

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Порошковая металлургия, сварка
и технология материалов»

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебно-методическое пособие
для студентов энергетических специальностей

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области металлургического оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2022

УДК 669.018.29.017(076.5)(075.8)

ББК 34.431я7

К65

А в т о р ы:

М. В. Гольцова, Ф. И. Пантелеенко, Т. В. Силина, А. Б. Бычек

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Технологии металлов» Белорусского
государственного аграрного технического университета
(зав. кафедрой, д-р техн. наук, профессор *В. М. Капцевич*);
зав. кафедрой «Материаловедение и проектирование
технологических систем» Белорусского государственного
технологического университета, доцент, канд. техн. наук *Д. В. Куис*

К65 **Конструкционные материалы** : учебно-методическое пособие
для студентов энергетических специальностей / М. В. Гольцова
[и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – 71 с.
ISBN 978-985-583-780-1.

В учебно-методическом пособии изложены рекомендации по выполнению лабораторных работ по принципам классификации и маркировки конструкционных материалов, их структуре и свойствам, методам термической обработки, сварочным технологиям и обработке резанием. Каждая лабораторная работа содержит краткие теоретические сведения, экспериментальную часть и вопросы для самоконтроля. Пособие предназначено для студентов энергетических специальностей, изучающих дисциплины «Конструкционные материалы», «Конструкционные и электротехнические материалы», «Материаловедение».

УДК 669.018.29.017(076.5)(075.8)

ББК 34.431я7

ISBN 978-985-583-780-1

© Белорусский национальный
технический университет, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Классификация конструкционных материалов. Маркировка сталей и сплавов	4
Лабораторная работа № 2. Измерение твердости металлов	14
Лабораторная работа № 3 .Испытания на растяжение и ударную вязкость	25
Лабораторная работа № 4. Диаграмма состояния системы железо-углерод. Структура сталей	33
Лабораторная работа № 5. Структура и свойства чугунов.....	41
Лабораторная работа № 6. Термическая обработка стали. Закалка и отпуск закаленной стали.....	45
Лабораторная работа № 7. Технология сварки металлов	54
Лабораторная работа № 8. Обработка металлов резанием.....	63
Список использованных источников.....	71

Лабораторная работа № 1

КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. МАРКИРОВКА СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Цель работы: изучить классификацию конструкционных материалов и принципы маркировки сталей и сплавов, выполнить индивидуальное задание.

Теоретические сведения

Марка стали (сплава) – это буквенно-цифровое обозначение, в котором зашифрованы химический состав и в ряде случаев свойства конкретного сплава.

В мире производятся тысячи различных сплавов. Их многообразие обусловлено многообразием потребностей: под различное применение должны быть произведены сплавы различного состава. В одних случаях можно использовать углеродистые стали, в которых основными компонентами являются Fe и C. В других случаях требуются стали, легированные различными компонентами для достижения специальных или особых свойств (*легирование* – это процесс введения в состав сплава определенных химических элементов для улучшения физических и химических свойств; сплав, подвергшийся легированию, называется *легированным*). В иных случаях необходимо использовать сплавы на основе меди, алюминия или других цветных металлов. Однако не существует единой всемирной системы маркировки производимых и используемых в мире сплавов.

На территории постсоветского пространства составы и свойства сплавов различных марок регламентируются по ГОСТам и ТУ, в европейских странах действуют стандарты EN и DIN (Германия), в США – стандарты AISI, ASTM, ASME, в Японии – JIS. При сравнении этих стандартов можно найти аналоги сталей и сплавов, производимые в разных странах. Как правило, они являются конструкционными материалами.

Конструкционные материалы – это материалы, из которых изготавливают детали машин и сооружений (конструкций).

Классификация конструкционных материалов приведена на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Классификация конструкционных материалов

Для обозначения сталей и сплавов в России, Беларуси и других странах СНГ принята к использованию система, в которой, согласно ГОСТу, буквами условно обозначаются названия элементов и способы выплавки стали, а цифрами – содержание элементов.

Существуют определенные особенности маркировки для разных групп сталей.

1.1. Маркировка углеродистых сталей

1.1.1. Стали обыкновенного качества. Все стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-2005) маркируются буквами «Ст». Это стали марок Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гпс, Ст6пс, Ст6сп. Цифры – условный номер марки в зависимости от химического состава и временного сопротивления разрыву, буква «Г» – марганец при его массовой доле в стали 0,80 % и более. В конце марки идут сочетания букв, показывающие степень раскисления стали: «кп» – кипящая, «пс» – полуспокойная (частично раскислена марганцем и кремнием), «сп» – спокойная (полностью раскислена марганцем, кремнием и алюминием).

Важно понимать, что спокойная сталь – это сталь, из которой практически полностью удален кислород, в результате чего образовалась усадочная раковина на поверхности слитка. Спокойная сталь имеет более однородную структуру и лучшие механические свойства, она хорошо поддается сварке и переходит в хрупкое состояние

при более низких температурах по сравнению с полуспокойной и тем более кипящей.

Полуспокойная сталь – сталь, в которой выделение газов не полностью подавляется. Имеет средние показатели качества, используется для малоответственных изделий металлопроката (катанка, полоса, уголки).

Кипящей называют малораскисленную сталь, интенсивно выделяющую газы в изложнице во время застывания. Основной признак слитка кипящей стали – отсутствие сосредоточенной усадочной раковины и наличие множественных газовых пузырей по всему сечению слитка. Она довольно хрупкая и плохо подвергается сварке, легко корродирует.

Обыкновенное качество этой группы сталей объясняется прежде всего наибольшим количеством вредных примесей (серы и фосфора). В стали Ст0 массовая доля серы должна быть не более 0,060 %, фосфора – не более 0,070 %, а в сталях всех остальных марок серы – не более 0,050 %, фосфора – не более 0,040 %.

Сопоставление перечисленных марок стали с марками по международным стандартам ISO 630 и ISO 1052 приведено в ГОСТ 380-2005.

1.1.2. Качественные конструкционные углеродистые стали (ГОСТ 1050-88) маркируют словом «Сталь» (пишется без сокращений) и цифрами 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58 (55пп), 60. Цифры означают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Пример маркировки:

Сталь 40 – качественная конструкционная углеродистая сталь с содержанием углерода 0,4 %, спокойная.

1.1.3. Инструментальные углеродистые стали (ГОСТ 1435-90) тоже качественные. Они маркируются большой буквой «У» и цифрами, которые означают содержание углерода в десятых долях процента. Эти стали всегда качественные, спокойные. Массовая доля вредных примесей (серы и фосфора) не должна превышать в них 0,028 % и 0,030 % соответственно. Однако если сталь высококачественная, то в конце марки ставится буква «А». Массовая доля серы и фосфора в высококачественных сталях не должна превышать 0,018 % и 0,025 % соответственно.

Обычно в качестве инструментальных используют стали с повышенным содержанием углерода (0,75–1,3 %). Они отличаются высокой твердостью и прочностью. Из них изготавливают сверла, метчики, развертки, а также пуансоны и матрицы штампов для холодной штамповки. Недостатком углеродистых инструментальных сталей является их низкая теплостойкость – при нагреве этих сталей в закаленном состоянии выше 200 °С их твердость снижается, поэтому в этих случаях целесообразно применять легированные инструментальные стали. Примеры маркировки углеродистых инструментальных сталей:

У8 – инструментальная углеродистая сталь со средним содержанием углерода 0,8 %, качественная, спокойная.

У12А – инструментальная углеродистая сталь со средним содержанием углерода 1,2 %, высококачественная, спокойная.

1.1.4. Легированные стали. Буквенные обозначения химических элементов, входящих в состав легированных сталей, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Буквенные обозначения легирующих элементов

Обозначение	Хим. элемент	Наименование
Х	Cr	Хром
С	Si	Кремний
Т	Ti	Титан
Д	Cu	Медь
В	W	Вольфрам
Г	Mn	Марганец
Ф	V	Ванадий
Р	B	Бор
А	N	Азот
Н	Ni	Никель
К	Co	Кобальт
М	Mo	Молибден
Б	Nb	Ниобий
Е	Se	Селен
Ц	Zr	Цирконий
Ю	Al	Алюминий

В маркировке легированной стали первое число показывает содержание углерода: для конструкционных сталей – в сотых долях процента, для инструментальных – в десятых долях процента. Если число впереди букв отсутствует, то содержание углерода составляет примерно один процент.

Затем следуют буквы русского алфавита, обозначающие легирующий элемент. За буквой стоит цифра, указывающая содержание данного элемента в процентах. Если за буквой цифры нет, это означает, что содержание легирующего элемента составляет около 1,0 %. Буква «А» впереди марки означает автоматную сталь, т. е. сталь для механической обработки на станках-автоматах с короткой дискретной стружкой. Если буква «А» стоит в конце марки, это значит, что сталь высококачественная.

Например, марка **35Х3Н5** обозначает конструкционную легированную качественную сталь, содержащую около 0,35 % углерода, 3 % хрома, 5 % никеля, остальное железо.

9ХВГА – инструментальная легированная высококачественная сталь, содержащая 0,9 % углерода, по 1 % хрома, вольфрама и марганца.

Некоторые группы сталей содержат дополнительные обозначения: марки шарикоподшипниковых сталей начинаются с буквы «Ш», быстрорежущих – «Р».

Так, **ШХ15** – шарикоподшипниковая сталь, содержащая 1 % углерода, 1,5 % хрома (в маркировке шарикоподшипниковых сталей цифра указывает содержание хрома в десятых долях %).

Р5М5 – быстрорежущая сталь, содержащая 1 % углерода, 5 % вольфрама, 5 % молибдена.

1.2. Маркировка чугунов

В общем смысле чугун – сплав железа с углеродом при содержании углерода более 2,14 %, но менее 6,67 %. Существует много подвидов чугуна, основные из которых – серые чугуны с пластинчатым графитом, ковкие, высокопрочные, антифрикционные.

«СЧ» – серый чугун. При маркировке, согласно ГОСТ 1412-85, буква «С» обозначает серый, «Ч» – чугун. При написании обычно указывается с цифрами, обозначающими временное сопротивление разрыву $\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм² (МПа · 10⁻¹), также называемое пределом прочности. Марки серых чугунов варьируются от СЧ15 до СЧ35.

Например: **СЧ15** – серый чугун с временным сопротивлением разрыву $\sigma_b = 150$ МПа.

«КЧ» – ковкий чугун (ГОСТ 1215-79). После буквенного обозначения также идут две группы цифр, обозначающие показатель предела прочности при растяжении в кгс/мм² и относительное удлинение материала в процентах. Например: **КЧ 35-10, КЧ 65-3**.

«ВЧ» – высокопрочный чугун (ГОСТ 7293-85). После буквенного обозначения следуют цифры, обозначающие величину минимального временного сопротивления при растяжении в кгс/мм². Например: **ВЧ35, ВЧ100**.

«ЧВГ» – чугун с вермикулярным графитом (ГОСТ 28394-89). «ВГ» – обозначение формы графита (вермикулярный), цифры в марке – временное сопротивление разрыву σ_b , кгс/мм²: **ЧВГ30, ЧВГ45**.

Антифрикционные чугуны относятся к легированным чугунам. Для придания этим чугунам антифрикционных свойств используются хром, никель, медь, титан. Маркируют буквами «АЧ» – антифрикционный чугун; далее следует одна из букв: «С» – серый, «В» – высокопрочный, «К» – ковкий. Цифры обозначают порядковый номер сплава согласно ГОСТ 1585-85. Например: **АЧС-6, АЧВ-2, АЧК-2**.

1.3. Маркировка цветных сплавов

1.3.1. Маркировка бронз и латуней. Бронзы – сплавы меди и олова, латуни – сплавы меди и цинка. Маркировка бронз и латуней также производится буквенно-цифровыми кодами. Вначале идет буквенное сочетание «Бр», обозначающее бронзу, либо «Л» – латунь, затем – добавочные буквы, показывающие наличие легирующих элементов, и только потом цифры, обозначающие их процентное содержание в сплаве.

Принято следующее обозначение легирующих элементов в медных сплавах: «А» – алюминий, «Мц» – марганец, «С» – свинец, «Б» – бериллий, «Мг» – магний, «Ср» – серебро, «Ж» – железо, «Мш» – мышьяк, «Су» – сурьма, «К» – кремний, «Н» – никель, «Т» – титан, «Кд» – кадмий, «О» – олово, «Ф» – фосфор, «Х» – хром, «Ц» – цинк.

Примеры маркировок:

БрА9Мц2Л – бронза, содержащая 9 % алюминия, 2 % марганца, остальное – медь (буква «Л» в конце маркировки указывает, что сплав литейный).

БрОФ8-0,3 – бронза, содержащая 8 % олова и 0,3 % фосфора, остальное – медь.

ЛАЖМц66-6-3-2 – латунь, в которой содержится 66 % меди, 6 % алюминия, 3 % железа и 2 % марганца. Цинка в ней $100 - (66 + 6 + 3 + 2) = 23$ %.

В несложных по составу латунях указывают только содержание в сплаве меди:

Л96 – латунь, содержащая 96 % Cu и ~4 % Zn (томпак).

Л63 – латунь, содержащая 63 % Cu и 37 % Zn.

1.3.2 Маркировка алюминиевых сплавов. В буквенно-цифровой маркировке алюминиевых сплавов не заложено строгой системы. Буквы могут символизировать алюминий и основной легирующий компонент (АМц (Al-Mn), АМг1 (Al-Mg)), назначение сплава (АК6, АК4-1 – алюминий ковочный), название сплава (АВ – авиаль, Д16 – дюралюминий), могут быть связаны с названием института, разработавшего сплав (ВАД1, ВАД23 – Всероссийский институт авиационных материалов, алюминиевый деформируемый) и т. д. Цифры после букв химический состав не отражают, но показывают порядковый номер в ГОСТе.

ГОСТ 4784-2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки» дает маркировку сплавов тремя способами: в цифровом виде, в буквенно-цифровом, а также с учетом требований международного стандарта ISO 209-1. При этом цифровая маркировка по ГОСТу не совпадает с международной.

В зависимости от производителя алюминиевые сплавы могут маркироваться по аналогии с нержавеющей прокатом с указанием сокращений названий легирующих элементов. Например, маркировка АК6М1 указывает, что данный металл включает в себя 6 % кремния и 1 % меди. В этом случае таблица обозначения металлов полностью соответствуют общепринятым стандартам: «Ц» – цинк, «Т» – титан, «Н» – никель, «К» – кремний и т. д.

Технический деформируемый алюминий без примесей маркируется буквами «АД» с указанием степени очистки, выражаемой в двух маленьких буквах («оч» – очень чистый и т. д.). В аббревиатуру технического алюминия могут включаться обозначения легирующих элементов. Цифры после маркировки АД также обозначают чистоту сплава в процентах. Например, марка АД31 соответ-

стствует химическому составу алюминиевого сплава, в котором содержится до 3,1 % примесей.

Так, дюралюминий (относится к сплавам системы Al-Cu-Mg, применяемым в деформированном виде и упрочняемым термической обработкой) обозначается буквой «Д» с последующим указанием чистоты сплава в процентах. Металл под маркировкой Д1 – это обыкновенный дюралюминий для широкого использования. Д16 и Д6 отличаются более высоким содержанием меди и магния соответственно. Для поковки и штамповки используют стандартный дюралюминий, обозначаемый АК1, и аналогичные алюминиевые сплавы, маркируемые аббревиатурами АК5, АК6 и АК8. Дюралюминиевые сплавы повышенной прочности маркируют буквой «В» (например, В95, В96, В93) и активно используют в самолетостроении. В этих металлах преобладают цинковые включения (до 7 % от общего объема), что обеспечивает необходимый запас твердости внутренней структуры и поверхности.

Силумин – сплав на основе алюминия (~90 %) и кремния, относящийся к литейным сплавам. Порядок буквенных обозначений определяется исходя из процентного соотношения компонентов, поэтому марка силумина всегда начинается с буквы «А». Цифры указывают на процентное соотношение каждого компонента, кроме алюминия в составе. К примеру, АК20 показывает, что в составе 20 % кремния и, соответственно, 80 % алюминия.

Литейные сплавы имеют маркировку «АЛ» с последующей цифрой, обозначающей номер марки в ГОСТе. АЛ2 – это нормальные силумины, АЛ4 и АЛ9 – это литейные сплавы с минимальным количеством кремния и повышенным содержанием магния и марганца. Аббревиатурами АЛ3, АЛ5, АЛ6 обозначаются алюминиевые сплавы, легированные медью, которые характеризуются слабыми литейными свойствами, но при этом выгодно отличаются отличной способностью к любой механической обработке. Маркировкой АЛ11 обозначают литейный сплав с цинковой присадкой, который используют при отливке деталей сложной конфигурации. Литейный алюминиевый сплав АЛ7 применяется для изготовления небольших деталей путем литья, которые впоследствии подвергаются активной механической обработке. Сплав АЛ12 предпочтителен для точного фасонного литья, однако механическая обработка деталей из этого металла нецелесообразна. Обозначением АЛ8 маркируют заготовки из алюминиевого сплава, созданного на основе химической пары

Al-Mg, так называемого магналия, отличающегося высокой прочностью, плотностью и химической пассивностью.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал.
2. По индивидуальному заданию (табл. 1.2) расшифровать заданные марки стали и сплавов.
3. Составить отчет.

Таблица 1.2

Индивидуальные задания по вариантам

Номер варианта	Индивидуальное задание
1	Сталь 10, 30X13, Р6М5Ф2К8, СЧ15, БрА9Ж4Н4Мц1, АМг6, Л80
2	09Х16Н4Б, Ст3кп, СЧ18, ЛЦ23А6Ж3Мц2, Д16, БрАЖ9-4, АЧВ-2
3	Р12, 13Х14НВ2ФР, Ст5пс, СЧ20, ЛЦ38Мц2С2, АМг2, БрА7Мц15Ж3Н2Ц2
4	08Х18Т1, У10А, ВЧ40, Бр06Ц6С3, АЛ9, ШХ9, КЧ50
5	Ст1пс, 50ХГ, СЧ10, АЧС-6, БрКМц3-1, АК7, Л63
6	15Х7Н2Т, Р6М5Ф2К8, ШХ9, КЧ60-3, ЛК80-3, Ст3пс, Сталь 20
7	Сталь 45, Ст5, СЧ24, БрОЦС5-5-5, Сталь 15; Д18, ЛС59-1
8	45ХН3МФ-Ш, ЛАЖ60-1-2, У11, БрОЦ4-3, КЧ 35-14, ВЧ45, Ст3кп
9	У9, 07Х25Н13, ШХ15, КЧ35-10, БрАЖНМц9-4-4-1, АЧК-1, Р6М5Ф2К8
10	Ст3пс, 20Х12ВНМФ, Ст35пс, ВЧ80, ЛАНКМц75-2-2, А7, У8
11	40ХМФА, ВЧ80, БрА7Мц15Ж3Н2Ц2, Д18, Р9, 25ХГС, Ст6
12	36Х18Н25С2, Ст2, КЧ60-3, БрАЖНЮ-4-4, АК12М2МгН, ЛО70-1, Сталь 45
13	38Х2МЮА, Ст4пс, 50Г, АЧС-3, Л68, ЛЦ40Мц3А, Бр04Ц7С5
14	15Х6Ю, Р6М5, У13А, АЧК-2, ЛС59-1, Д12, БрАЖН10-4-4
15	Р9, 10Х17Н13М2Т, ЛЖМц59-1-1, АК4М4, АЧВ-2, Ст2кп, СЧ25, БрА9Мц2Л

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип маркировки на территории СНГ?
2. Существует ли единая мировая маркировка стали и сплавов?
3. В чем особенности маркировки алюминиевых сплавов?
4. Что зашифровано в марках чугуна? Стали?
5. Как маркируются латунь и бронза?

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: изучить методы определения твердости металлов по Бринеллю и Роквеллу, провести измерения, проанализировать результаты.

Теоретические сведения

Твердость – это способность материала сопротивляться проникновению в него более твердого тела, называемого индентором, при внешних нагрузках. Твердость является прочностной характеристикой: чем больше твердость металла, тем выше его прочность. Связь между временным сопротивлением разрыву (пределом прочности) и твердостью устойчивая для конструкционных металлических материалов и подчиняется соотношению:

$$\sigma_{\text{в}} = 0,33HB, \quad (2.1)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление разрыву (предел прочности);
 HB – твердость по Бринеллю.

Измерение твердости металлов и сплавов – самый быстрый способ оценить соответствие данного конструкционного металлического материала требованиям к уровню его прочности. Этот способ не требует приготовления специальных образцов и не связан с их разрушением. Поэтому твердомерами оборудованы не только лаборатории, но и производственные цеха, в которых производят термическую и другую обработку металлов.

Современные портативные твердомеры представляют собой компактные приборы, позволяющие мгновенно переводить полученные результаты в различные единицы твердости, соответствующие различным методикам измерения.

Применяемые на сегодняшний день методы измерения твердости можно условно разделить на статические, динамические и ультразвуковые. В статических твердомерах время приложения нагрузки на индентор составляет от нескольких секунд до минуты, а твердость определяется по размерам полученного отпечатка. Динамиче-

скими методами твердость определяют по высоте или скорости отскока падающего бойка. К динамическим методам относят твердость по Шору и по Полюди. Отдельно можно выделить ультразвуковые твердомеры, в которых происходит статическое нагружение колеблющегося на высокой частоте штока с индентором, а твердость измеряется по изменению частоты колебания индентора.

Необходимо отметить, что существуют разные структурные уровни измерения. Перечисленные выше методы позволяют измерить твердость металла или сплава в целом. Метод измерения микротвердости позволяет определить твердость отдельных структурных составляющих, фаз или зерен. Разработанный в XXI веке метод измерения нанотвердости позволяет исследовать твердость тонких слоев металла (до 2000 нм), границ зерен, и т. д., а также позволяет определить другие механические характеристики, например, модуль упругости.

В данной лабораторной работе основное внимание будет уделено статическим методам измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу.

2.1. Измерение твердости методом Бринелля

Шведский инженер и металлург Юхан Август Бринелль разработал свой метод определения твердости металлов в 1900 году. Идея его метода заключается в том, что в материал с определенной нагрузкой вдавливается твердый металлический шарик (рис. 2.1).

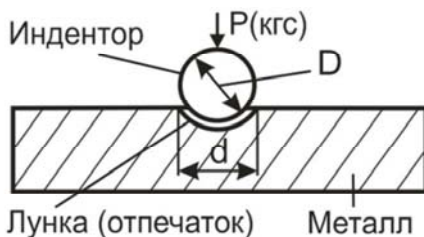


Рис. 2.1. Принцип измерения твердости по Бринеллю

Число твердости по Бринеллю обозначается буквами *HB* в случае применения стального индентора и *HBW* в случае применения индентора из твердого сплава.

В настоящее время метод измерения твердости металлов по Бринеллю регламентируется по ГОСТ 9012-59. Приборы для измерения твердости по Бринеллю называют *твердомерами Бринелля* (конструкция твердомера Бринелля представлена на рис. 2.2).

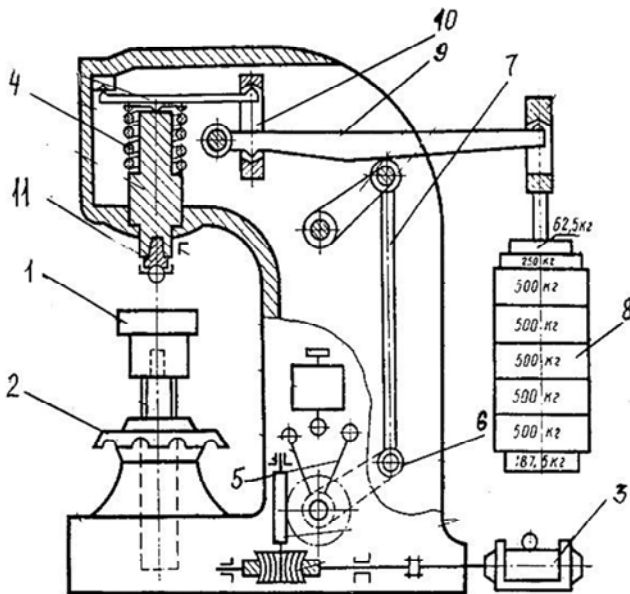


Рис. 2.2. Конструкция твердомера Бринелля:
 1 – столик; 2 – маховик; 3 – электродвигатель; 4 – пружина;
 5 – коробка скоростей; 6 – эксцентрик; 7 – шатун; 8 – грузы;
 9, 10 – системы рычагов; 11 – оправка

В качестве индентора применяются шарики (стальные или из твердого сплава) диаметром 1,0; 2,0; 2,5; 5,0; 10,0 мм. Выбор индентора связан с твердостью материала: при твердости металлов менее 450 единиц применяют стальные шарики или шарики из твердого сплава; при твердости металлов более 450, но не более 600 единиц – только шарики из твердого сплава.

Диаметр индентора D и соответствующее усилие P выбирают таким образом, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах:

$$0,24D \leq d \leq 0,6D. \quad (2.2)$$

Если отпечаток на образце получается меньше или больше допустимого значения d , то нужно увеличить или уменьшить усилие P и произвести испытание снова.

Согласно ГОСТ 9012-59, условия испытаний выбирают из табл. 2.1. Таким образом, для испытания стальных образцов условия испытаний: диаметр индентора 10 мм, прикладываемое усилие 30 кН (3000 кгс).

Образцы для испытаний должны иметь зачищенную от окалины и других загрязнений поверхность. Сторона образца, на которой производится испытание, должна быть строго перпендикулярна оси действия индентора. Недопустимо располагать индентор близко к краю испытываемого образца.

Таблица 2.1

Условия испытаний твердости по Бринеллю
согласно ГОСТ 9012-59

Диаметр шарика D , мм	Прикладываемое усилие, P , Н, для $K = P/D^2$				
	30	10	5	2,5	1
10	29 420	9807	4903	2452	980,7
5	7355	2452	1226	612,9	245,2
2,5	1839	612,9	306,5	153,2	61,3
1	294,2	98,1	49,0	24,5	9,81
Диапазон твердости HB	55–650	35–200	<55	8–55	3–20
Измеряются	Сталь, чугун, медь и ее сплавы, легкие сплавы	Чугун, сплавы меди и легкие сплавы	Медь и ее сплавы, легкие сплавы	Легкие сплавы	Свинец, олово

Порядок выполнения испытаний:

- 1) подготовленный образец устанавливают на предметный столик прибора;
- 2) вращая маховик, подводят предметный столик к индентору до упора;
- 3) путем нажатия кнопки включают прибор;
- 4) после выключения прибора, вращая маховик в обратную сторону, высвобождают образец, откручивают предметный столик и с помощью микроскопа Бринелля (рис. 2.3) с точностью 0,05 мм произ-

водят измерения диаметра сферического отпечатка на образце. Для получения более точного результата диаметр отпечатка следует измерять в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

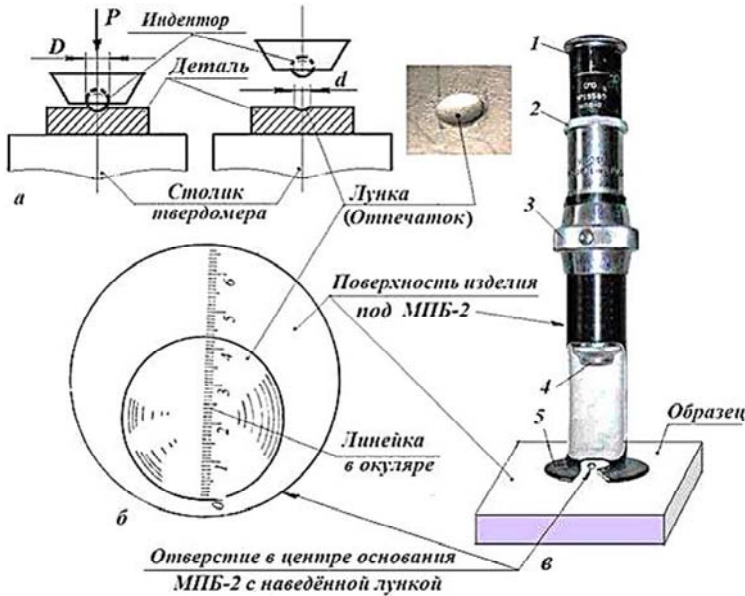


Рис. 2.3. Использование микроскопа Бринелля:
а – схема проникновения индентора; *б* – вид отпечатка в окуляре микроскопа Бринелля; *в* – схема устройства микроскопа Бринелля;
 1 – окуляр; 2 – кольцо наведения резкости линейки;
 3 – кольцо наведения резкости лунки; 4 – объектив;
 5 – основание, устанавливаемое на измеряемый образец

Величину твердости по Бринеллю (величина безразмерная) рассчитывают, как отношение усилия P , действующего на шарик, к площади поверхности сферического отпечатка A :

$$HB = \frac{0,102 \cdot P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 + d^2})}, \quad (2.2)$$

где F – приложенное усилие, Н;
 D – диаметр индентора, мм;
 d – диаметр отпечатка, мм.

2.2. Измерение твердости методом Роквелла

Если в методе Бринелля твердость рассчитывают по площади сферического отпечатка, то в методе Роквелла измерение твердости осуществляется по относительной глубине проникновения индентора. Впервые такой способ был предложен в 1908 году австрийским профессором Людвигом. Впоследствии американцы Хью и Стэнли Роквеллы разработали прибор для определения относительной глубины проникновения, исключавший ошибки, связанные с механическими несовершенствами измерительной системы (люфты, поверхностные дефекты и загрязнения поверхности испытуемых материалов и деталей). Поскольку в итоге патент на усовершенствованное устройство получил Стэнли Роквелл, это устройство, а также и метод, стали называть по его имени – твердомер Роквелла и метод Роквелла.

Твердомер Роквелла, в отличие от твердомера Бринелля, позволяет измерять твердость закаленных сталей. Это достигается наличием сменных инденторов в зависимости от материала, твердость которого измеряется. В случае измерения относительно мягких (незакаленных, отожженных) сталей, индентором служит стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм. Для испытаний закаленных сталей используется алмазный конус с углом при вершине 120° .

Индентор вдавливается в испытуемый материал под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок: предварительной P_0 , всегда равной 10 кгс, и основной P_1 , которая зависит от типа индентора и испытуемого материала. Общая нагрузка равна сумме этих двух нагрузок. Так, если индентором является шарик, то основная нагрузка всегда равна 90 кгс (общая 100 кгс). Если индентором служит алмазный конус, то основная нагрузка P_1 может быть или 50, или 140 кгс (общая нагрузка 60 и 150 кгс, соответственно).

Если индентор – шарик, то отсчет твердости производится по шкале B (красная шкала), имеющей 130 делений, и твердость в этом случае обозначается как HRB . По этой шкале измеряется твердость незакаленных, отожженных образцов, меди и медных сплавов, дуралуминов. Предел измерения 20–100 единиц.

Если индентор – алмазный конус, то твердость материала оценивается по двум шкалам – A и C . На индикаторе прибора обе эти шкалы совмещены в одну, имеющую 100 делений (черная шкала). При нагрузке на индентор 60 кгс эта шкала называется шкалой A

и твердость в этом случае обозначается как *HRA*. Эту шкалу можно использовать для измерения твердости проволок и покрытий, цементованного слоя, твердых сплавов и керамики. Предел измерения 20–88 единиц.

Если нагрузка составляет 150 кгс, то шкала называется шкалой *C* и твердость в этом случае обозначается как *HRC*. В этих единицах измеряется твердость массивных образцов закаленных сталей и сталей после отпуска. Предел измерения 20–70 единиц.

Мерой твердости в методе Роквелла является глубина проникновения индентора в испытуемый материал: одной единице твердости соответствует внедрение индентора на 0,002 мм. Схема измерения твердости конусом показана на рис. 2.4.

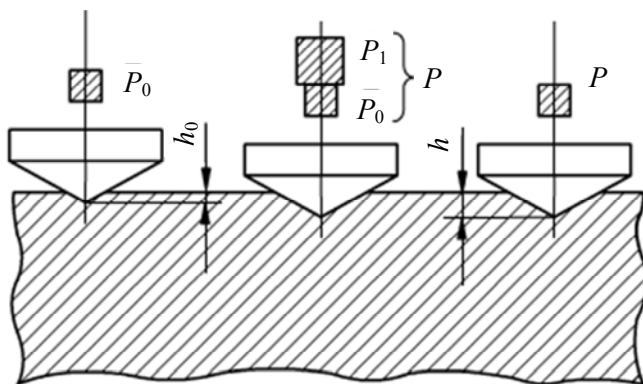


Рис. 2.4. Схема измерения твердости по Роквеллу

Из рисунка видно, что в начале испытания индентор под действием предварительной нагрузки $P_0 = 10$ кгс вдавливаются в поверхность на глубину h_0 . Затем прикладывается основная нагрузка P_1 и под действием суммарной нагрузки $P = P_0 + P_1$ индентор внедряется в испытуемую поверхность на максимальную глубину, производя пластическую и упругую деформацию материала. После того как нагружение закончилось (примерно в течение 5 с), снимается основная нагрузка. Измерение твердости по Роквеллу осуществляется в строгом соответствии ГОСТ 9013–59. Твердость по Роквеллу отсчитывают непосредственно по индикатору твердомера в условных единицах *HR*, за которыми следует буква, указывающая шкалу отсчета чисел твердости, например: 70 *HRA*, 58 *HRC*, 50 *HRB*.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретические сведения, делая необходимые записи в виде конспекта.
2. По указанию преподавателя выбрать условия проведения измерения твердости по Бринеллю, измерить твердость.
3. Измерить диаметр отпечатков d .
4. Пользуясь формулами, определить значения твердости HB .
5. Сравнить расчетные данные с табличными (табл. 2.2) и занести условия и результаты измерений в таблицу измерений (табл. 2.3).
6. Провести измерения твердости закаленных образцов по методу Роквелла. Занести условия и результаты измерений в таблицу измерений (табл. 2.4).
7. Результаты представить в виде отчета. Отчет должен содержать схемы, формулы, таблицы, графики, подробные выводы.

Таблица 2.2

Сравнение чисел твердости углеродистых сталей по различным шкалам

Диаметр отпечатка d , мм	Твердость по Бринеллю HB	Твердость по Роквеллу			Предел прочности σ_B , МПа
		HRC	HRA	HRB	
1	2	3	4	5	6
2,20	780	72	89,0	–	–
2,25	745	70	87,0	–	–
2,30	712	68	85,5	–	–
2,35	682	66	84,5	–	–
2,40	653	64	83,5	–	–
2,45	627	62	82,5	–	–
2,50	601	60	81,0	–	–
2,55	578	58	80,0	–	–
2,60	555	56	79,0	–	–
2,65	534	54	78,0	–	–
2,70	514	52	77,0	–	–
2,75	495	50	76,0	–	178,0

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5	6
2,80	477	49	75,5	–	172,0
2,85	461	48	74,5	–	165,0
2,90	444	46	73,5	–	160,0
2,95	429	45	73,0	–	155,0
3,00	415	44	72,5	–	149,0
3,05	401	42	71,5	–	144,0
3,10	388	41	71,0	–	139,5
3,15	375	40	70,5	–	135,0
3,20	363	39	70,0	–	130,5
3,25	352	38	69,5	–	126,5
3,30	341	37	69,0	–	122,5
3,35	331	36	68,5	–	119,5
3,40	321	35	68,0	–	115,5
3,45	311	34	67,5	–	111,5
3,50	302	33	67,0	–	108,5
3,55	293	31	66,0	–	105,5
3,60	286	30	65,5	–	103,0
3,65	277	29	65,0	–	99,5
3,70	269	28	64,5	–	97,0
3,75	262	27	64,0	–	94,5
3,80	255	26	63,5	–	92,0
3,85	248	25	63,0	–	89,5
3,90	241	24	62,5	100	87,0
3,95	235	23	62,0	99	84,5
4,00	228	22	61,5	98	82,5
4,05	223	21	61,0	97	80,0
4,1	217	20	60,0	97	78,0
4,15	212	19	60,0	96	76,0
4,20	207	18	59,5	95	74,5
4,25	202	16	59,0	94	72,0
4,30	196	12	58,0	93	70,5
4,35	192	11	57,0	92	69,0
4,40	187	–	–	91	67,5
4,45	183	–	–	89	66,0

Окончание табл. 2.2

1	2	3	4	5	6
4,50	179	–	–	88	64,0
4,55	174	–	–	87	62,5
4,60	170	–	–	86	61,0
4,65	166	–	–	85	60,0
4,70	163	–	–	84	58,5
4,75	159	–	–	83	57,5
4,80	156	–	–	82	56,0
4,85	153	–	–	81	55,0
4,90	149	–	–	80	53,5
4,95	146	–	–	78	52,5
5,00	143	–	–	76	51,0
5,05	140	–	–	76	50,0
5,10	137	–	–	75	49,5
5,15	134	–	–	74	48,6
5,20	131	–	–	72	47,0
5,25	128	–	–	71	46,2
5,30	126	–	–	69	45,0
5,35	124	–	–	69	44,0
5,40	121	–	–	67	43,5
5,45	118	–	–	66	42,5
5,50	116	–	–	65	41,7
5,55	114	–	–	64	41,2
5,60	112	–	–	62	40,5
5,65	109	–	–	61	39,0
5,70	107	–	–	59	38,5
5,75	105	–	–	58	38,0
5,80	103	–	–	57	37,0
5,85	101	–	–	56	36,5
5,90	99	–	–	54	35,5
5,95	97	–	–	53	35,0
6,00	96	–	–	52	34,5

Примечание: $P = 30\ 000\ \text{H}$, $D = 10\ \text{мм}$, $T = 10\text{--}15\ \text{с}$.

Таблица 2.3

Таблица измерений по методу Бринелля

Марка сплава	Диаметр шарика D , мм	Усилие P , кгс	Диаметр отпечатка d , мм			Твердость HB	Предел прочности на растяжение σ_B , кгс/мм ²

Таблица 2.4

Таблица измерений по методу Роквелла

Марка сплава	Тип индентора	Нагрузка P , кгс	Шкала	Обозначение твердости	Число твердости	Твердость по Бринеллю

Контрольные вопросы

1. Что такое твердость? Как связаны твердость и прочность?
2. Запишите зависимость между твердостью и пределом прочности материала на растяжение.
3. Какие требования предъявляются к поверхности изделия (образца) при измерении твердости?
4. Твердость каких материалов можно измерить методом Бринелля?
5. Каким прибором и как замерять диаметр отпечатка в методе Бринелля?
6. В чем сущность метода Роквелла?
7. Как правильно выбрать режим испытания на приборе Роквелла?
8. Для измерений твердости каких материалов предусмотрены шкалы A , B и C ?
9. В чем заключается физический смысл единицы твердости по Роквеллу?

Лабораторная работа № 3

ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ И УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

Цель работы: изучить методы испытаний на растяжение и ударную вязкость, провести испытания, проанализировать результаты.

Теоретические сведения

Испытание на растяжение – это механический метод испытания материалов для определения их множественных механических характеристик: прочностных (предела упругости, предела пропорциональности, временного сопротивления разрыву (предела прочности), предела текучести) и пластических (относительного удлинения, относительного сужения).

Также при испытаниях на растяжение можно определить модуль упругости материала.

При испытании на растяжение образец, прочно закрепленный в захватах испытательной машины, непрерывно плавно растягивают до разрушения. Скорость деформации при этом должна быть низкой, таким образом, этот метод исследований является *статическим* методом испытаний.

Испытания на ударную вязкость, напротив, относятся к *динамическим* испытаниям: скорость нарастания ударной нагрузки на образец крайне высокая. Упрощенно говоря, этот метод позволяет определить, насколько легко данный материал поддается разрушению при ударных нагрузках.

3.1. Испытания на растяжение

Для испытаний на растяжение применяют стандартные образцы согласно ГОСТ 1497-84, который предусматривает семь типов образцов. В этой лабораторной работе будет использован экспериментальный образец, согласно типу, представленному на рис. 3.1.

Для определения механических характеристик материалов используют разрывные машины. Самописец разрывной машины регистрирует зависимость между растягивающей нагрузкой и удлинением расчетной части образца в виде диаграммы растяжения образца.

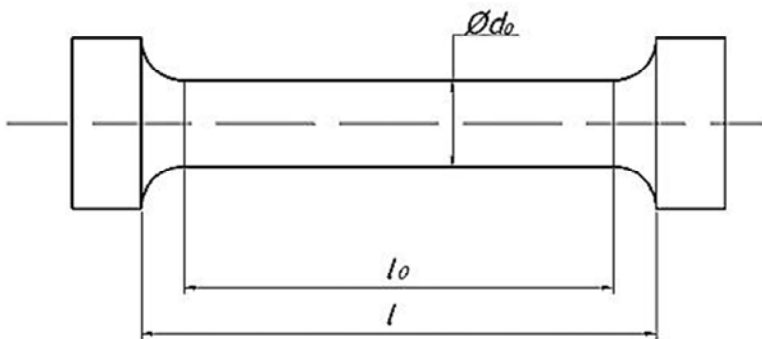


Рис. 3.1 Экспериментальный образец:
 d_0 – диаметр расчетной части образца; l_0 – длина расчетной части образца;
 l – длина рабочей части образца

Как показано на рис. 3.2, форма диаграмм растяжения различается в зависимости от вида испытываемого материала. Более пластичные материалы демонстрируют масштабную диаграмму с так называемой площадкой текучести (рис. 3.2, а), хрупкие материалы, такие как чугун, быстро разрушаются, вследствие чего их диаграмма короткая, без площадки текучести (рис. 3.2, в).

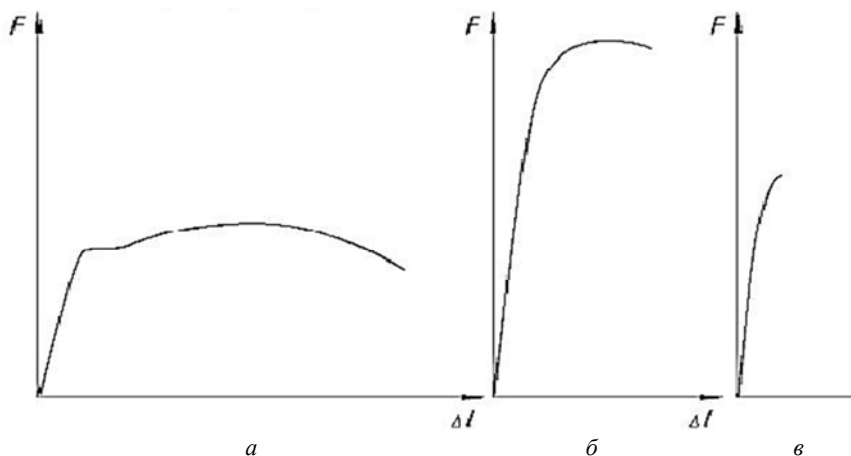


Рис. 3.2. Диаграммы растяжения материалов:
 a – низкоуглеродистая сталь; b – конструкционная сталь;
 v – чугун

Подробная диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали представлена на рис. 3.3.

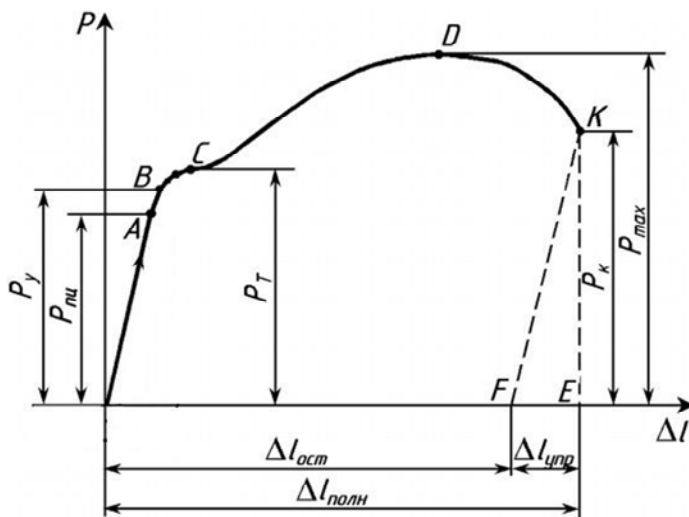


Рис. 3.3. Типичная диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

На начальном участке диаграммы, до точки A , между силой F и удлинением Δl соблюдается прямая пропорциональная зависимость – образец подчиняется закону Гука.

В некоторой точке диаграммы (точке B) закон Гука нарушается: зависимость между силой и удлинением становится нелинейной. На диаграмме имеется горизонтальный участок (область точки C), называемый «площадкой текучести». В этой стадии испытания образец удлиняется (деформируется) практически при постоянной силе. Это явление называется «текучестью», при этом образец деформируется равномерно по всей длине его рабочей части. Затем «площадка текучести» заканчивается, и начинается «участок упрочнения». В конечной точке этого участка, точке D , достигается максимальная сила, которую может выдержать образец. Далее начинается «участок разрушения» или «участок местной текучести». На образце появляется местное утонение (шейка). Диаметр шейки уменьшается по мере деформирования образца, и образец разрывается по наименьшему сечению шейки, чему соответствует точка K .

В данной лабораторной работе по полученной диаграмме растяжения необходимо будет рассчитать следующие механические характеристики.

Предел прочности, или временное сопротивление разрыву (МПа):

$$\sigma_{\text{в}} = P_{\text{max}} / S, \quad (3.1)$$

где P_{max} – максимальная нагрузка;

S – площадь поперечного сечения образца. В случае круглого сечения $S = \pi d^2 / 4$.

Предел текучести (МПа):

$$\sigma_{\text{т}} = P_{\text{т}} / S, \quad (3.2)$$

где $P_{\text{т}}$ – нагрузка, соответствующая площадке текучести.

Относительное удлинение:

$$\delta = ((l_{\text{к}} - l_0) / l_0) \cdot 100 \%, \quad (3.3)$$

где l_0 – начальная длина рабочей части образца;

$l_{\text{к}}$ – длина образца после испытания.

Относительное сужение:

$$\psi = ((S_{\text{к}} - S_0) / S_0) \cdot 100 \%, \quad (3.4)$$

где S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца;

$S_{\text{к}}$ – площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

Порядок проведения испытаний на растяжение

1. Изучить теоретические сведения, делая необходимые записи в виде конспекта.

2. Получить экспериментальные образцы.

3. Измерить диаметр d образцов. Рассчитать площадь поперечного сечения.

4. Измерить начальную длину рабочей части образца, приняв равной расстоянию между его головками.

5. В присутствии преподавателя провести испытание.

6. Измерить разрушенный образец (диаметр шейки d_k и конечную длину рабочей части l_k). Для оценки конечной длины рабочей части следует соединить части разрушенного образца и измерить расстояние между его головками.

7. Произвести расчеты.

8. Занести условия и результаты измерений в таблицу измерений (табл. 3.1).

9. Отчет о работе должен содержать кривую растяжения с пояснениями, формулы, таблицы, подробные выводы.

Таблица 3.1

Результаты испытаний на растяжение

Марка стали	d_0 , мм	l_0 , мм	$S_{0,2}$, мм ²	d_k , мм	l_k , мм	$S_{k,2}$, мм ²	P_{max} , Н	P_T , Н	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %

3.2. Испытания на ударную вязкость

Вязкость противоположна хрупкости. Ею называют способность материала сопротивляться разрушению при поглощении энергии удара. Например, стекло хрупкое, потому что оно не способно поглощать энергию за счет пластической деформации. А при резком ударе по листу мягкого материала не возникают большие напряжения, поскольку мягкий материал (например, пластилин) способен к пластической деформации, поглощающей энергию удара.

Испытание материалов на ударную вязкость основано на разрушении стандартного образца с концентратором (надрезом) посередине ударом на маятниковом копре. При испытании на удар оценивают работоспособность металла в сложных условиях нагружения и выявляют его склонность к хрупкому разрушению.

ГОСТ 9454-78 предусматривает испытания образцов трех типов (рис. 3.4):

– образцы Шарпи – образцы сечением 10×10 мм, длиной 55 мм и с U-образным надрезом шириной и глубиной 2 мм и радиусом 1 мм;

– образцы Менаже – образцы того же сечения и длины с V-образным надрезом той же геометрии, что и первый образец;

– Т-образные образцы длиной 55 мм, высотой 11 мм и шириной 10 мм с Т-образным концентратором (надрез, имитирующий усталостную трещину).

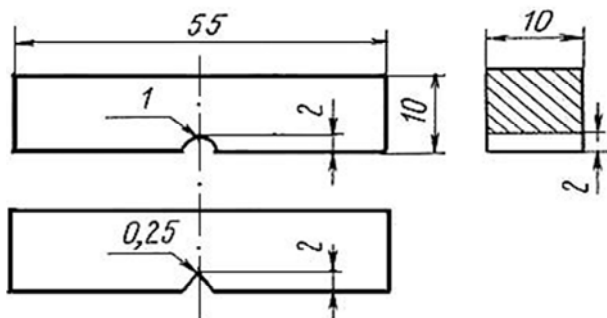


Рис. 3.4. Образцы Шарпи и Менаже

Образцы с V-образным надрезом являются основными, их и используют при контроле металлопродукции для ответственных конструкций (транспортных средств, летательных аппаратов и др.). Образцы с U-образным надрезом применяют при приемочном контроле металлопродукции, а образцы с Т-образным надрезом предназначены для испытания материалов, используемых в особо ответственных конструкциях.

При испытании металлов на удар определяют ударную вязкость, которую обозначают KC . Ударная вязкость KC ($\text{Дж}/\text{см}^2$ или $\text{кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2$) это отношение работы K разрушения стандартного образца к площади его поперечного сечения S_0 в месте надреза:

$$KC = K / S_0. \quad (3.5)$$

В зависимости от вида концентратора в образце (U, V, T) в обозначении ударной вязкости вводят третий индекс, согласно виду концентратора: KCU , KCV , KCT .

Чем больше величина ударной вязкости, тем лучше материал сопротивляется динамической нагрузке. Образцы из хрупких материалов ломаются легко, с небольшой затратой работы на разрушение. Образцы из пластичных материалов наоборот требуют на разрушение большей энергии. Материалы, требующие большой затраты энергии

на излом, называют вязкими. Все материалы, из которых изготавливают детали, воспринимающие динамические нагрузки, обязательно испытывают на удар: определение ударной вязкости является основным практическим методом оценки склонности стали к хрупкому разрушению, которое, в отличие от вязкого, происходит без заметной пластической деформации и развивается катастрофически быстро.

Для испытания на ударную вязкость используют копры маятникового типа (рис. 3.5).

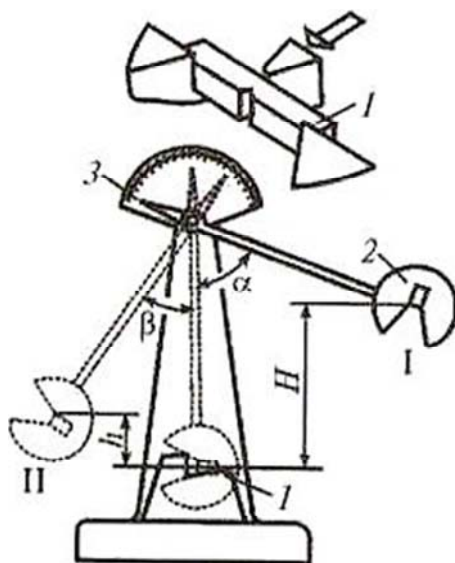


Рис. 3.5. Схема испытания ударной вязкости образцов:
 1 – экспериментальный образец; H – высота исходного положения I маятника 2; h – высота отклонения маятника в положение II после испытания; 3 – шкала

После взведения маятника в исходное положение I стрелка на шкале показывает потенциальную энергию взведенного маятника K_0 . После проведения испытания и разрушения образца маятник отклоняется на высоту положения II и стрелка на шкале покажет оставшуюся после разрушения потенциальную энергию маятника K_1 . Разница K_0 и K_1 – это и есть работа разрушения K , необходимая для расчетов по формуле (3.5).

Порядок проведения испытаний на ударную вязкость

1. Замерить ширину B образца и его высоту H в месте надреза штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Рассчитать площадь поперечного сечения образца в месте будущего удара.

2. Установить образец на опоры маятникового копра так, чтобы удар пришелся по стороне, противоположной надрезу.

3. Поднять маятник в верхнее исходное положение и закрепить защелкой. Записать исходное значение потенциальной энергии маятника.

4. Освободить маятник от защелки, и разрушить испытываемый образец. Записать значение потенциальной энергии маятника после разрушения образца.

5. Рассчитать величину работы, затраченной на разрушение образца.

6. Вычислить удельную ударную вязкость по формуле (3.5).

7. Заполнить таблицу измерений в отчете (3.2). Отчет по этой части работы должен содержать определение ударной вязкости, формулы, схему экспериментального образца, подробный вывод.

Таблица 3.2

Результаты испытаний на ударный изгиб

Марка стали	Вид термообработки	B , мм	H , мм	K_0 , Дж	K_1 , Дж	K , Дж	KC , Дж/см ²

Контрольные вопросы

1. Объясните, что такое статические и динамические испытания.
2. Какие механические характеристики материалов можно определить с помощью испытаний на растяжение?
3. Какие основные участки существуют на диаграмме растяжения? Что такое площадка текучести?
4. Что такое удельная ударная вязкость? Какие материалы подвергаются испытаниям на ударную вязкость?
5. Какие по форме образцы испытываются на ударную вязкость?
6. В чем состоит принцип работы маятникового копра?

Лабораторная работа № 4

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД. СТРУКТУРА СТАЛЕЙ

Цель работы: изучить структурную диаграмму состояния системы Fe-C, исследовать структуры углеродистых сталей под микроскопом, сделать выводы о закономерности изменения структуры углеродистой стали с повышением содержания в ней углерода.

Теоретические сведения

Структурная диаграмма состояния системы Fe-C, или проще – диаграмма Fe-C, является уникальной диаграммой. Она охватывает все углеродистые стали и чугуны и является фундаментом для назначения режимов термической обработки, а также решения вопросов сварки, обработки стали резанием, технологии обработки давлением, литейного производства. Начало ее изучению было положено еще в 1868 г. великим металловедом Д. К. Черновым, который указал на существование критических точек в стали. *Критическими точками* называются такие температуры во время нагревания или остывания стали, при которых совершаются химические изменения и физические превращения, имеющие влияние на ее свойства.

Для возможности обсуждения диаграммы Fe-C необходимо усвоить следующие понятия термодинамики:

1. Компоненты – химические элементы, образующие сплав.
2. Фаза – однородная часть термодинамической системы, обладающая одинаковыми химическими и физическими свойствами и поверхностью раздела, при переходе через которую свойства изменяются скачком.
3. Система – совокупность фаз, находящихся в равновесии.
4. Диаграмма состояния – графическое изображение фазового и структурного состава сплава в зависимости от температуры и химического состава.

Всякая диаграмма состояния показывает условия равновесного сосуществования фаз во взятой системе компонентов. Полное физико-химическое равновесие между фазами может быть достигнуто только в специальных лабораторных условиях, а на практике некоторым приближением к этому состоянию может быть случай чрезвы-

чайно медленного охлаждения или нагрева сплава с весьма длительными выдержками во времени при любых искомым температурах.

4.1. Диаграмма состояния системы Fe-C

Основной компонент системы Fe-C – железо. Содержание углерода в данной системе не должно превышать 6,67 %, так как при большем содержании сплав становится очень хрупким и непригодным для использования.

Принципиально важным для железо-углеродистых сплавов является то, что основной компонент – железо – существует в двух аллотропических модификациях: объемноцентрированного куба (Fe_{α}) и гранецентрированного куба (Fe_{γ}). Из кривой охлаждения чистого железа (рис. 4.1) видно, что Fe_{α} существует в двух интервалах температур: ниже 911 °C и от 1392 до 1539 °C. Достигнув при охлаждении температуры 1392 °C, Fe_{α} претерпевает аллотропическое превращение, в процессе которого кристаллическая решетка объемноцентрированного куба при постоянной температуре перестраивается в решетку гранецентрированного куба Fe_{γ} .

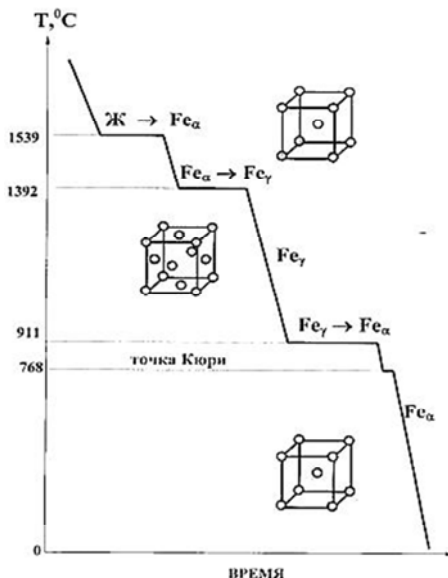


Рис. 4.1. Кривая охлаждения железа

Второе аллотропическое превращение в процессе охлаждения происходит при температуре 911 °С, когда Fe_γ (решетка гранецентрированного куба) перестраивается в объемноцентрированную кубическую решетку Fe_α .

При температуре 768 °С, называемой точкой Кюри, железо испытывает магнитное превращение: становится магнитным с дальнейшим понижением температуры. Магнитное превращение есть особый вид превращения и имеет ряд особенностей, отличающих его от аллотропического превращения.

Железо с углеродом образует следующие основные фазы системы Fe-C, представленные на диаграмме состояния (рис. 4.2).

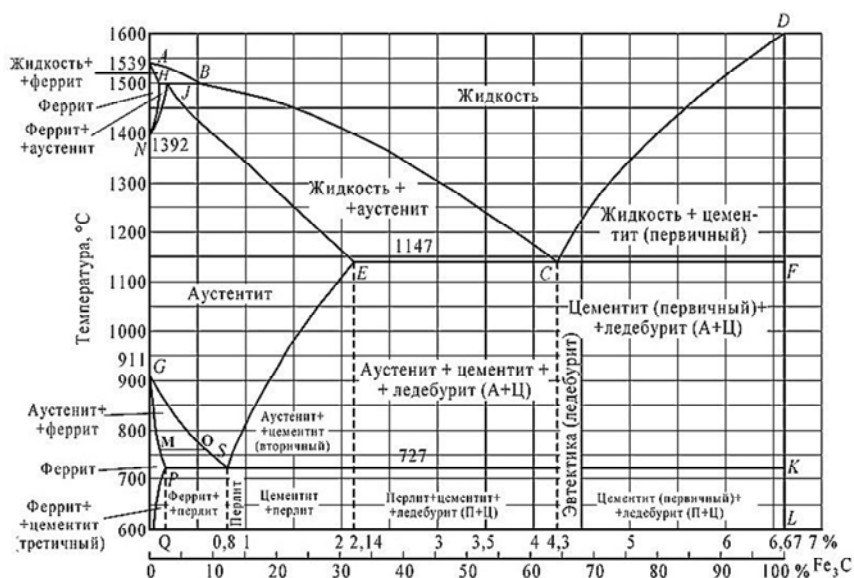


Рис. 4.2. Диаграмма состояния Fe-C

Жидкая фаза: в жидком состоянии железо хорошо растворяет углерод в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы.

Феррит (Ф, α) – твердый раствор внедрения углерода в α -железе (от латинского слова ferrum – железо). Различают низкотемпературный феррит с предельной растворимостью углерода 0,02 % при температуре 727 °С (точка P на диаграмме состояния Fe-C) и высокотемператур-

ный δ -феррит (в интервале температур 1392–1539 °С) с предельной растворимостью углерода 0,1 % при температуре 1499 °С (точка *J*).

Аустенит (*A*, γ) – твердый раствор внедрения углерода в γ -железе (по имени английского ученого Р. Аустена). Углерод занимает место внутри гранцентрированной кубической ячейки. Предельная растворимость углерода в γ -железе – 2,14 % при температуре 1147 °С (точка *E*). Аустенит имеет твердость 180 *HV*, пластичен (относительное удлинение $\delta = 40\text{--}50\%$), парамагнитен. При растворении в аустените других элементов могут изменяться свойства и температурные границы существования. Под микроскопом выглядит как светлые полиэдрические зерна с двойниками.

Цементит (*Ц*) – химическое соединение Fe_3C . В железоуглеродистых сплавах присутствуют фазы: цементит первичный, цементит вторичный, цементит третичный. Химические и физические свойства этих фаз одинаковы.

Графит (*Г*) – включения чистого углерода.

Поскольку углерод в сплавах с железом встречается в виде цементита и графита, существуют две диаграммы состояния, описывающие условия равновесия фаз в системах железо-цементит и железо-графит. Первая диаграмма ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$) называется цементитной (метастабильная), вторая (Fe-C) – графитной (стабильная). Оба варианта диаграммы приводятся вместе в одной системе координат: температура-содержание углерода. Диаграмма состояния системы железо-углерод в ее современном виде построена по результатам многочисленных исследований, проведенных учеными ряда стран.

Сплавы железа с углеродом обычно делят на стали и чугуны. Условной границей для такого деления является содержание углерода 2,14 % (точка *E*). Сплавы, содержащие углерода менее 2,14 %, относятся к сталям, более 2,14 % – к чугунам.

Кроме компонентов и фаз в системе сплавов «железо-углерод» присутствуют другие структурные составляющие: перлит и ледебурит.

Перлит – эвтектид, механическая смесь феррита и цементита, полученная в результате распада аустенита при охлаждении сплавов ниже 727 °С. При медленном охлаждении перлит присутствует во всех сплавах с концентрацией углерода от 0,02 до 6,67 %. Под микроскопом перлит может выглядеть либо как пластины, либо как зерна – зернистый перлит. Его вид и механические свойства зависят от скорости охлаждения сплава и вида его термической обработки.

Свое название перлит получил от жемчуга, так как на его пластинках при рассмотрении в оптический микроскоп наблюдается интерференция света.

Ледебурит – эвтектика, механическая смесь аустенита и цементита, выделяющаяся из жидкости при охлаждении сплавов ниже 1147 °С. Принципиальное отличие эвтектической составляющей от эвтектоидной заключается в том, что первая выделяется из жидкости, а вторая – из твердого раствора, в случае железоуглеродистых сплавов – из аустенита. Название ледебурит получил в честь имени немецкого ученого-металлурга Ледебура.

4.2. Микроскопический анализ стали и сплавов

Микроскопический анализ металлов и сплавов заключается в исследовании микроструктуры и пороков сталей с помощью оптического или электронного микроскопа. При этом оптический металлографический микроскоп работает в отраженном свете и его максимальное увеличение достигает 2000 раз. Электронный микроскоп в своей работе использует длину волны электрона, и его увеличения могут достигать 50 000, 100 000 и более раз.

С помощью микроанализа можно определить количество, форму, размеры отдельных фаз, их взаимное расположение, имеющиеся включения, микродефекты – следовательно, судить о свойствах металлов и сплавов.

Исследованию подвергаются микрошлифы, приготовленные определенным способом. *Микрошлифом* называют небольшой образец металла, имеющий особо приготовленную поверхность для микроанализа. После соответствующей шлифовки и полировки образцы подвергают травлению определенным химическим реактивом для выявления микроструктуры сплава.

Микроскопический анализ состоит из следующих этапов: приготовления шлифов, травления шлифов, исследования микроструктуры металлов и сплавов.

4.3. Микроструктура углеродистой стали

Согласно структурной диаграмме «железо-цементит» (рис. 4.3), углеродистые стали при нормальной температуре состоят из двух

фаз: феррита и цементита. Одному массовому проценту углерода соответствуют 15 массовых процентов цементита. Исходя из этого, массовая доля цементитной фазы находится умножением массовой доли углерода, содержащегося в стали, на 15. Поскольку в феррите содержится очень малая доля углерода, то практически весь углерод, имеющийся в стали, входит в состав цементита.

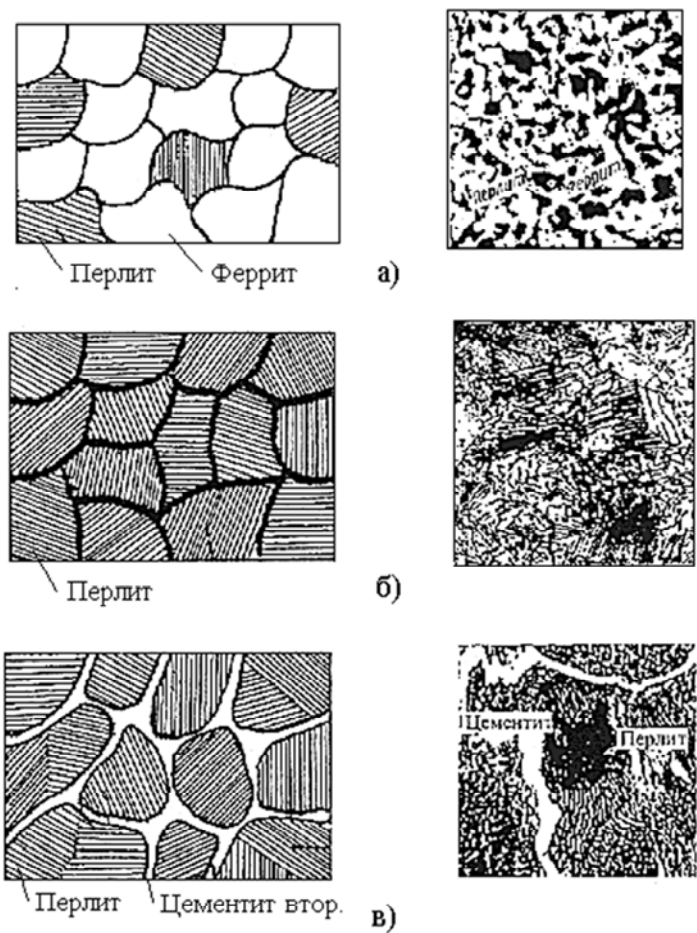


Рис. 4.3. Структура углеродистых сталей:
а – доэвтектоидная сталь; *б* – эвтектоидная сталь;
в – заэвтектоидная сталь

По составу углеродистые стали подразделяются на доэвтектоидные, эвтектоидную и заэвтектоидные.

Доэвтектоидные стали содержат от 0,02 до 0,8 % углерода и имеют ферритно-перлитную структуру (рис. 4.3, *а*). Здесь светлые зерна – это феррит, а темные участки представляют собой перлит, являющийся двухфазной структурной составляющей, состоящей из пластинок феррита и цементита. Количественное соотношение этих структурных составляющих зависит от массовой доли углерода в стали. Поскольку феррит содержит очень мало углерода (менее 0,006 %), то основным носителем углерода в доэвтектоидной стали является перлит, характеризующийся постоянной массовой долей углерода (0,8 %). Поэтому с увеличением в стали массовой доли углерода доля перлита в структуре увеличивается, а феррита, соответственно, уменьшается.

Изменение структуры влечет за собой изменение механических свойств. С увеличением массовой доли углерода в доэвтектоидной стали увеличивается доля перлита в ее структуре, что приводит к увеличению твердости и прочности и уменьшению пластичности и ударной вязкости. Эти стали относятся к качественным углеродистым сталям и маркируются Сталь 20, Сталь 30, и т. д.

Эвтектоидная сталь – эвтектоидная смесь феррита и цементита, которая содержит 0,8 % углерода и имеет перлитную структуру (рис. 4.3, *б*). Строение перлита таково, что дисперсные частицы цементита равномерно расположены в ферритной основе. В литой, горячекатанной и ковальной стали присутствует пластинчатый перлит, состоящий из пластинок феррита и цементита. В отожженной стали присутствует зернистый перлит, где цементит находится в форме зернышек. На рис. 4.3, *б* схематически изображено пластинчатое строение перлита, в котором темные полосы представляют тени на светлом фоне феррита от выступающих после травления шлифа цементитных частиц.

При микроскопическом исследовании для случая большой степени дисперсности цементитных частиц или малых увеличений микроскопа двухфазное строение перлита может не выявляться. В таких случаях перлит выявляется и виде сплошного темного фона. Эвтектоидная сталь относится к углеродистым инструментальным и маркируется как У8.

Заэвтектоидные стали содержат углерода от 0,8 до 2,14 % и имеют структуру, которая состоит из перлита и цементита (рис. 4.3, *в*).

Структурно-свободный цементит (цементит вторичный) в объеме медленно охлажденной стали располагается вокруг перлитных зерен, и металлографически это проявляется в виде цементитной сетки.

Такое расположение вторичного цементита способствует повышению хрупкости и снижению, вследствие этого, прочности. Поэтому от цементитной сетки избавляются путем отжига на зернистый перлит, добиваясь более равномерного распределения зерен цементита в стали. Заэвтектоидные стали также относятся к углеродистым инструментальным, примеры маркировок – У12, У13, и т. д.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал.
2. Рассмотреть структуры под оптическим микроскопом и зарисовать их.
3. Пользуясь плакатами и атласом структур, определить, какой стали является каждый из представленных образцов. Подписать все структурные составляющие на рисунках.
4. Составить отчет. Он должен содержать теоретические сведения, диаграмму состояния Fe-C, рисунки представленных микроструктур стали.

Контрольные вопросы

1. Что такое диаграмма состояния?
2. Что такое фаза, компонент, система?
3. Перечислите и дайте определения основным фазам в системе Fe-C.
4. Изобразите кривую охлаждения железа. Какое превращение происходит при температуре 768 °С?
5. Что такое сталь? Как она классифицируется по составу?
6. Как изменяется структура стали с повышением содержания углерода? Каких структурных составляющих становится больше, каких – меньше? Как это влияет на механические свойства стали?

Лабораторная работа № 5

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЧУГУНОВ

Цель работы: изучить микроструктуру чугунов в равновесном состоянии.

Теоретические сведения

Чугун – это сплав железа с углеродом при содержании углерода более 2,14 %, но менее 6,67 %, а также обладающий большим, чем в стали, количеством примесей (Si, Mn, S, P).

Благодаря ценным свойствам, дешевизне и хорошим литейным характеристикам чугун применяют для изготовления различных деталей. Чугун обладает высокой твердостью и прочностью.

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

5.1. Белые чугуны

Белый чугун производят при ускоренном охлаждении отливок и заготовок. Существует три разновидности белых чугунов: доэвтектический – 2,14–4,3 % углерода; эвтектический – 4,3 % углерода; заэвтектический – более 4,3 % углерода. Структурными составляющими доэвтектического чугуна являются перлит, ледебурит и вторичный цементит, эвтектического – ледебурит, заэвтектического – ледебурит и первичный цементит (рис. 5.1).

Свое название белый чугун получил потому, что его излом имеет светло-серебристый цвет. Из-за наличия в структуре высокого количества цементита белые чугуны в качестве конструкционных материалов не используют. Однако белый чугун используется для производства особого сорта серого чугуна, именуемого ковким.

5.2. Серые чугуны

Серые чугуны подразделяются на три вида: серые с пластинчатым графитом, высокопрочные с шаровидным графитом и ковкие

с хлопьевидным графитом. Микроструктуру чугунов можно представить как структуру стали, изрезанную графитными включениями. Металлическая основа этих чугунов может быть перлитной, ферритной или феррито-перлитной (рис. 5.2). Цвет излома – матово-серый.

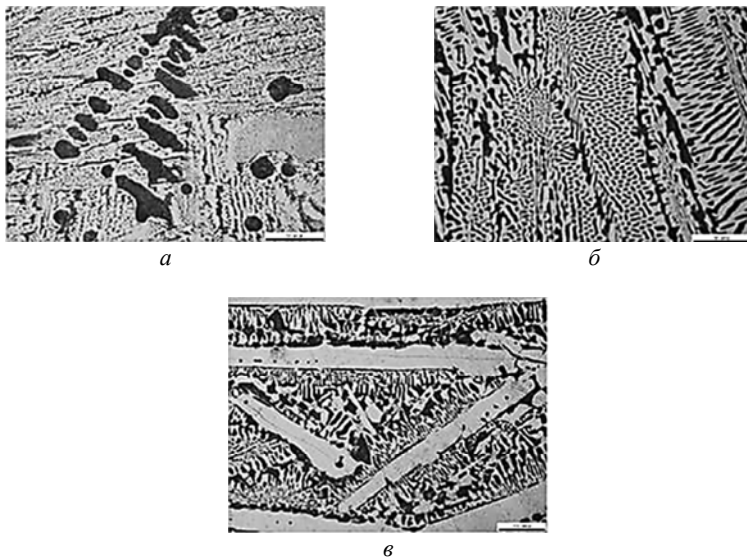


Рис. 5.1. Микроструктура белого чугуна:
а – доэвтектический белый чугун; *б* – эвтектический белый чугун;
в – заэвтектический белый чугун

5.2.1. Серые чугуны с пластинчатым графитом. В составе этого вида чугуна кроме основных элементов содержится 1–3 % кремния. Серые чугуны (рис. 5.2, *а*) получают путем медленного охлаждения отливков.

Серый чугун широко применяется в машиностроении. Он хорошо обрабатывается режущим инструментом. Из него производят станины станков, блоки цилиндров, фундаментные рамы, цилиндрические втулки, поршни и т. д. – т. е., слабонагруженные детали, работающие в легких условиях.

5.2.2. Ковкие чугуны с хлопьевидным графитом

Их производят путем длительного отжига белого чугуна. А именно, белый чугун медленно нагревается до температур 950–1000 °С

и после выдержки медленно охлаждается. При таком отжиге происходит распад цементита белого чугуна с образованием хлопьевидных включений графита (рис. 5.2, в).

Название «ковкий» этому виду чугуна дано потому, что его пластичность выше, чем у серого чугуна. Он применяется для изготовления деталей, работающих в более тяжелых условиях по сравнению с деталями из серого чугуна, т. е. при повышенных, знакопеременных и небольших ударных нагрузках. Например, из ковкого чугуна изготавливают картеры редукторов, коробок передач автомобилей, кронштейны рессор, различные крюки, фланцы и т. п.

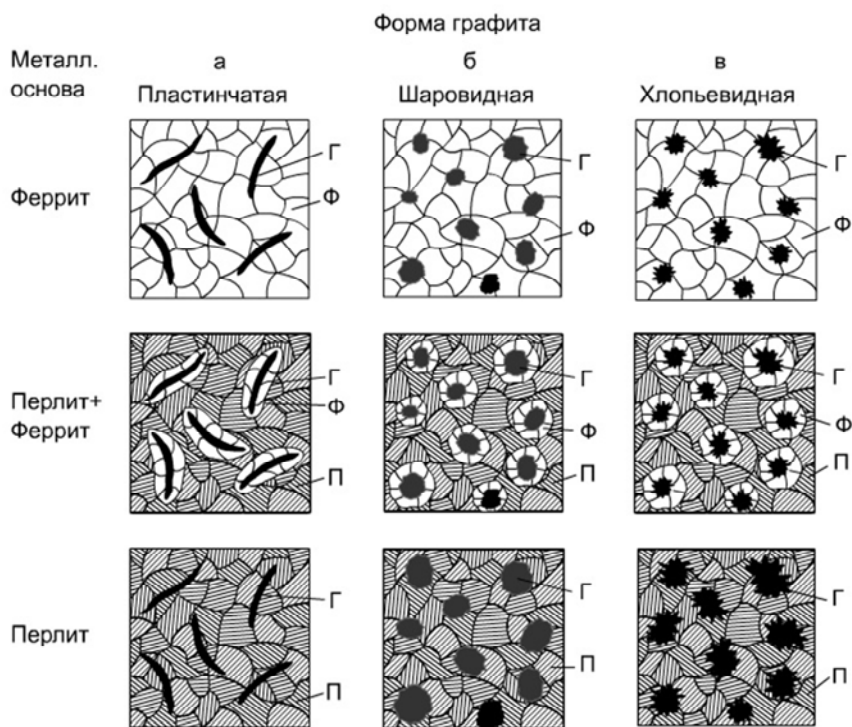


Рис. 5.2. Микроструктура чугуна:
а – серые чугуны; *б* – высокопрочные чугуны;
в – ковкие чугуны

5.2.3. Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом

Производят путем добавления в расплав магния или церия в количестве 0,05 %. Это способствует формированию шаровидных включений графита (рис. 5.2, б). В данном случае название «высокопрочный чугун» полностью оправдывает себя. Дело в том, что шаровидные включения чугуна исключают концентрацию напряжений на их поверхности, в связи с чем высокопрочный чугун выдерживает большие нагрузки и применяется для изготовления ответственных деталей, работающих в сложных условиях при повышенном нагружении. Из него изготавливают коленчатые и распределительные валы легковых автомобилей, прокатные валки, корпуса турбин, детали кузнечно-прессового оборудования.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал.
2. Рассмотреть структуры под оптическим микроскопом и зарисовать их.
3. Пользуясь плакатами и атласом структур, определить, каким типом чугуна является каждый из представленных образцов. Подписать все структурные составляющие на рисунках.
4. Составить отчет. Он должен содержать теоретические сведения, рисунки представленных микроструктур чугуна.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается основное отличие структуры белых и серых чугунов? Каковы причины этого отличия?
2. Какие формы графита существуют в чугунах? Как форма графита влияет на механические свойства?
3. Какой может быть структура металлической основы серых чугунов и от чего это зависит?
4. Как получить высокопрочный чугун?
5. Как получить ковкий чугун?

Лабораторная работа № 6

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ. ЗАКАЛКА И ОТПУСК ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ

Цель работы: изучить сущность термической обработки стали. Осуществить закалку и отпуск закаленной стали. Установить влияние закали на твердость углеродистых сталей и влияние температуры отпуска на твердость закаленных углеродистых сталей.

Теоретические сведения

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры. Цель термообработки – придание сплавам таких свойств, которые требуются в процессе эксплуатации изделий. В результате термообработки получают желаемое сочетание механических свойств. Иногда термообработка является промежуточной операцией, снижающей твердость стали и улучшающей ее обрабатываемость резанием.

Основные виды термической обработки: отжиг, закалка, отпуск и старение.

6.1. Закалка стали

Закалка – термическая обработка, в результате которой в сплавах образуется неравновесная структура. Неравновесные структуры можно получить только в том случае, когда в сплавах имеются превращения в твердом состоянии: переменная растворимость, распад высокотемпературного твердого раствора по эвтектоидной реакции и т. п. Для получения неравновесной структуры сплав нагревают выше температуры фазового превращения в твердом состоянии, после чего быстро охлаждают, чтобы предотвратить равновесное превращение при охлаждении.

Закалка стали вызывает упрочнение сплава, но может и не изменить свойства, если фиксирует высокотемпературный твердый раствор (в этом случае упрочнение сплава происходит при последующих операциях термообработки).

Упрочнение стали при закалке происходит благодаря особому типу фазового превращения – *мартенситному* (названо в честь немецкого металловеда Адольфа Мартенса). Мартенситное превращение было открыто при изучении закалки и первоначально под ним подразумевался только процесс, приводящий к образованию мартенсита в сталях. Однако впоследствии было установлено, что мартенситное превращение следует трактовать шире, так как его характерные особенности наблюдаются не только в сталях, но и в других железных сплавах, цветных сплавах и даже в полупроводниках. Поэтому в настоящее время под мартенситным превращением понимается особый вид фазового превращения в твердом теле, протекающего по бездиффузионному, сдвиговому механизму, называемому мартенситным, а под мартенситом – продукт такого превращения.

Условие осуществления мартенситного превращения: если скорость охлаждения стали от высоких температур становится достаточно большой ($v > v_{кр}$) для подавления распада аустенита на феррито-цементитную смесь, то аустенит испытывает мартенситное превращение $[Fe_\gamma(C) \rightarrow Fe_\alpha(C)]$ или $A \rightarrow M$ с образованием новой фазы в стали – мартенсита.

Мартенсит в углеродистой стали – это пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в решетке Fe_α . Мартенситный кристалл (пластина) образуется только в пределах аустенитного зерна и не переходит границу между его зернами. В плоскости шлифа мартенситные пластины, как правило, попадают поперечным сечением и наблюдаются под микроскопом в виде игл.



Рис. 6.1. Микроструктура мартенсита под микроскопом

Так как размеры первых пластин мартенсита определяются размерами аустенитного зерна, то все факторы, приводящие к укрупнению зерна, делают более грубоиглольчатым сам мартенсит. Поскольку сильный перегрев стали при закалке укрупняет зерно, он приводит к образованию крупноиглольчатого мартенсита, а значит, к ухудшению механических свойств.

Поскольку для закалки нужно превратить аустенит в мартенсит, для начала нужно нагреть сталь до аустенитного состояния. Температуру нагрева углеродистых сталей легко определить по диаграмме состояния (рис. 6.2), скорость охлаждения определяется по рис. 6.3.

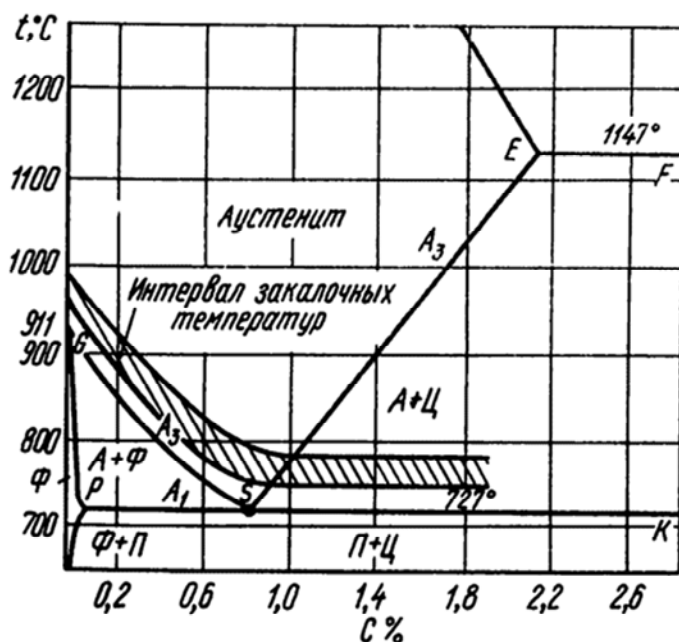


Рис. 6.2. Интервал закалочных температур

При закалке доэвтектоидных конструкционных сталей, содержащих до 0,8 % углерода, достаточно осуществить нагрев выше линии GS . Точки, лежащие на этой линии, обозначаются буквами A_{c3} и называются верхними критическими точками. Сталь нужно нагревать несколько выше A_{c3} (на 30–50 °С).

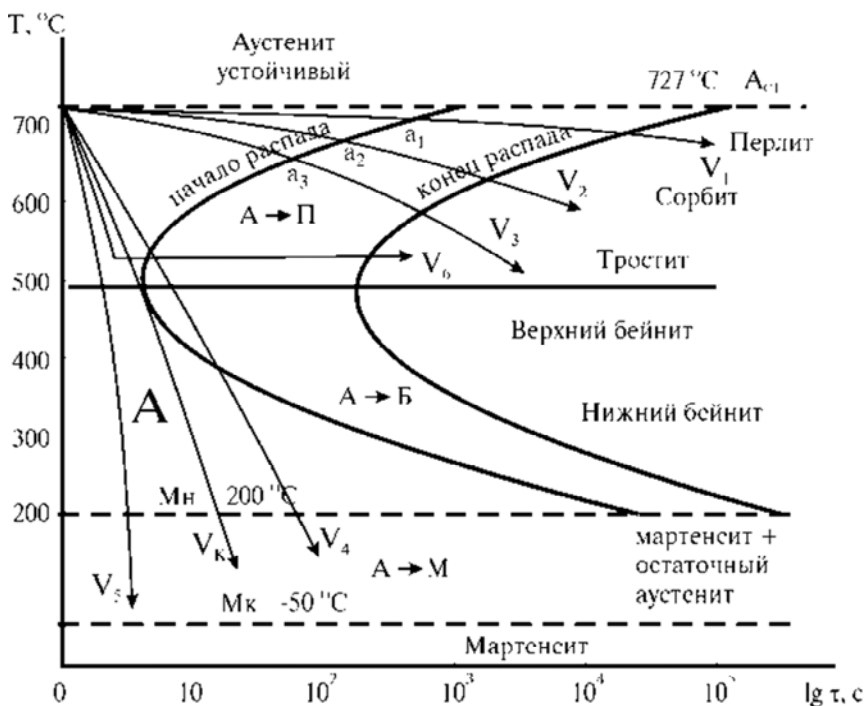


Рис. 6.3. Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита:

- А – аустенит; П – перлит; Б – бейнит; М – мартенсит;
- M_n – линия начала мартенситного превращения;
- M_k – линия конца мартенситного превращения;
- V_1, V_6 – различные скорости охлаждения;
- V_k – критическая скорость охлаждения;
- $a_1 - a_3$ – точки пересечения кривых охлаждения с диаграммой

При закалке инструментальных углеродистых сталей, содержащих более 0,8 % углерода, нагрев следует проводить на 30–50 °C выше линии *PSK*. Точки, лежащие на этой линии, обозначаются буквами A_{c1} и называются нижними критическими точками. При таком нагреве, как это видно по диаграмме состояния, структура стали будет состоять из аустенита и цементита. После закалки аустенит превратится в мартенсит. В отличие от феррита, цементит обладает очень высокой твердостью, и потому наличие его в структуре не снижает твердость.

При закалке некоторых легированных сталей температура нагрева устанавливается значительно выше критических точек. Например, для инструментальной легированной стали Х12М температура критической точки A_{c1} составляет 810 °С, а нагрев при закалке проводят до 1000–1050 °С; для быстрорежущей стали Р18 температура A_{c1} равна 830 °С, а температура закалки – 1270 °С. Объясняется это тем, что в таких сталях содержится большое количество карбидов, которые трудно растворяются в аустените. Требуемые свойства в этих сталях могут быть получены лишь в том случае, если легирующие элементы, содержащиеся в карбидах, перейдут в аустенит, в состояние твердого раствора. Для ускорения этого перехода и повышают температуру нагрева.

Время нагрева углеродистой стали под закалку в электрической печи рассчитывают как 1 мин на 1 мм наибольшего поперечного сечения.

Время выдержки легированной стали под закалку рассчитывают как 1,5 мин на 1 мм наибольшего поперечного сечения.

Минимальная скорость охлаждения V_k , при которой весь аустенит превращается в мартенсит, называется *критической скоростью закалки*. Выбранная среда должна обеспечивать охлаждение стали с такой скоростью, чтобы аустенит превратился в мартенсит (рис. 6.3, скорости V_k и V_6).

Поэтому углеродистые стали охлаждают в воде, а легированные, в которых С-образная диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита смещена легирующими элементами вправо, что означает уменьшение V_k , – в масле. При охлаждении в закалочных баках необходимо интенсивное перемещение охлаждаемого образца для предотвращения образования паровой рубашки у его поверхности.

Значения температур критических точек при нагреве углеродистых сталей и твердость сталей после закалки сведены в табл. 6.1, которую можно использовать для выбора необходимых параметров для выполнения этой части данной лабораторной работы.

Таблица 6.1

Температуры критических точек при нагреве сталей
и их твердость после закалки

Марка стали	Массовая доля углерода, %	Температура, °С		Твердость правильно закаленной стали, HRC
		A_{c1}	A_{c3}	
Углеродистые конструкционные стали				
20	0,17–0,24	735	850	34–40
25	0,22–0,30	735	835	42–48
30	0,27–0,35	730	820	48–51
35	0,32–0,40	730	810	54–60
40	0,37–0,45	730	790	60–62
45	0,42–0,50	730	770	–
50	0,47–0,55	725	760	–
55	0,52–0,60	725	755	–
60	0,57–0,65	725	750	–
Углеродистые инструментальные стали				
У7	–	725	765	62–64
У8–У13	–	730	–	63–65

6.2. Отпуск закаленной стали

Закалка никогда не является окончательным видом термообработки. Из-за особенностей мартенситного превращения металл после закалки находится в напряженном состоянии и в нем может произойти самопроизвольное растрескивание (особенно в случае деталей сложной или несимметричной формы, в которых внутренние напряжения некомпенсированы). Поэтому после закалки детали подвергаются термообработке, называемой «отпуск закаленной стали». В результате снижается хрупкость, повышается вязкость и сопротивление ударной нагрузке.

Отпуском называется операция термической обработки, состоящая в нагреве закаленной стали до температуры ниже критической A_{c1} , выдержке при этой температуре и последующем медленном или быстром охлаждении. Цель отпуска – устранить или уменьшить напряжения в стали, повысить вязкость и понизить твердость.

В зависимости от температуры нагрева различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск достигается нагревом до температуры 150–250 °С, выдержкой при этой температуре и последующим охлаждением на воздухе. При выдержке во время отпуска в указанном интервале температур мартенсит закалки превращается в мартенсит отпуска, при этом внутренние напряжения частично снимаются и остаточный аустенит превращается в мартенсит отпуска.

В результате низкого отпуска сталь сохраняет высокую твердость, а иногда твердость повышается за счет распада остаточного аустенита; устраняется закалочная хрупкость. Такой отпуск применяют для режущего инструмента и изделий, которым необходима высокая твердость. Превращение мартенсита закалки в мартенсит отпуска способствует стабилизации размеров детали, что необходимо для измерительного инструмента, изготавливаемого из инструментальной стали. Этому инструменту также дают низкий отпуск.

Средний отпуск производят при 300–450 °С. Твердость стали заметно понижается, вязкость увеличивается. При таких температурах происходит дальнейшее обезуглероживание мартенсита, приводящее к его превращению в обычный раствор, т. е. в феррит. Одновременно происходит карбидное превращение по схеме: $Fe_2C \rightarrow Fe_3C$. В результате образуется феррито-цементитная смесь, называемая *трооститом отпуска*. Наблюдается снижение твердости до величины 40–50 HRC, а также снижение внутренних напряжений.

Средний отпуск обеспечивает высокий предел упругости и предел выносливости. Поэтому его применяют для пружин, рессор, а также инструмента, который должен иметь значительную прочность и упругость при средней твердости.

Высокий отпуск происходит при 500–600 °С, его основное назначение – достичь наибольшей вязкости при достаточных пределах прочности и упругости стали. Применяют для деталей из конструкционных сталей, подвергающихся действию высоких напряжений, особенно при ударной нагрузке.

Для деталей различных машин и станков обычно применяют термическую обработку, состоящую в закалке с последующим высоким отпуском при температуре, обеспечивающей получение *сорбита отпуска* и хорошего сочетания прочностных и пластических свойств. Такая термическая обработка называется «*улучшением стали*».

Нагрев при отпуске можно производить в тех же печах, которые применяют для других видов термической обработки, но он требует более равномерной температуры и более точного контроля.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал.
2. Получить у преподавателя образцы сталей для закалки.
3. Руководствуясь информацией, изложенной в теоретической части работы, рисунком 6.2 и табл. 6.1, определить температуры нагрева, времени выдержки, среду охлаждения под закалку.
4. Под руководством преподавателя провести закалку, измерить твердость, заполнить таблицу измерений (табл. 6.2).
5. Загрузить закаленные образцы в печи для осуществления выскокого, среднего и низкого отпуска.
6. Замерить твердость отпущенных образцов, заполнить табл. 6.3.
7. Сделать выводы.

Таблица 6.2

Результаты экспериментов по закалке стали

Марка стали	Температура закалки, °С	Охлаждающая среда	Твердость до закалки, <i>HRC</i>	Твердость после закалки, <i>HRC</i>

Таблица 6.3

Результаты экспериментов по отпуску стали

Марка стали	Твердость после закалки, <i>HRC</i>	Отпуск					
		Низкий		Средний		Высокий	
		Т, °С	Твердость, <i>HRC</i>	Т, °С	Твердость, <i>HRC</i>	Т, °С	Твердость, <i>HRC</i>

Контрольные вопросы

1. Что такое закалка?
2. Как изменяются механические свойства в результате закалки?
3. Как назначают температуру нагрева, время выдержки и скорость охлаждения при закалке?

4. Что такое критическая скорость охлаждения?
5. Что такое мартенсит?
6. В чем сущность мартенситного превращения?
7. Почему размер аустенитных зерен влияет на размер пластин мартенсита?
8. Как влияет температура отпуска на структуру и свойства закаленных сталей?
9. Какому отпуску следует подвергать детали, работающие в условиях износа, или режущий инструмент? Какова его цель и технология проведения?
10. Какому отпуску следует подвергать силовые упругие элементы? Какие структура и свойства формируются при его проведении?
11. Какому отпуску следует подвергать детали, работающие в сложных условиях нагружения (валы, оси, болты и др.)? Цель такого отпуска?

Лабораторная работа № 7

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: изучить технологии ручной дуговой сварки и сварки металлов в защитных газах, рассчитать режимы ручной дуговой сварки конструкций из стали. Осуществить сварку металлов этими методами.

Теоретические сведения

Сварка – это получение неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании.

Классификация видов сварки приведена на рис. 7.1. К сварке *плавлением* относятся виды сварки, осуществляемые плавлением без приложенного давления. В этом случае расплавы соединяемых металлов объединяются в общую сварочную ванну, а при охлаждении происходит кристаллизация расплава в литой сварочный шов.

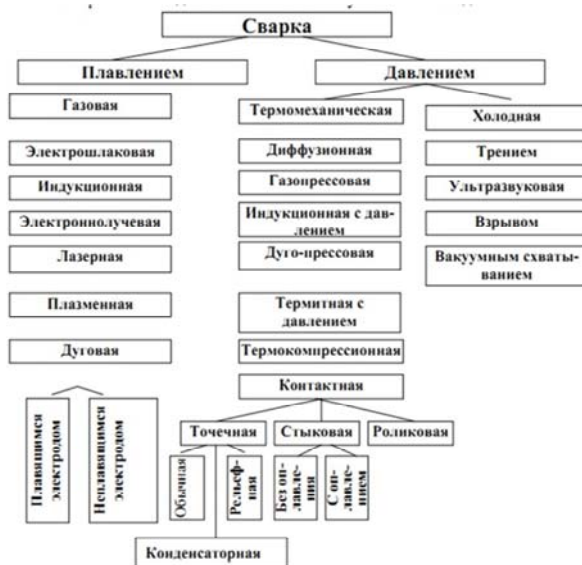


Рис. 7.1. Классификация видов сварки

К сварке *давлением* относятся операции, осуществляемые при приложении механической энергии в виде давления. В результате металл деформируется и начинает течь, подобно жидкости. Металл перемещается вдоль поверхности раздела, унося с собой загрязненный слой. Таким образом, в непосредственное соприкосновение вступают свежие слои материала, они и осуществляют химическое взаимодействие.

При *термомеханической* сварке используется тепловая энергия и давление. Объединение соединяемых частей в монолитное целое осуществляется за счет приложения механических нагрузок, а подогрев заготовок обеспечивает нужную пластичность материала.

Сварным соединением называется неразъемное соединение нескольких деталей, полученное сваркой. В зависимости от взаимного расположения свариваемых элементов в пространстве различают следующие основные виды сварных соединений: стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные и торцовые (рис. 7.2).

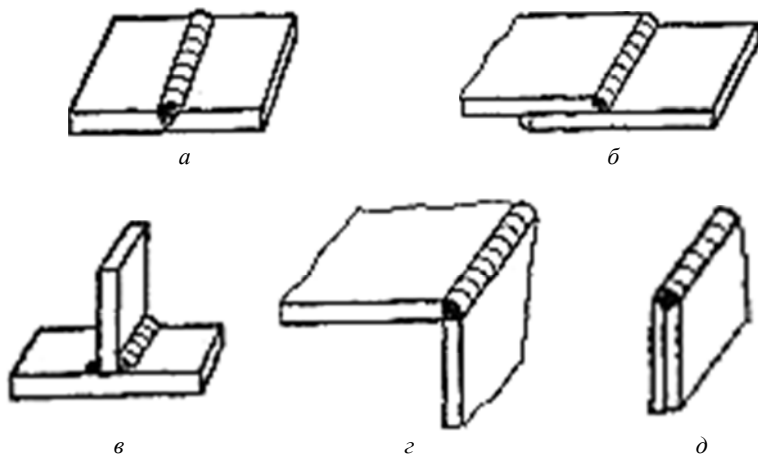


Рис. 7.2. Виды сварных соединений:

а – стыковое; б – нахлесточное; в – тавровое; г – угловое; д – торцовое

Положение шва при сварке определяется пространственным расположением кромок подготовленных к соединению элементов (деталей, конструкций). Всего различают четыре основных положения проведения сваривания: нижнее, горизонтальное, вертикальное, потолочное (рис. 7.3).

Нижнее положение применяют в основном при сварке несложных элементов и в тех случаях, когда к качеству соединительного рубца не предъявляется дополнительных требований. Свариваемые поверхности располагаются горизонтально, положение электрода – вертикальное.

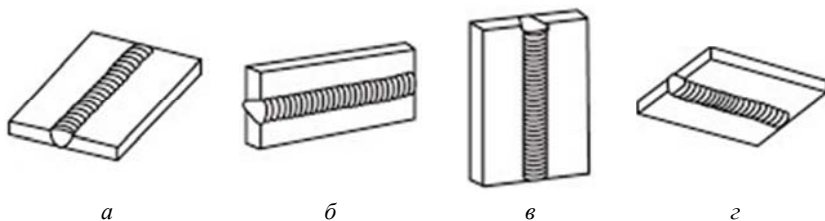


Рис. 7.3. Положение сварных соединений в пространстве:
а – нижнее; *б* – горизонтальное; *в* – вертикальное; *г* – потолочное

Электродуговая сварка – самый старый и распространенный вид сварки, который можно отнести к разряду универсальных.

7.1. Сущность процесса ручной дуговой сварки (РДС)

При дуговой сварке плавящимся электродом расплавление кромок свариваемых заготовок и электрода осуществляется за счет теплоты электрической сварочной дуги. Электрическая сварочная дуга – это мощный дуговой разряд в среде ионизированного газа. Ее схема показана на рис. 7.4.

В процессе сварки происходит расплавление основного металла по кромкам соединяемых элементов и расплавление металлического электрода, сопровождаемого стеканием жидкого металла в виде капель в сварочную ванну.

Электроды для РДС – это металлические стержни, на поверхность которых нанесено покрытие. Металлический стержень проводит электрический ток, покрытие стабилизирует горение дуги, защищает расплавленный металл от воздействия воздуха и помогает получить металл заданного состава и свойств. Покрытые электроды для РДС классифицируют по назначению, допустимому пространственному положению сварки или наплавки, типу, виду и толщине покрытия, роду и полярности сварочного тока.

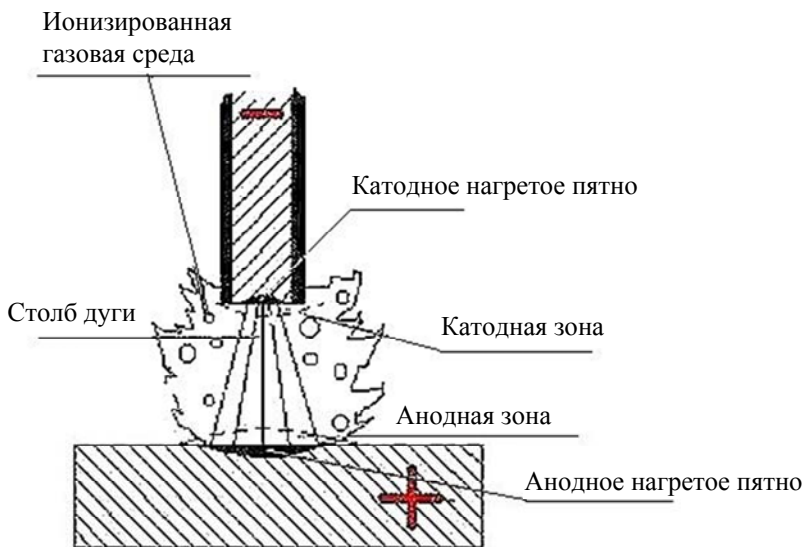


Рис. 7.4. Схема электрической сварочной дуги

Условное обозначение электрода расшифровывается так: буква «Э» – электрод, стоящее за ней число – временное сопротивление разрыву металла шва (σ_b). Например, электроды Э46 (и электроды данного типа марок ОЗС-12, АНО-13, МР-3) должны обеспечивать $\sigma_b = 460$ МПа. Буква «А» в конце обозначения типа электрода указывает на повышенные пластические свойства металла сварочного шва. Для каждого типа электрода разработана одна или несколько марок.

Сварочный пост дуговой сварки – место проведения сварочных работ. Основное оборудование сварочного поста состоит из проводов и инструментов сварщика и источника питания дуги. Сварочный пост оснащается оборудованием в зависимости от вида сварочных работ, выбранной технологии и ряда других факторов. В настоящее время большую популярность получили инверторные источники питания. Малые габариты и масса инверторов, а также возможность использовать длинные сетевые кабели делают их практически незаменимыми в переносных сварочных постах.

Основным инструментом сварщика служит держатель электродов, который должен прочно закреплять электрод и обеспечивать надежный электрический контакт. Существуют разные типы элек-

трододержателей, но все они должны иметь минимальную массу и возможность легкой и удобной смены электродов.

Для защиты глаз и лица сварщика от брызг металла и излучения используются предохранительные щитки.

7.2. Сущность сварки в защитных газах

При сварке в среде защитных газов для защиты зоны сварочной дуги и расплавленного металла от кислорода воздуха используют специальный газ. Он может подаваться струей в зону плавления при помощи горелки или наполнять камеру, в которой проводится сварка. Таким газом может быть CO_2 , или аргон, или смеси инертных газов, в том числе с CO_2 . Смесь инертных газов с активными рекомендуется применять в том числе для повышения устойчивости дуги, увеличения глубины проплавления и изменения формы шва, металлургической обработки расплавленного металла, повышения производительности сварки. При сварке в смеси газов повышается переход электродного металла в шов.

Сварку в защитных газах можно выполнять неплавящимся (обычно вольфрамовым) или плавящимся электродом. В первом случае сварной шов получается за счет расплавления кромок изделия и, если необходимо, подаваемой в зону дуги присадочной проволоки. Плавящийся электрод в процессе сварки расплавляется и участвует в образовании металла шва. Схема формирования сварного шва показана на рис. 7.5.

Широкий диапазон применяемых защитных газов обуславливает большое распространение этого способа как в отношении свариваемых металлов, так и их толщин (от 0,1 мм до десятков миллиметров).

Основными преимуществами рассматриваемого способа сварки являются:

- высокое качество сварных соединений на разнообразных металлах и их сплавах разной толщины, особенно при сварке в инертных газах из-за малого угара легирующих элементов;
- возможность сварки в различных пространственных положениях;
- отсутствие операций по засыпке и уборке флюса и удалению шлака;
- возможность наблюдения за образованием шва, что особенно важно при механизированной сварке;

- высокая производительность и легкость механизации и автоматизации процесса;
- низкая стоимость при использовании активных защитных газов (CO_2).

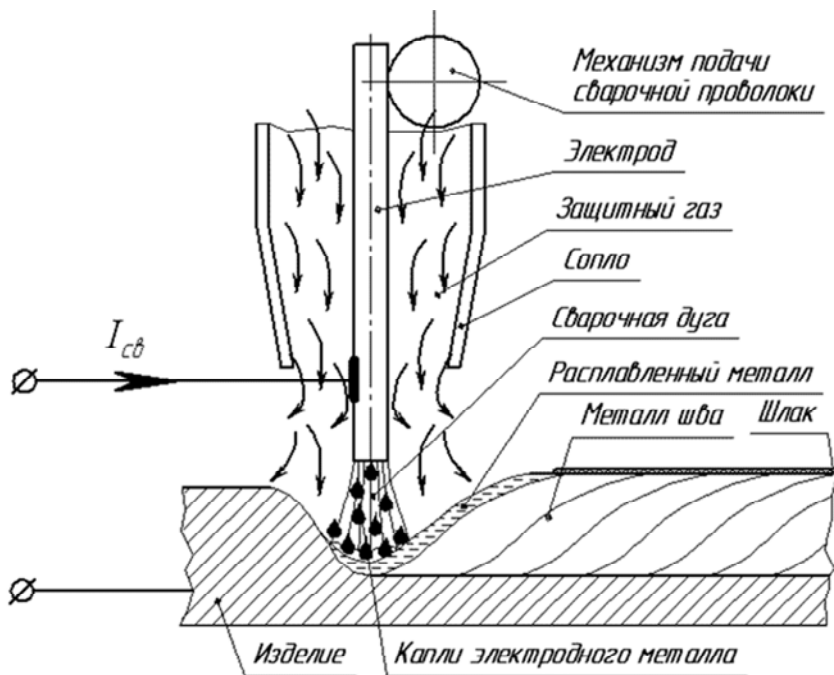


Рис. 7.5. Схема формирования сварного шва при сварке в защитных газах

К недостаткам способа относятся:

- необходимость применения защитных мер против светового и теплового излучения дуги;
- возможность нарушения газовой защиты при сдувании струи газа движением воздуха или при забрызгивания сопла;
- потеря металла на разбрызгивание, при котором брызги прочно соединяются с поверхностями шва и изделия;
- наличие газовой аппаратуры и в некоторых случаях необходимость водяного охлаждения горелок.

7.3. Выбор режима РДС

Основными параметрами режима РДС являются диаметр электрода, сила сварочного тока, род и полярность тока, подаваемое на дугу напряжение.

Вначале выбирается диаметр электрода в зависимости от толщины свариваемого металла. При сварке в нижнем положении для выбора диаметра пользуются зависимостями, сведенными в табл. 7.1, для всех других типов швов независимо от толщины свариваемого металла применяют электроды с $d_3 \leq 4$ мм.

Таблица 7.1

Выбор диаметра стержня электрода
по толщине свариваемого металла

Толщина S свариваемого металла, мм	до 2	2–3	4–6	6 и более
Диаметр d стержня электрода, мм	1,6–2,0	2,5–3,0	3,0–4,0	4,0–5,0

В зависимости от выбранного диаметра электрода d_3 и положения сварного шва в пространстве (задано в индивидуальном задании) выбирается значение сварочного тока $I_{св}$.

При сварке в нижнем положении силу сварочного тока можно определить по следующим зависимостям:

- при $d_3 = 3–6$ мм $I_{св} = (20 + 6d_3)d_3$;
- при $d_3 < 3$ мм $I_{св} = 30d_3$.

При сварке горизонтальных и вертикальных швов сила тока уменьшается на 10–15 %, потолочных – на 15–20 %.

Род и полярность тока указывается на упаковке электродов производителем, выбрать в рамках данной лабораторной работы можно, руководствуясь табл. 7.2.

Напряжение для устойчивого горения дуги U_d (В) определяют из следующего выражения:

$$U_d = 20 + 0,04I_{св}.$$

Таблица 7.2

Рекомендуемые типы и марки электродов

Марка стали	Тип электрода	Марка электрода, род и полярность тока
Ст3пс Ст3	Э42	АНО-6М (переменный и постоянный ток любой полярности)
	Э46	МР-3, ЛЭС МР-3, АНО-36, МР-3 Плазма (переменный и постоянный ток обратной полярности) ОЗС-12 (переменный и постоянный ток прямой полярности) АНО-4, АНО-13, МР-3С (переменный и постоянный ток любой полярности)
Сталь 10 Сталь 20	Э42А	УОНИ 13/45, УОНИИ 13/45 (постоянный ток обратной полярности)
09Г2С	Э46А	УОНИ 13/45А, ТМУ-21У (постоянный ток обратной полярности)
10ХСНД	Э50А	УОНИ 13/55, УОНИИ 13/55 (постоянный ток обратной полярности)

На заключительном этапе расчетов выбирают источник питания сварочной дуги в зависимости от рода и силы сварочного тока и рабочего напряжения.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с теоретической частью и законспектировать ее.
2. По индивидуальному заданию (табл. 7.3) рассчитать режим сварки РДС.
3. В присутствии преподавателя и инженера выполнить РДС и сварку в CO_2 .
4. Сделать выводы.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Марка свариваемого металла	Толщина свариваемого металла, мм	Положение сварки
1	Ст3пс	2,0	Нижнее
2	Ст3пс	2,0	Потолочное
3	Ст3пс	2,0	Горизонтальное
4	Сталь 10	3,0	Нижнее
5	Сталь 10	3,0	Потолочное
6	Сталь 10	3,0	Горизонтальное
7	Сталь 20	4,0	Нижнее
8	Сталь 20	4,0	Потолочное
9	Сталь 20	4,0	Горизонтальное
10	09Г2С	2,0	Нижнее
11	09Г2С	2,0	Потолочное
12	09Г2С	2,0	Горизонтальное

Контрольные вопросы

1. Что такое сварка и какова ее классификация?
2. Что такое электрическая сварочная дуга?
3. Что такое сварочные электроды и какими они бывают?
4. Что такое сварочный пост?
5. Каковы основные параметры режима ручной дуговой сварки?
6. Для чего применяют защитные газы?
7. Какие вы знаете защитные газы?
8. В чем преимущества их применения?
9. В чем недостатки сварки в защитных газах?

Лабораторная работа № 8

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

Цель работы: изучить основные принципы обработки металлов резанием, рассчитать режимы резания с использованием резцов и сверл.

Теоретические сведения

Обработка металлов резанием – это процесс удаления режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла в виде стружки для получения необходимой геометрической формы, точности размеров, взаимного расположения и шероховатости поверхностей детали.

Чтобы удалить (снять) с заготовки слой металла, необходимо сообщать режущему инструменту и заготовке относительные движения. Инструмент и заготовку устанавливают на рабочих органах станков, обеспечивающих движение.

Движения, которые обеспечивают срезание с заготовки слоя материала или вызывают изменение состояния обработанной поверхности заготовки, называют движениями резания.

Главное движение определяет скорость деформирования материала и отделения стружки (V).

Движение подачи обеспечивает врезание режущей кромки инструмента в материал заготовки (S).

Движения могут быть непрерывными или прерывистыми, а по характеру – вращательными, поступательными, возвратно-поступательными. Движения подачи подразделяются на продольное, поперечное, вертикальное, круговое, окружное, тангенциальное.

Режущий инструмент с заданным числом (1, 2, 3 и т. д.) лезвий установленной формы называют лезвийным инструментом, а обработку таким инструментом – лезвийной обработкой.

В процессе обработки резанием с заготовки, слой за слоем, срезается припуск на обработку, происходит обновление поверхности.

Поверхности заготовок, срезаемые за каждый очередной проход инструмента, принято называть обрабатываемыми поверхностями. Поверхности, вновь образуемые во время очередного прохода инструмента, называют обработанными поверхностями. Промежуточную поверхность, временно существующую в процессе резания

между обрабатываемой и обработанной поверхностями, принято называть поверхностью резания.

Величину t , мм (проникновение лезвий инструмента в материал заготовки во время каждого прохода) принято называть глубиной резания.

Режимы резания устанавливаются совокупностью значений глубины резания, скорости подачи и скорости резания, силы резания, а также геометрических параметров и стойкости инструментов.

Параметры режима резания взаимосвязаны, поэтому нельзя произвольно изменять значение одного из них, не изменяя соответственно значения всех прочих.

Выбор режимов резания начинают с определения глубины резания. Она связана с припуском. На операциях окончательной обработки припуск составляет не более 0,5 мм. На промежуточных операциях припуск на обработку изменяется в пределах 0,5–5 мм. На операциях предварительной обработки заготовок в зависимости от их размеров и способа изготовления припуск может быть более 5 мм.

8.1. Виды обработки резанием

В процессе обработки с заготовки удаляется припуск в виде стружки следующими видами обработки резанием: точением, строганием, сверлением, фрезерованием, шлифованием (рис. 8.1).

Практически все детали машин и механизмов приобретают свою форму и размеры в соответствии с чертежом после обработки резанием их заготовок.

Точение – метод обработки тел вращения. Главным движением при точении является вращательное движение заготовки D_r . Движение подачи придается режущему инструменту. Прямолинейное движение подачи резца может быть направлено вдоль $D_{\text{спр}}$ или поперек $D_{\text{сп}}$ (рис. 8.1) оси вращения изделия, соответственно и подача называется продольной или поперечной. В качестве режущего инструмента при точении используют резцы.

Методом точения можно выполнять следующие виды работ: обтачивание наружных и растачивание внутренних поверхностей, подрезание торцовой поверхности, фасонное точение фасонным резцом и копировальное точение по копиру.

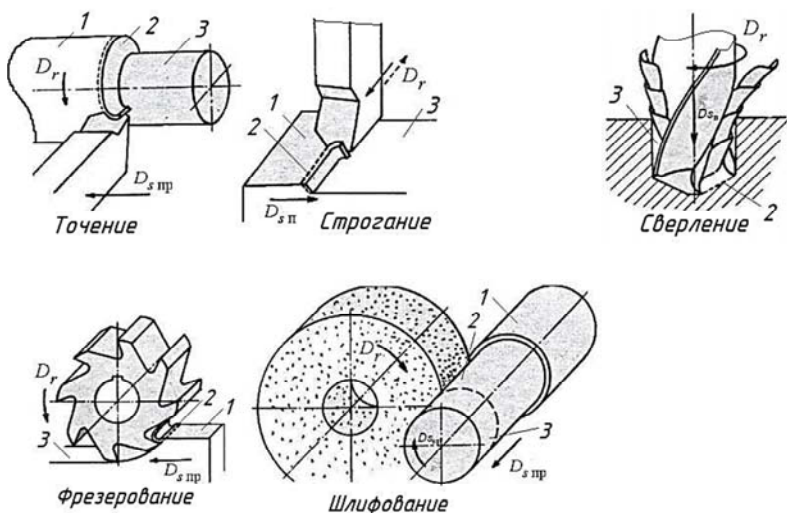


Рис. 8.1. Виды обработки резанием:

D_r – движение резания; $D_{сп}$, $D_{шп}$, $D_{св}$, $D_{скр}$ – продольное, поперечное, вертикальное и круговое движения подачи, соответственно;

1 – обрабатываемая поверхность;

2 – поверхность резания; 3 – обработанная поверхность

С помощью точения выполняют операции:

- обтачивание – обработку наружных поверхностей;
- растачивание – обработку внутренних поверхностей;
- подрезание – обработку торцевых поверхностей;
- резку – разрезание заготовки на части;
- резьбонарезание – нарезание резьбы.

По технологическим возможностям точение условно подразделяют на черновое, получистовое, чистовое, тонкое.

Строгание металла – процесс срезания слоя материала с заготовки резцом при поступательном главном движении. Для обработки металлов строганием применяются различные станки: поперечно- и продольно-строгальные, кромко-строгальные, строгально-долбежные и другие. Строгание на поперечно-строгальных станках выполняют резцом, который совершает прямолинейное возвратно-поступательное движение D_r , подачу осуществляют движением заготовки $D_{шп}$ (рис. 8.1). При работе на продольно-строгальных станках возвратно-поступательное движение резания сообщается

обрабатываемой детали, а движение подачи – резцу. В строгальных станках движение резания складывается из рабочего и холостого ходов; движение подачи у этих станков прерывистое.

Сверление – это получение отверстий в сплошном материале заготовки или увеличение размеров имеющихся отверстий. При обработке отверстий на сверлильных станках главным движением является вращение инструмента D_r , а движением подачи $D_{Св}$ – перемещение инструмента вертикально вдоль своей оси.

В качестве инструмента при сверлении используется сверло, имеющее две главные режущие кромки.

Для сверления используются сверлильные и токарные станки. На сверлильных станках сверло совершает вращательное (главное) движение и продольное (движение подачи) вдоль оси отверстия, заготовка неподвижна.

При работе на токарных станках вращательное (главное) движение совершает обрабатываемая деталь, а поступательное движение вдоль оси отверстия (движение подачи) совершает сверло.

При сверлении обеспечиваются сравнительно невысокая точность и качество поверхности. Диаметр просверленного отверстия можно увеличить сверлом большего диаметра. Такие операции называются рассверливанием.

Для получения отверстий более высокой точности и чистоты поверхности после сверления на том же станке выполняются зенкерование и развертывание.

Зенкерование – обработка предварительно полученных отверстий для придания им более правильной геометрической формы, повышения точности и снижения шероховатости многолезвийным режущим инструментом – зенкером.

Развертывание – окончательная обработка цилиндрического или конического отверстия разверткой в целях получения высокой точности и низкой шероховатости. Развертки – многолезвийный инструмент, срезающий очень тонкие слои с обрабатываемой поверхности.

Фрезерование применяют для обработки плоскостей, пазов с прямолинейным и винтовым направлением, шлицев, уступов, зубчатых колес, разрезки заготовок, образования резьбы, получения фасонных поверхностей. Фрезерование ведется многолезвийными инструментами – фрезами, совершающими вращательное движение, являющееся главным D_r . Движение подачи $D_{Спр}$, перпендикулярное

оси вращения инструмента, производится столом станка с неподвижно закрепленной на нем заготовкой (рис. 8.1).

По исполнению фрезы делятся на цилиндрические, когда зубья располагаются только на цилиндрической поверхности фрезы, и торцевые, у которых режущие зубья располагаются на торцевой и цилиндрической поверхности фрезы.

Шлифование обеспечивает получение высокой чистоты обработанной поверхности и высокой точности размеров обрабатываемых деталей. При шлифовании главным движением D_r является вращение шлифовального круга (рис. 8.1). Движение подачи обычно комбинированное и складывается из нескольких движений. Например, при круглом внешнем шлифовании – это вращение заготовки $D_{\text{скд}}$, при продольном – перемещение ее относительно шлифовального круга $D_{\text{спр}}$.

8.2. Параметры режима резания

При назначении режимов резания определяют:

- скорость главного движения резания;
- скорость подачи;
- глубину резания.

Режимы резания могут назначаться по справочным таблицам или рассчитываться.

Скорость главного движения (V) – это расстояние, пройденное точкой режущей кромки инструмента за единицу времени (м/с). Для вращательного движения:

$$V = (\pi D n) / 1000, \quad (8.1)$$

где D – максимальный диаметр заготовки, мм;

n – частота вращения, об/мин.

Для возвратно-поступательного движения:

$$V = [L m (k + 1)] / 1000 \cdot 60, \quad (8.2)$$

где L – расчетная длина хода инструмента;

m – число двойных ходов инструмента в минуту;

k – коэффициент, показывающий соотношение скоростей рабочего и вспомогательного хода.

Подача (S) – путь точки режущей кромки инструмента относительно заготовки в направлении движения подачи за один ход заготовки или инструмента. В зависимости от технологического метода обработки подачу измеряют в:

- мм/об или мм/мин – точение и сверление;
- мм/дв. ход – строгание, долбление и шлифование.

Глубина резания (t) – расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно к обработанной поверхности (мм):

$$t = (D_{\text{заг}} - d) / 2, \quad (8.3)$$

где $D_{\text{заг}}$ – диаметр заготовки до обработки, мм;

d – диаметр полученной поверхности, мм.

При сверлении глубина резания равна половине диаметра инструмента:

$$t = D_{\text{св}} / 2, \quad (8.4)$$

где $D_{\text{св}}$ – диаметр сверла, мм.

8.3. Корректировка режимов резания

Для назначения полученных режимов резания осуществляют корректировку полученных величин подач s по паспортным данным станка и корректировку частоты вращения детали или инструмента:

$$n = (1000V) / \pi D, \quad (8.5)$$

где V – расчетная или табличная скорость резания, м/мин;

D – диаметр обрабатываемой заготовки, мм.

После корректировки величин частот вращения шпинделя (n) и величины подачи (s) осуществляют снова расчет скорости резания по формуле (8.1).

8.4. Определение основного времени обработки

Основным временем $t_{\text{осн}}$ обработки является время, непосредственно затрачиваемое на процесс снятия металла с поверхности заготовки. В том случае, если снять весь слой металла за один проход инструмента невозможно, осуществляют обработку поверхности за несколько проходов (i), при этом, общую глубину резания (t) делят на число проходов.

$$t_{\text{осн}} = [L / (ns)]i, \quad (8.5)$$

где L – длина пути инструмента вдоль (или вглубь) обрабатываемой поверхности с учетом величин врезания и перебега, мм;

i – число проходов.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить и законспектировать основные сведения об обработке металлов резанием.

2. В соответствии с номером индивидуального задания (табл. 8.1) выполнить расчет режимов резания.

Таблица 8.1

Условия индивидуальных заданий

Номера вариантов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_{\text{заг}}$	50	–	50	42	–	60	–	45	55	–
d	40	25	45	40	12,5	50	8	40	50	12
L	50	25	40	40	20	25	12	80	100	20
i	4	1	2	1	1	5	1	1	2	1
V	100	24	72	125	18	150	22	105	123	24
s	0,4	0,25	0,2	0,12	0,2	0,5	0,14	0,4	0,65	0,15
Инструмент	резец	сверло	резец	резец	сверло	резец	сверло	резец	резец	сверло

Контрольные вопросы

1. Что такое скорость резания и в чем она измеряется?
2. Что такое подача и в чем она измеряется?
3. Что такое глубина резания?
4. Что такое движение резания?
5. С чего начинают выбор режимов резания?
6. Для чего выполняют корректировку величин частот вращения и подач?
7. Что такое сверление?
8. Что такое фрезерование?
9. Что совершает главное движение при работе токарного станка – инструмент или заготовка?
10. Что такое зенкерование?
11. Что такое основное время обработки и как его определить?
12. Что такое шлифование? Что такое строгание металла?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ковалевская, Ж. Г. Основы материаловедения. Конструкционные материалы : учебное пособие / Ж. Г. Ковалевская, В. П. Безбородов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 110 с.
2. Гуляев, А. П. Металловедение : учебник для вузов / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgia, 1986. – 544 с.
3. Измерение твердости по методу Бринелля: метод. указания к проведению лабораторных занятий / сост.: М. С. Разумов, А. А. Горохов. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2018. – 7 с.: ил.
4. Парфенов, В. Д. Структура и свойства углеродистых сталей : метод. указания / В. Д. Парфенов. – М. : МГУПС (МИИТ), 2015. – 38 с.
5. Евстифеев, В. В. Обработка материалов резанием: методы, станки, инструменты : учебное пособие / В. В. Евстифеев, М. С. Кобытов. – Омск : СибАДИ, 2012. – 76 с.
6. Лупачев, В. Г. Ручная дуговая сварка : учебник / В. Г. Лупачев. – Минск : Вышэйшая школа, 2006. – 416 с.: ил.
7. Худокормова, Р. Н. Материаловедение. Практикум : учебное пособие / Р. Н. Худокормова, Ф. И. Пантелеенко, Д. А. Худокормов. – Минск : Новое знание, 2014. – 311 с.

Учебное издание

ГОЛЬЦОВА Мария Викторовна
ПАНТЕЛЕЕНКО Федор Иванович
СИЛИНА Тамара Вадимовна и др.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебно-методическое пособие
для студентов энергетических специальностей

Редактор *Н. Ю. Казакова*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 19.08.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 4,19. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 100. Заказ 429.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.