Данные о затраченной работе позволяют определить **ударную вязкость**, под которой понимается *работа удара, отнесенная к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора*.

Основная форма образца – стержень квадратного сечения 10×10 мм и длиной 55 мм. Его вырезают на металлорежущих станках. Надрез наносится по середине длины образца, преимущественно протяжкой. ГОСТ 9454-78 предусматривает образцы с концентраторами напряжений трех видов: *U*-образным ($r = 1$ мм), *V*-образным ($r = 0,25$ мм), и *T*-образным (усталостная трещина). Трещину у вершины надреза получают при плоском циклическом изгибе образца. Число циклов, необходимое для получения трещины заданной глубины, должно быть не менее 3000. Форма и размеры образцов для испытания соответствуют рис. 5.

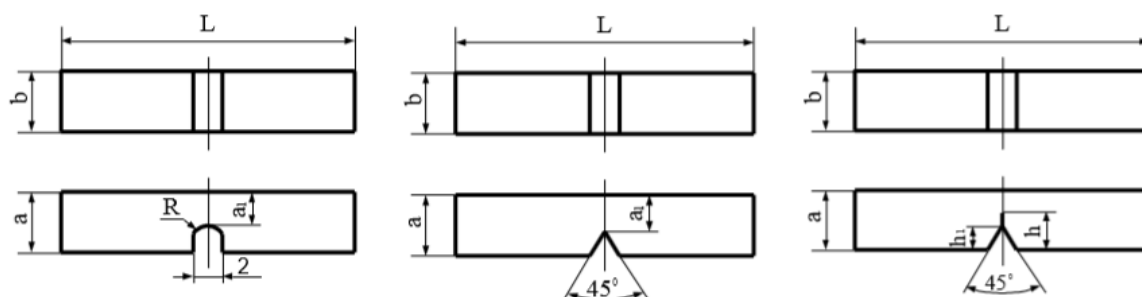


Рис. 5. Образцы с концентраторами вида U, V и T

Чем острее надрез, тем больше величина концентрации напряжений. Разные виды искусственных концентраторов позволяют комплексно оценить способность металлических сплавов сопротивляться разрушению, т. е. зарождению и развитию трещины.

Работу удара обозначают двумя буквами (KU , KV , KT) и цифрами. Первая буква (K) – символ работы удара, вторая буква (U , V , T) – 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 маятника 294 Дж (300 кгс м), при глубине концентратора 2 мм – для концентраторов U и V и 3 мм – для концентраторов вида T и ширине образца 10 мм. Ударную вязкость обозначают сочетанием букв и цифр: первые две буквы KC обозначают символ ударной вязкости, третья буква (U , V , T) – вид концентратора, первая цифра – максимальную энергию удара маятника, вторая – глубину концентратора, третья – ширину образца. Ударную вязкость KC вычисляют по формуле

$$KC = \frac{K}{S_0}, \text{ Дж/см}^2 \text{ (кгс м/см}^2\text{)},$$

где K – работа удара, затраченная на разрушение образца, Дж (кгс м); S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, м² (см²).

Пример обозначения ударной вязкости для стандартного образца с U -образным видом концентратора:

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

Для обозначения работы удара и ударной вязкости при пониженной и повышенной температуре вводится дополнительный индекс, указывающий температуру испытания. Цифровой индекс ставят вверху, после буквенных составляющих. Примеры расшифровки обозначений:

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

$KCT^{+100} 150/3/7,5$ – ударная вязкость, определенная на образце с концентратором вида T при температуре $+100$ °С. Максимальная энергия удара маятника – 150 Дж, глубина концентратора – 3 мм, ширина образца – 7,5 мм.

Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство маятникового копра МК-30А. Начертить схему его работы и ознакомиться с принципом измерений.
2. Определить площадь поперечного сечения образца в месте надреза. Начертить схему образца.
3. Провести испытания и зафиксировать работу удара, затраченную на разрушение.
4. Определить ударную вязкость разных образцов.
5. Занести полученные численные значения в протокол испытаний.
6. Сравнить значения рассчитанных величин.
7. Определить виды изломов и зарисовать их схемы.
8. Составить письменный отчет и сделать выводы по работе.

Протокол испытаний

Марка копра _____
 Максимальная энергия удара маятника при испытании _____
 Скорость маятника в момент удара _____
 Испытуемый материал _____

№	Маркировка образца	Температура испытания, °С	Ширина образца B	Высота образца H	Глубина концентратора h	Высота рабочего сечения H_1	Площадь поперечного сечения S_0 , см ²	Работа удара K , Дж (кгс·м)	Ударная вязкость KC , Дж/см ² (кгс·м/см ²)
			см						

Контрольные вопросы

1. В каких случаях проводятся испытания на ударную вязкость?
2. Что такое ударная вязкость? Что такое работа удара?
3. В каких единицах измеряется ударная вязкость?
4. Какие факторы влияют на величину ударной вязкости?
5. О каких свойствах материала судят по величине ударной вязкости?
6. Как определить энергию, запасенную маятником в самом верхнем положении?
7. Как влияет расстояние между опорами установки образца на величину удельной ударной вязкости?
8. Чем принципиально отличаются образцы из металла от образцов из других материалов?
9. Как изменится ударная вязкость с изменением температуры?
10. Что понимают под температурным интервалом хрупкости?
11. В чем состоит принцип работы маятникового копра?
12. Какие материалы подвергаются испытаниям на ударную вязкость?
13. В чем сходство и различие статических и динамических испытаний?

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ. ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА.....	25
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, НАКЛЕП И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ	42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 МИКРОСТРУКТУРА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ.....	53
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ЧУГУНОВ	60
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 ЗАКАЛКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ.....	67
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 ОТПУСК ЗАКАЛЕННОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ.....	75
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	81
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 МИКРОСТРУКТУРА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ	88
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12 ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ.....	96
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ.....	111

Учебное издание

ЕГОРОВ Юрий Петрович
ЛОЗИНСКИЙ Юрий Михайлович
МАРР Евгений Иосифович
РООТ Раиса Васильевна
ХВОРОВА Ирина Александровна
ЕВТЮШКИН Юрий Александрович
БАГИНСКИЙ Андрей Геннадьевич
БЕЗБОРОДОВ Валерий Павлович
КОВАЛЕВСКАЯ Жанна Геннадьевна
УТЬЕВ Олег Михайлович
ЧИНКОВ Евгений Петрович
СТРЕЛКОВА Ирина Леонидовна
ПЕТРЕНКО Юрий Николаевич

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум

Учебное пособие

Научный редактор
кандидат физико-математических наук
Е.П. Чинков

Корректурa *Н.Т. Синельникова*

Компьютерная верстка *Д.В. Сотникова*

Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

Подписано к печати 20.06.2014. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 7,04. Уч.-изд. л. 6,36.

Заказ 622-14. Тираж 100 экз.




Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru