

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Новотроицкий филиал

Кафедра металлургических технологий и оборудования

Братковский Е.В., Шевченко Е.А.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для практических занятий по дисциплине
«Технология конструкционных материалов»
для бакалавров направления подготовки
15.03.03 «Технологические машины и оборудование»,
всех форм обучения

Новотроицк 2017

УДК 621.74 (075.8)
ББК 30.3
Б 87

Рецензенты

*Доцент кафедры электроэнергетики и электротехники ФГАОУ ВО
НФ НИТУ «МИСиС», к.т.н. Лицин К.В.*

*Доцент кафедры электроэнергетики и теплоэнергетики
Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ФГБОУ ВО
«Оренбургский государственный университет»,
к.т.н., доцент Ануфриенко О.С.*

Братковский Е.В., Шевченко Е.А. «Технология конструкционных материалов»: Методические указания для практических занятий по дисциплине «Технология конструкционных материалов» для бакалавров направления подготовки 15.03.03 «Технологические машины и оборудование», всех форм обучения. - Новотроицк: НФ НИТУ МИСиС, 2017. - 59 с.

Методические указания предназначены для практического закрепления теоретического материала студентами по дисциплине «Технология конструкционных материалов». Пособие содержит теоретические основы и задачи по основным разделам лекционного курса. Приведена маркировка сталей, а также изложены основы теории строения металлов и сплавов, построения кривых охлаждения для сплавов разного состава, выбора режимов термической обработки сталей и сплавов.

Методическое пособие составлено в соответствии с требованиями ФГОС ВО и образовательных стандартов НИТУ «МИСиС» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.03 «Технологические машины и оборудование» очной и заочной форм обучения.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Новотроицкий филиал
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС», 2017

Содержание

Введение	4
Практическое занятие №1. Маркировка углеродистых сталей.....	5
Практическое занятие № 2. Маркировка легированных и инструментальных сталей.....	11
Практическое занятие №3. Твердость материалов и методы её измерения	13
Практическое занятие № 4. Основы микрокристаллического анализа металлов и сплавов	22
Практическое занятие № 5. Свойства и структура микрокристаллического строения чугунов и сталей	28
Практическое занятие № 6. Свойства и структура микрокристаллического строения цветных металлов и сплавов	33
Практическое занятие № 7. Изучение диаграммы «железо-цементит».....	37
Практическое занятие № 8. Основы рекристаллизации металлических сплавов	46
Практическое занятие № 9. Изучение влияния термической обработки на прочностные и пластические свойства стали	51
Список использованных источников	58

Введение

Металлы и их сплавы являются наиболее важными современными конструкционными материалами. В пособии рассмотрены основные факторы, определяющие технологические характеристики конструкционных материалов и практические вопросы, связанные с их применением.

От физических и механических свойств зависят технологические и эксплуатационные свойства материалов.

Главной задачей изучения дисциплины «Технология конструкционных материалов» является приобретение теоретических знаний и формирование практических навыков и умений, способствующих успешному освоению дальнейших дисциплин направления подготовки.

Дисциплину «Технология конструкционных материалов» студенты изучают в третьем и четвертом семестрах: практические занятия методических указаний №№1-5 выполняются в третьем, а занятия №№ 6-9 в четвертом семестре.

Успешное освоение практического материала дисциплины является необходимым условием качественного изучения таких специальных дисциплин как «Основы технологии машиностроения», «Машины и агрегаты металлургического производства», «Надежность и эксплуатация металлургических машин и оборудования», а также написания и защиты выпускной квалификационной работы.

Методические указания соответствуют государственному образовательному стандарту высшего образования и образовательным стандартам НИТУ «МИСиС», предусмотренным учебным планом подготовки бакалавров направления подготовки 15.03.03 «Технологические машины и оборудование» по дисциплине «Технология конструкционных материалов».

Практическое занятие №1. Маркировка углеродистых сталей

1 Цель занятия

1.1 Разобрать и научить классифицировать стали.

1.2 Научить основам маркирования сталей.

2 Теоретическое введение

Стали - наиболее широко применяемый конструкционный материал. Поэтому стали представлены в современной технике наибольшим числом марок и классифицируются по нескольким основополагающим признакам.

По способу производства стали классифицируют:

1) Стали обыкновенного качества (или рядовые); по химическому составу - это углеродистая сталь, содержащая до 0,6% С. Сталь выплавляется в конвертерах (с применением кислорода) или в большегрузных мартеновских печах, разливается в крупные слитки или способом непрерывной разливки и является поэтому более дешевой. Это предопределяет следующие особенности сталей обыкновенного качества. Они могут иметь повышенное содержание серы фосфора. Для некоторых марок стали допускаемые уровни составляют: для серы и до 0,050 и даже 0,070% для фосфора; ликвация в сталях того класса значительнее, чем в рассматриваемых ниже других сталях.

Сталь обыкновенного качества может иметь, кроме того повышенное (по сравнению со сталью следующих классов) количество неметаллических включений. В катаном состоянии для этой группы сталей характерна полосчатость вдоль направления волокна; она отчетливо выявляется макроанализом и микроанализом. Сталь обыкновенного качества уступает, по механическим свойствам, сталям других классов.

Основным элементом, определяющим механические свойства сталей обыкновенного качества, является углерод. С повышением его концентрации возрастают прочностные свойства (временное сопротивление разрыву и предел текучести), но снижается пластичность.

В зависимости от назначения и характеристик, гарантируемых металлургическими заводами, эти стали в свою очередь подразделяются на стали, поставляемые по механическим свойствам (конвертерная или мартеновская); химическому составу (конвертерная или точнее кислородно-конвертерная или мартеновская) и по химическому составу и механическим свойствам одновременно мартеновская повышенного качества.

По ГОСТ 380-71 стали обыкновенного качества, поставляемые по механическим свойствам, обозначаются марками, от Ст0 до Ст6. Стали с более высоким номером в марке содержат более высокое содержание углерода и имеют повышенные прочностные свойства, но меньшую вязкость и пластичность.

Стали обыкновенного качества подразделяются, кроме того по способу производства на: спокойные, полуспокойные и кипящие.

Спокойные стали раскисляют в процессе плавки марганцем и кремнием (ферросилицием). Кремний является более активным раскислителем. Соответственно спокойные стали содержат пониженные количества кислорода и неметаллических включений (оксидов).

Содержание кремния в спокойных сталях колеблется в пределах от 0,15 до 0,35 %, но даже это, относительно небольшое количество кремния повышает предел текучести и снижает пластичность.

Кипящие стали не раскисляют кремнием. Они содержат его только в качестве примеси (не более 0,1%). Частичное удаление растворенного кислорода происходит в процессе затвердевания, за счет взаимодействия кислорода с углеродом стали. Образующиеся при этом пузырьки СО частично всплывают в верхнюю часть слитка (увеличивая объем слитка и вызывая «кипение») и частично, в связи с затвердеванием в процессе кристаллизации, остаются в объеме литой стали. Окись углерода удаляется из пузырьков через различные микропоры и микротрещины. При последующей пластической деформации эти пустоты, имеющие неокисленную поверхность, завариваются.

Кипящие стали, по сравнению со спокойными, имеют более низкий предел текучести, при одинаковом пределе прочности. Поэтому они более технологичны при холодной прокатке и вытяжке, с большими степенями деформации. Кипящие стали применяют в виде листового проката, подвергаемого глубокой вытяжке в автомобильной и других отраслях промышленности. Однако эти стали склонны к хрупкому разрушению, особенно при отрицательных температурах и не рекомендуется использование при динамических нагрузках.

Поскольку характеристики пластичности тем выше, чем ниже содержание углерода, то для кипящих сталей содержание углерода установлено в пределах от 0,2 до 0,25%. Кроме того при пониженном содержании углерода лучше завариваются пустоты.

Согласно ГОСТ, кипящие стали обозначаются дополнительно буквами «кп» в конце марки.

Полуспокойные стали содержат до 0,17% кремния и занимают промежуточное положение по указанным выше свойствам. По пределу текучести они превосходят кипящие стали и имеют более низкие температуры охрупчивания. Полуспокойные стали в частности, применяются для холодного выдавливания болтов и других деталей.

Согласно ГОСТ, полуспокойные стали обозначаются дополнительно буквами «пс» в конце марки.

Стали качественные по химическому составу это углеродистые или легированные стали, выплавляемые преимущественно в основных мартеновских печах, электросталеплавильных печах, кислородных конвертерах с соблюдением более строгих требований к составу шихты, процессам плавки и разливки. Содержание серы и фосфора в качественных сталях не должно превышать (в зависимости от марки) 0,035% каждого. Неметаллических включений в этих сталях меньше, чем в сталях обыкновенного качества. Колебания в содержании углерода в пределах марки не должно превышать

0,08%. Качественные стали, предназначенные для глубокой поставляемые в листах, выплавляются как кипящие, а применяемые для холодной высадки - как полуспокойные.

Стали высококачественные по химическому составу - главным образом более легированные стали, выплавляемые преимущественно в электрических, а также в кислородных конвертерах и мартеновских печах. Содержание серы и фосфора в высококачественных сталях еще ниже и не превышает 0,025% каждого. Стали имеют повышенную чистоту по неметаллическим включениям. Колебания в содержании углерода в пределах марки должны быть не более 0,07%, т.е. в более узких пределах, чем для качественных сталей.

Стали особо высококачественные выплавляются в электрических печах с электрошлаковым переплавом (или другими совершенными методами) и имеют наименьшее содержание серы (до 0,015%). Содержание углерода и легирующих элементов такое же как и в соответствующих марках высококачественных сталей. В результате электрошлакового переплава уменьшается также содержание газов в стали. Все это повышает ударную вязкость, прежде всего при отрицательных температурах, смещая порог хладноломкости к более низким температурам, пластичность и контактную выносливость. Эти факторы позволяют применять такие стали при более высокой прочности и твердости.

Углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-94).

В зависимости от технологии раскисления стали выпускаются трех разновидностей:

- кипящие с $C < 0,27 \%$ (Ст1кп, Ст2кп, Ст3кп и Ст4кп);
- полуспокойные (Ст1пс, Ст2пс, Ст3пс, Ст4пс, Ст5пс и Ст6пс);
- спокойные (Ст1сп, Ст2сп, Ст3сп, Ст4сп, Ст5сп, Ст6сп).

К ним относятся также стали с повышенным содержанием марганца (Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст6Гпс): $Mn = 0,8 * 1,10 \%$. Эти стали, имеют повышенную прочность по сравнению с прочностью сталей Ст3пс, Ст3сп и Ст6пс.

В стали Ст0 ограничивают только содержание углерода (не более 0,23 %), к количеству серы, фосфора, а также к технологии ее выплавки не предъявляют специальных требований, а только нормируют предел прочности ($\sigma_b \geq 300$ МПа).

В сталях обыкновенного качества нормируется вредных примесей ниже, чем у сталей других групп: $S \leq 0,05 \%$, $P \leq 0,04 \%$, $As \leq 0,08 \%$.

У горячекатаных сталей скорость охлаждения уменьшается при увеличении толщины проката от 10 до 100 мм. Уменьшение скорости охлаждения приводит к образованию более грубых ферритно-перлитных структур и уменьшению σ_T и δ .

Прокат из углеродистых сталей в зависимости от назначения разделяют на три группы:

I - все виды проката, которые будут использоваться без обработки поверхности;

II - с обработкой резанием;

III - с обработкой давлением.

В зависимости от условий эксплуатации изделий и сооружений показатели свойств сталей определяют в разном объеме. Прокат из углеродистых сталей обыкновенного качества разделяют на пять категорий. Обязательными для всех категорий являются испытания на растяжение (определяют σ_B , σ_T и δ) и на изгиб. Химический состав определяют для 2, 3, 4 и 5-й категорий. Ударную вязкость КСЧ определяют при $+20\text{ }^\circ\text{C}$ (3-я категория); $-20\text{ }^\circ\text{C}$ (4-я категория) и после механического старения (5-я категория).

При более высоком допустимом содержании примесей эти стали содержат больше неметаллических включений, чем стали других групп. В прокатанной стали обычно образуется полосчатая или строчечная структура, ориентированная в направлении прокатки. Такую же ориентацию имеют цепочки частиц неметаллических включений, раскатанных ленточек и волокон этих включений. Полосчатая структура, выявляемая микро- и макротравлением, является признаком анизотропии.

Углеродистые качественные стали (ГОСТ 1050-88).

Марки стали: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58 (55кп), 60.

Кипящие стали марок: 08кп, 10кп, 11кп, 18кп, 20кп. Стали 11кп и 18кп используют для плакирования, от других кипящих сталей они отличаются содержанием серы ($\leq 0,035\%$), фосфора ($\leq 0,030\%$) и меди ($\leq 0,20\%$).

Полуспокойные стали выпускают марок 08пс, 10пс, 15пс, 20пс.

Особенностями химического состава углеродистых качественных сталей являются суженный интервал содержания углерода (0,08 %), нормированное содержание хрома (0,10-0,25 %). Для предупреждения «подкаливания» при охлаждении проката и обеспечения его твердости не выше 255 НВ независимо от содержания углерода ограничено содержание серы и фосфора (до 0,035 % каждого элемента). Если стали предназначены для изготовления патентированной проволоки, то в них уменьшают содержание марганца (0,30-0,60 %) и примесей: хрома ($< 0,15\%$), никеля ($< 0,15\%$) и меди ($< 0,20\%$), чтобы не увеличить устойчивость переохлажденного аустенита и не получить после патентирования нежелательную структуру с пониженной технологической пластичностью. Для проката сталей с $C > 0,35\%$ нормируется обезуглероживание, если детали из этих сталей будут подвергаться индукционной закалке. Допускается обезуглероживание на глубину не более 0,5-1,5 % диаметра (на сторону), включая слой феррита и переходную зону.

Инструментальные углеродистые стали (ГОСТ 1435-90).

Из инструментальных углеродистых сталей получают горячекатаную, кованую и калиброванную сталь, сталь серебрянку, сталь для сердечников, а также слитки, листы, ленту, проволоку и другую продукцию. Из этих сталей изготавливают режущий инструмент для обработки металлов, дерева и пластмасс, измерительный инструмент, штампы для холодного деформирования.

Теплостойкость инструментальных углеродистых сталей не превышает $200\text{ }^\circ\text{C}$, при нагревании выше этой температуры они теряют свою твердость, а следовательно, режущие свойства и износостойкость.

Инструментальные углеродистые стали подразделяются на две группы:

- качественные стали - У7, У8, У8Г, У9, У10, У11, У12 и У13;

- высококачественные стали - У7А, У8А, У8ГА, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А.

В качественных инструментальных углеродистых сталях допускается содержание 0,03 % серы и 0,035 % фосфора, в высококачественных - 0,02 % серы и 0,03 % фосфора. Стали, полученные методом электрошлакового переплава, содержат до 0,015 % серы. В зависимости от содержания хрома, никеля и меди инструментальные углеродистые стали подразделяют на пять групп:

1-я - качественные стали всех марок, предназначенные для изготовления продукции всех видов (кроме патентованной проволоки и ленты);

2-я - высококачественные стали всех марок, предназначенные для тех же целей, что и стали 1-й группы;

3-я - стали марок У10А и У12А для изготовления сердечников;

4-я - стали всех марок для производства патентованной проволоки и ленты;

5-я - стали марок от У7 до У13 для изготовления горячей холоднокатаных листов и лент, в том числе термически обработанных толщиной до 2,5 мм (кроме патентованной ленты), а также стали марок от У7А до У13А для производства горячекатаной и кованой сортовой стали и холоднотянутой шлифованной стали (серебрянки).

Группа стали указывается в заказе потребителя. Нормы на поставляемую сталь обусловлены ГОСТ 1435-90.

Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, значительно превышающей твердость обрабатываемого материала, износостойкостью и теплостойкостью (способностью сохранять свойства при высоких температурах). Измерительный инструмент, изготовленный из такой стали, должен быть твердым и длительное время сохранять заданные размеры и форму. Рабочие детали штампов и накатных роликов для холодного деформирования (вытяжки, гибки, высадки, пробивки отверстий, накатки, раскатки), сделанные из этой стали, должны иметь высокую твердость, обладать износостойкостью при достаточной вязкости. Все это достигается путем закалки с отпуском, а для измерительного инструмента и за счет искусственного старения.

Из стали У9 производят деревообрабатывающий режущий инструмент (сверла, фрезы, ножи) и ножовочные полотна для обработки стали. Металлорежущий инструмент (фасонные резцы, сверла, метчики, плашки, развертки, фрезы, напильники и ходовые винты прецизионных станков) изготавливают из сталей У10, У11 и У12, бритвенные ножи, лезвийный хирургический инструмент и напильники — из стали У13, слесарные молотки, зубила, губки тисков — из сталей У7 и У8, шаблоны, скобы, детали микрометрического инструмента, гладкие и резьбовые калибры, цанги, фрикционные диски, пружины — из сталей У8, У9 и У10. Как правило, изготовлению инструмента предшествует отжиг на зернистый цементит, который способствует лучшей обрабатываемости резанием и уменьшает коробление деталей при закалке.

Влияние углерода и примесей на структуру и свойства сталей.

Кроме железа и углерода стали в своем составе, имеют некоторое количество постоянных примесей. Они оказывают различное влияние на структуру, а следовательно, и на свойства сталей (сера, фосфор, марганец, кремний) а также углерод оказывающий основное влияние на их структуру и свойства. Чем больше содержание углерода, тем выше твердость и прочность стали, но тем ниже пластичность и вязкость. Наибольший предел прочности σ_b достигается при содержании углерода около 0,9 %. При дальнейшем увеличении количества углерода в структуре стали появляется вторичный цементит, располагающийся по границам зерен перлита в виде сетки. Из-за этого увеличивается твердость, но уменьшается прочность, так как цементит хрупок. Снижаются ударная вязкость $KC (a_n)$, относительное удлинение δ и относительное сужение φ .

Сера попадает в сталь из чугуна, а в чугун - из руды и кокса. В железе она почти нерастворима, а в структуре стали образует химические соединения: с железом - (сульфид железа FeS) или с марганцем - (сульфид марганца MnS). Эти сульфиды, а также соединения кислорода с железом и с марганцем (FeO , MnO) называют неметаллическими включениями. Сульфид железа (FeS) располагается по границам зерен, температура его плавления $985^\circ C$.

Температура горячей обработки давлением стали выше $1000^\circ C$, поэтому каждое зерно находится в жидкой «рубашке» расплавленной эвтектики (сульфида железа), что служит причиной возникновения трещин.

Связь между зернами, разогретыми до температуры выше $1000^\circ C$, ослабевает, и сталь разрушается. Такое явление называют красноломкостью, а сталь с повышенным содержанием серы - красноломкой (сульфид марганца MnS).

Содержание серы строго регламентируется в зависимости от качества стали (0,025-0,06%), что обусловлено склонностью серы к зональной ликвации при затвердевании слитка (скапливание серы в отдельных участках слитка). Сера оказывает благоприятное влияние на сталь при ее обработке на станках-автоматах, так как способствует образованию ломкой стружки.

Фосфор попадает в сталь так же, как и сера. Атомы фосфора, располагаясь в кристаллической решетке железа, сильно искажают ее, повышая твердость. Фосфор значительно снижает пластичность стали, делая ее хрупкой, особенно при температурах ниже нуля. Это явление называют хладноломкостью. Кроме того, фосфор, как и сера, склонны к образованию ликвационных зон, что отрицательно сказывается на свойствах стали. Содержание фосфора в зависимости от качества стали должно находиться в пределах 0,025-0,07 %. Как и сера, фосфор улучшает обрабатываемость стали резанием.

Кремний и марганец в тех количествах, в которых они содержатся в углеродистых сталях (кремний - до 0,4 %, марганец - до 0,08 %), не оказывают заметного влияния на их свойства.

В сталях присутствуют газы (кислород, азот, водород), которые частично растворены и находятся в виде неметаллических включений (окислы и нитриды).

3 Контрольные вопросы

- 1 Приведите классификацию сталей по качественным показателям.
- 2 Расскажите как маркируются углеродистые инструментальные стали.
- 3 Определите химический состав и способ выплавки следующих марок сталей: Ст3пс, сталь 45, У10, Ст3, ВСт5, сталь10кп, У8А, У12, Ст5кп.
- 4 Охарактеризуйте влияние углерода на механические и технологические свойства сталей.
- 5 Опишите влияние фосфора и серы на механические и технологические свойства сталей.
- 6 Приведите классификацию видов металлопроката из углеродистых марок сталей.

Практическое занятие № 2. Маркировка легированных и инструментальных сталей

1 Цель занятия

- 1 Научить основам маркирования сталей.
- 2 Изучить маркировку конструкционных сталей.
- 3 Изучить маркировку инструментальных сталей.
- 4 Получить практические навыки классификации сталей.

2 Теоретическое введение

В легированных сталях основные легирующие элементы обозначают буквами:

А - азот; К - кобальт; С - кремний; Б - ниобий; Л - бериллий;
Т - титан; В - вольфрам; М - молибден; Х - хром; Г - марганец; Н -
никель; Ц - цирконий; Д - медь; П - фосфор; Е - селен; Ч -
редкоземельный; Р - бор; Ф - ванадий; Ю - алюминий.

Пример расшифровки марки стали представлен на рисунке 2.1

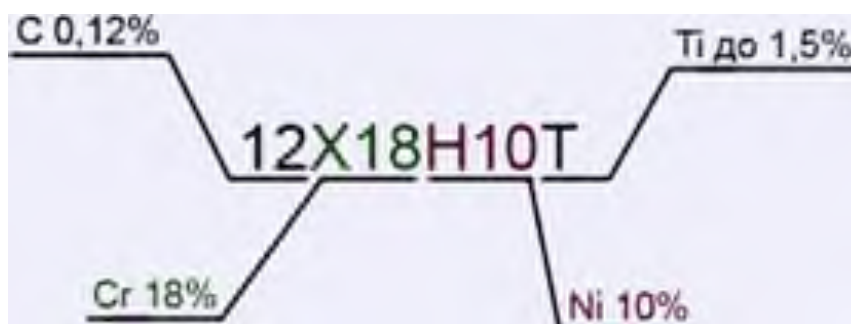


Рисунок 2.1 - Пример расшифровки маркировки стали

Цифры, стоящие после буквы в обозначении марки стали показывают примерную массовую долю элемента, округленную до целого числа. При средней массовой доле легирующего элемента до 1,5 % цифру за буквой не

обозначают. Массовая доля углерода указывается вначале в сотых (конструкционные стали) или десятых (инструментальные стали) долях процента. Так, конструкционную сталь, содержащую (%): $C = 0,42 \div 0,50$; $Mn = 0,5 \div 0,8$; $Cr = 0,8 \div 1,0$; $Ni = 1,3 \div 1,8$; $Mo = 0,2 \div 0,3$ и $V = 0,10 \div 0,18$, обозначают 45ХН2МФ. Инструментальную сталь для штампов горячего деформирования, содержащую (%): $C = 0,32 \div 0,40$; $Si = 0,80 \div 1,20$; $Mn = 0,15 \div 0,40$; $Cr = 4,5 \div 5,5$; $Mo = 1,20 \div 1,50$ и $V = 0,3 \div 0,5$, $Si = 0,90 \div 1,2$, обозначают 4Х5МФС.

Если в инструментальной легированной стали $C > 1,0$ %, цифру в начале марки обычно не проставляют (например, Х, ХВГ).

В обозначение марки подшипниковой стали входят: буква Ш и буквы, обозначающие легирующие элементы. За буквой Х (легированная хромом) обозначают цифры, соответствующие массовой доле хрома в десятых долях процента (например, ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ).

Буква А в конце марки любой стали указывает, что сталь относится к категории высококачественной (30ХГСА, У7А), в середине обозначения марки — что сталь легирована азотом (16Г2АФ), в начале марки — что сталь автоматная повышенной обрабатываемости резанием (А35Г2). Буквы АС в начале марки указывают, что сталь автоматная со свинцом (АС35Г2).

Особовысококачественную сталь обозначают, добавляя через дефис в конце марки буквы Ш или другие буквы (30ХГС-Ш или 95Х18-Ш). Это означает, что сталь подвергалась электрошлаковому переплаву, обеспечивающему эффективную очистку от сульфидов и оксидов.

Стали, полученные специальными методами, обозначаются буквами через дефис в конце марочного обозначения марки. Например, хромистая сталь ШХ15-ВД для прецизионных подшипников по химическому составу соответствует подшипниковой стали ШХ15, но производится методом переплава в вакуумно-дуговой печи электродов из стали ШХ15, которые изготовлены из слитка, полученного электрошлаковым переплавом.

Сталь, не содержащая в конце марки буквы А, Ш или другие буквы, относится к категории качественных (30ХГС, У7).

В конце марки конструкционной стали могут быть дополнительные буквенные обозначения: ПП - сталь пониженной прокаливаемости, Л - литейная, К - сталь для котлов и др.

Строительную сталь обозначают буквой С и цифрами, условно соответствующими пределу текучести проката. Буква К в конце марки — вариант химического состава стали с повышенной коррозионной стойкостью в атмосфере, а буква Т - термоупрочненный прокат (например, С245, С345Т, С390К).

В обозначение марки быстрорежущей стали входят: буква Р, цифра, указывающая среднюю массовую долю вольфрама в процентах. Во всех быстрорежущих сталях массовая доля хрома составляет около 4 %, поэтому в обозначении марки букву Х не указывают. Ванадий, массовая доля которого в различных марках колеблется от 1 до 5 %, обозначается буквой Ф, если его средняя массовая доля составляет более 2,5 %.

Массовая доля углерода в марочном обозначении быстрорежущей стали не указывается, так как она пропорциональна массовой доле ванадия. Если быстрорежущая сталь легирована молибденом или кобальтом, их массовая доля указывается в марке. Например, быстрорежущую сталь, содержащую (%): С = 1,0÷1,1; Cr = 3,0÷3,6; W = 8,5÷9,6; V = 2,1 ÷ 2,5; Co=7,5÷8,5; Mo = 3,8 ÷ 4,3, обозначают Р9М4К8.

3 Контрольные вопросы

1 Расшифровать марки сталей и сплавов:

20Х1; 38Х6НФТ; 06ХГР; 8Х4В3М3Ф2; Х12; АС14ХГН; 4Х5В2ФС; Ст3кп; Ст4пс; У9А; 65Г; 35Л; 40Х; 45Г; 10ХСНД; 30Х3МФ; А20; 18ХГТ; 12Х2Н4ВА; ШХ9; 25; 17ГС;

2 Расшифровать марки сталей и сплавов:

9Х2ВФ; 8Х6НФТ; 06ХГР; 8Х4В3М3Ф2; Х12; АС14ХГН; 4Х5В2ФС; Ст4кп; Ст4пс; У9А; 65Г; 50Л; 30Х; 45Г; 20ХГР; 30Х3МФ; А204 20ХГНТР; 18Х2Н4ВА; ШХ15; 45; 30Х13

3 Расшифровать марки сталей и сплавов:

Р6М5Ф3; 9ХС; 18ХГТ; 09Г2С; 8Х4В3М3Ф2; Х12М; А12; 4Х5В2ФС; Ст6пс; Ст4кп; У8А; 60ХН; 35Л; 30Х; 45Г; 20ХГР; 30Х3МФ; А20 20ХГНТР; 12Х2Н4ВА; ШХ9; 45; 30Х13

4 Расшифровать марки сталей и сплавов:

10Х13; 16Г2АФ; 40ХН; 4Х2В2МФС; 12ХФ; АС14ХН; 4Х4ВМФС; Ст4кп; Ст4пс; У12; 60С2; 65Г; 50Л; 30Х; 45Г; 20ХГР; 30Х3МФ; А20 20ХГНТР; 18Х2Н4ВА; ШХ15; 45; 30Х13

5 Расшифровать марки сталей и сплавов:

9Х2ВФ; 8Х6НФТ; 06ХГР; 8Х4В3М3Ф2; Х12; АС14ХГН; 4Х5В2ФС; Ст4кп; Ст4пс; У9А; 65Г; 50Л; 30Х; 45Г; 20ХГР; 30Х3МФ; А204 20ХГНТР; 18Х2Н4ВА; ШХ15; 45; 30Х13.

6 Расшифровать марки сталей и сплавов:

5ХГМ; В2Ф; 08ЮА; 2Х6В8М2К8; 6ХС; 8Х6НФТ; 4Х5В2ФС; Ст2кп; Ст3пс; У13А; 65Г; 110Г13Л; 35Л; 40ХМФА; 20Г; 15ХСНД; 30Х3МФ; А12; 30ХГТ; 12Х2Н4ВА; ШХ9; 45.

Практическое занятие №3. Твердость материалов и методы её измерения

1 Цель занятия

1.1 Изучить конструкции основных видов твердомеров Роквелла, Бринелля, Виккерса.

1.2 Изучить основные методы измерения твердости.

2 Теоретическое введение

Твердость - способность материалов сопротивляться пластической или упругой деформации при внедрении в него более твердого тела. Обычно ее

определяют воздействием на поверхность металла наконечника, изготовленного из малодеформирующегося материала (твердая закаленная сталь, алмаз, сапфир или твердый сплав) и имеющего форму шарика, конуса, пирамиды или иглы. По сравнению с другими характеристиками механических свойств твердость измеряется достаточно просто несколькими способами, различающимися по характеру воздействия на наконечник. Твердость можно измерять вдавливанием наконечника (способ вдавливания) - сопротивление пластической деформации, царапаньем поверхности (способ царапанья) - сопротивление разрушению (для большинства металлов путем среза), ударом либо по отскоку наконечника (шарика) - упругие свойства.

Наибольшее распространение получило измерение твердости вдавливанием. В результате вдавливания с достаточно большой нагрузкой поверхностные слои металла, находящиеся под наконечником и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Особенность происходящей при этом деформации заключается в том, что она протекает в небольшом объеме, окруженном недеформированным металлом. Пластическую деформацию при вдавливании могут испытывать не только пластичные, но и хрупкие металлы (например, серый чугун), которые при обычных механических испытаниях (на растяжение, сжатие, кручение, изгиб) разрушаются хрупко почти без макроскопически заметной пластической деформации. Таким образом, твердость, характеризующая сопротивление пластической деформации, представляет собой механическое свойство металла, отличающееся от других его механических свойств способом измерения.

Особенности испытаний твердости:

1 При испытании на твердость можно определить количественную зависимость между твердостью пластичных металлов, установленной путем вдавливания, и другими механическими свойствами (главным образом пределом прочности). Твердость характеризует предел прочности сталей (кроме аустенитной и мартенситной структур) и многих цветных сплавов. Указанная количественная зависимость обычно не наблюдается у хрупких материалов, которые при испытаниях на растяжение (сжатие, изгиб, кручение) разрушаются без заметной пластической деформации, а при измерении твердости получают пластическую деформацию. Однако в ряде случаев и для этих материалов (например, серых чугунов) можно установить эту зависимость (возрастанию твердости обычно соответствует увеличение предела прочности на сжатие). По значениям твердости определяются некоторые пластические свойства металлов.

Твердость, установленная вдавливанием, характеризует также предел выносливости некоторых металлов, в частности меди, дюралюминия и сталей в отожженном состоянии.

2 Измерить твердость значительно проще, чем определить прочность, пластичность и вязкость. Испытания на твердость не требуют изготовления специальных образцов и выполняются прямо на деталях после зачистки их поверхности (создание ровной горизонтальной площадки), а иногда даже и без предварительной их подготовки. Для проведения этих испытаний не требуется

много времени. Так, вдавливание конуса осуществляется за 30-60 с, вдавливание шарика - за 1-3 мин.

3 Измерение твердости обычно не влечет разрушения проверяемой детали, которая после испытаний может использоваться по своему назначению, в то время как для определения прочности, пластичности и вязкости приходится изготавливать специальные образцы.

4 Твердость можно измерять на деталях небольшой толщины, а также в очень тонких слоях, не превышающих иногда десятых долей миллиметра, или в микрообъемах металла (измерения микротвердости). Поэтому путем измерения твердости можно оценивать различные по структуре и свойствам слои металла, например поверхностный слой цементированной, азотированной или закаленной стали, имеющей разную твердость по сечению детали. Путем определения микротвердости можно измерить твердость отдельных структурных составляющих в сплавах.

Для получения полной характеристики свойств металла необходимо наряду с измерением твердости провести другие механические испытания. Поскольку измерения твердости в большинстве случаев не влекут за собой разрушения деталей, их можно выполнять при сплошном контроле, в то время как при определении прочности и пластичности проводят выборочный контроль деталей.

Способом вдавливания определяют твердость (макротвердость) и микротвердость. При измерении твердости (макротвердости) в исследуемый материал вдавливаются тело, проникающее на сравнительно большую глубину, зависящую от прилагаемой нагрузки и свойств металла. Часто вдавливаемое тело имеет значительные размеры (например, стальной шарик диаметром 10 мм), в результате чего в деформируемом объеме оказываются представленными все фазы и структурные составляющие сплава, количество и расположение которых характерны для измеряемого материала. Измеренная твердость в этом случае будет характеризовать твердость всего испытываемого материала.

Выбор формы и размеров наконечника, а также нагрузки зависит от целей исследования, структуры, ожидаемых свойств, состояния поверхности и размеров испытываемого образца. Если металл имеет гетерогенную структуру с крупными выделениями отдельных структурных составляющих, различных по свойствам (например, серый чугун, цветные подшипниковые сплавы), то для испытания твердости следует использовать шарик большого диаметра. Если металл обладает сравнительно мелкой и однородной структурой, то малые по объему участки могут быть достаточно характерными для оценки свойств металла в целом и, в частности, его твердости. В таком случае испытания можно проводить вдавливанием тела небольшого размера (например, алмазного конуса или пирамиды) на незначительную глубину при небольшой нагрузке. Подобные испытания рекомендуются для металлов с высокой твердостью, например закаленной или низкоотпущенной стали, поскольку вдавливание стального шарика или алмаза с большой нагрузкой может вызвать деформацию шарика или скалывание алмаза. Вместе с тем значительное снижение нагрузки нежелательно, так как это может привести к резкому умень-

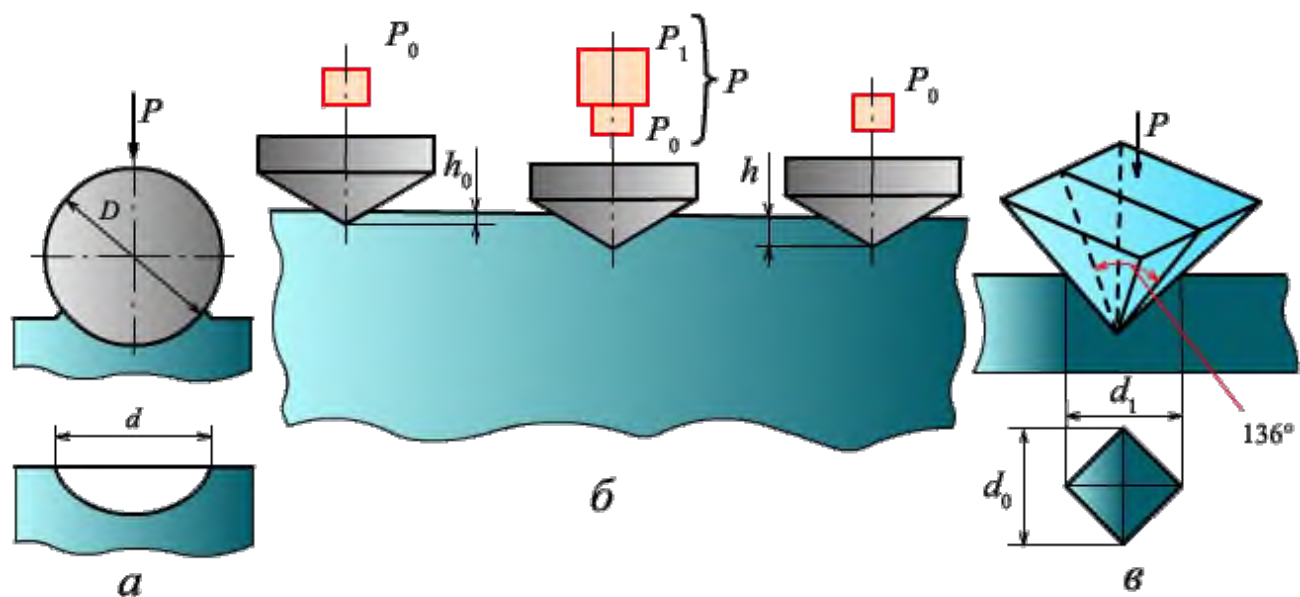
шению деформируемого объема, тогда полученные значения твердости не будут характерными для основной массы металла. Поэтому нагрузки и размеры отпечатков на металле не должны быть меньше некоторых пределов.

Микротвердость измеряется в целях определения твердости отдельных зерен, фаз и структурных составляющих сплава, а также свойств очень малых по размерам деталей. Поэтому объем металла, деформируемого вдавливанием, должен быть меньше объема (площади) измеряемого зерна. Прилагаемая нагрузка не должна превышать 0,05 МПа (0,5 кгс/мм²).

Измерение твердости полимерных материалов дает меньше информации об их свойствах, так как между твердостью и прочностью этих материалов нет определенной зависимости. Результаты таких измерений служат лишь дополнительной характеристикой свойств указанных материалов.

Значительное влияние на результаты испытаний твердости оказывает состояние поверхности исследуемого материала. Поэтому на поверхности должна быть шлифованная горизонтальная площадка, а при измерении микротвердости - полированная поверхность (в этом случае при изготовлении шлифа нельзя допускать наклепа в поверхностном слое).

Основные методы измерения твердости представлены на рисунке 3.1.



а — по Бринеллю; б — по Роквеллу; в — по Виккерсу
Рисунок 3.1 - Основные методы измерения твердости

Для определения твердости как металлов, так и полимерных материалов используют метод Бринелля. Измерения осуществляют с помощью шарикового твердомера (ТБ) по ГОСТ 9012-59 (рисунок 3.2). Толщина образца S должна не менее чем в 8 раз превышать глубину отпечатка h и определяться по формуле.

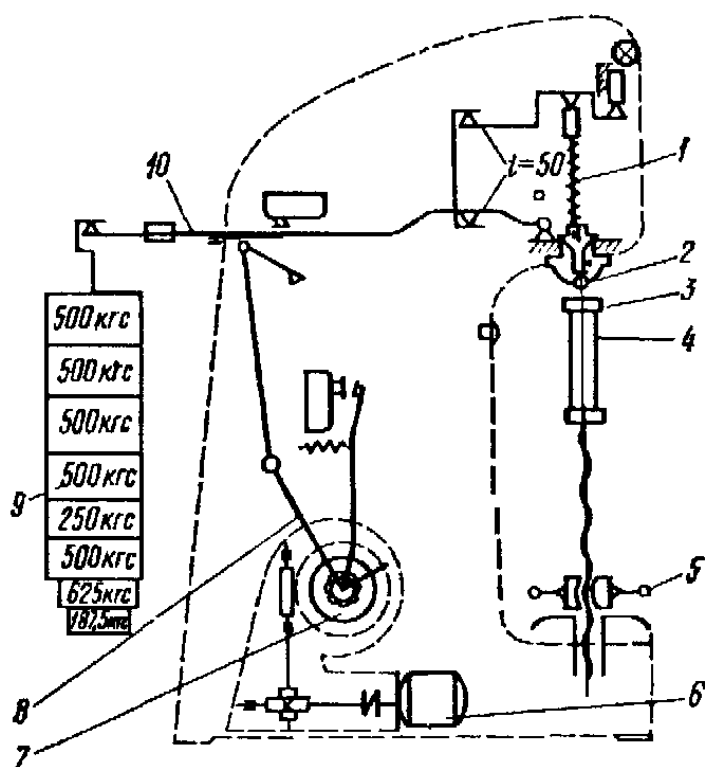


Рисунок 3.2 - Схема прибора измерению твердости по Бринеллю

При определении твердости шариком диаметром 1 мм поверхность образца должна быть отполирована. Прибор для измерения твердости производится по ГОСТ 23677-79. К нему применяются стальные и твердосплавные шарики диаметрами 1,0; 2,0; 2,5; 5,0; 10 мм.. Значение K выбирают в зависимости от металла и его твердости по таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Значение показателя K в зависимости от вида материала

Материал	НВ	K
Сталь, чугун, высокопрочные сплавы (на основе никеля, кобальта и др.)	До 140 Св. 140	10 30
Титан и сплавы на его основе	Си. 50	15
Медь и сплавы на ее основе	До 35	5
Легкие металлы и их сплавы	Си. 35	10
Подшипниковые сплавы	8 50	2,5
Свинец, олово и другие мягкие металлы	До 20	1

Образец (деталь) устанавливают на столике 3 в нижней части неподвижной станины пресса зачищенной поверхностью вверх. Поворотом ручную маховика 5 по часовой стрелке столик поднимают до упора. Нажимают кнопку 4 и включают двигатель 6, который перемещает кривошип 8 и постепенно нагружает шток 1. Под действием нагрузки, сообщаемой подвешенным к рычагу 10 грузом 9, шарик 2 вдавливаются в образец.

Нагрузка (на приборе обозначена условно в кгс) действует в течение определенного времени (10-180 с) в зависимости от твердости измеряемого материала, после чего вал двигателя, вращаясь в обратную сторону,

перемещает кривошип и снимает нагрузку. После автоматического выключения двигателя поворотом маховика 5 против часовой стрелки опускают столик прибора и снимают образец. Время приложения нагрузки регулируется по шкале 7 реле двигателя. После испытания на образце остается отпечаток (лунка). Диаметр отпечатка измеряют с помощью лупы, на окуляре которой имеется шкала с делениями от 0,05 до 0,1 мм. Диаметр отпечатка измеряют с точностью до 0,05 мм (при вдавливании шарика диаметром 5-10 мм). Измерения выполняют в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Показателем твердости будет среднее из полученных значений. Имеются приборы (бринескопы), с помощью которых отпечаток в увеличенном масштабе проецируется на экран. Диаметр такого отпечатка измеряется линейкой

Испытания вдавливанием шарика проводят с металлами небольшой и средней твердости (например, твердость стали должна быть не более 450 НВ). ГОСТом установлены нормы для испытаний по Бринеллю. Твердость полимерных материалов, как и их прочность, в большой степени зависит от длительности приложения нагрузки.

В случае испытания шариком определенного диаметра при установленных нагрузках нет необходимости проводить расчеты. На практике пользуются заранее составленными таблицами, в которых приводится твердость НВ в зависимости от диаметра отпечатка и соотношения между нагрузкой F и площадью поверхности отпечатка A . Используя таблицы, твердость НВ можно перевести на твердость по Роквеллу и Виккерсу (условно).

Между пределом прочности и твердостью НВ различных металлов существует приблизительная зависимость: для стали твердостью 120-175 НВ $\sigma_B \approx 0,34$ НВ; для стали твердостью 175-450 НВ $\sigma_B \approx 0,35$ НВ; для меди, латуни, бронзы отожженной $\sigma_B \approx 0,55$ НВ, наклепанных $\sigma_B \approx 0,40$ НВ; для алюминия и алюминиевых сплавов твердостью 20-45 НВ $\sigma_B \approx (0,33-0,36)$.

По площади отпечатка (лунки) $A_{л}$ и площади проекции отпечатка $A_{пр}$ можно определить пластичность стали $\psi_{вд}$ по формуле:

$$\psi_{вд} = \frac{A_{л} - A_{пр}}{A_{л}}$$

Величина $\psi_{вд}$ связана с относительным сужением ψ . В меньшей степени соблюдается количественная зависимость между твердостью НВ и пределом выносливости. Сравнительно простая зависимость существует лишь для сплавов и равновесном (отожженном) состоянии.

Измерение твердости по глубине отпечатка, получаемого при вдавливании алмазного конуса или стального шарика — метод Роквелла с помощью конусного твердомера (ТР) по ГОСТ 9013-59 (рисунок 3.3). Этот метод позволяет изменять нагрузку в широких пределах без изменения значений твердости. Прибор имеет столик 4, установленный в нижней части неподвижной станины. В верхней части станины индикатор 8 и шпиндельный узел 7, в котором имеется наконечник с алмазным конусом 6 (с углом при

вершине 120°) или со стальным шариком. На индикаторе 8 нанесены две шкалы (черная и красная) и имеются две стрелки — большая (указатель твердости), вращающаяся по шкале, и маленькая, предназначенная для контроля предварительного нагружения, сообщаемого вращением маховика 3. Поворотом маховика 3 по часовой стрелке столик 4 поднимают таким образом, чтобы наконечник мог вдавливаться в поверхность образца.

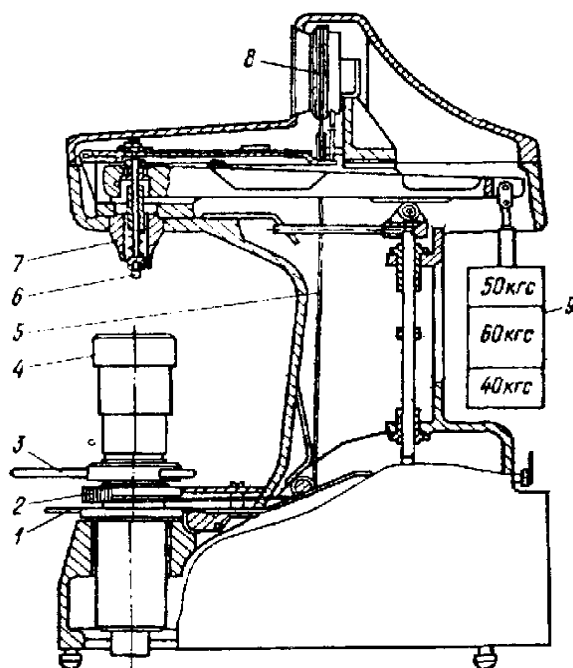


Рисунок 3.3 - Схема прибора измерению твердости по Роквеллу

При дальнейшем подъеме столика начинают вращаться стрелки на индикаторе. Подъем столика продолжают до тех пор, пока малая стрелка не примет вертикального положения (красная точка на индикаторе). Это означает, что наконечник вдавился в образец под действием предварительной нагрузки, равной $98,07\text{ Н}$ (10 кгс). Предварительное погружение проводят для того, чтобы исключить влияние упругой деформации и шероховатости поверхности образца на результаты измерений.

Когда образец, получит предварительную нагрузку, равную $98,07\text{ Н}$ или 10 кгс , большая стрелка на индикаторе примет вертикальное или близкое к нему положение. Для обеспечения точности измерения необходимо, чтобы большая стрелка совпала с нулем на черной шкале индикатора. Если большая стрелка не совпадает с нулем, не меняя предварительное нагружение и, следовательно, не вращая маховик, барабаном 2 через тросик 5 поворачивают шкалу (круг) индикатора таким образом, чтобы ноль на черной шкале индикатора совпал с большой стрелкой. Отклонение стрелки от вертикали допускается в пределах ± 5 единиц шкалы. Клавишей 1 включают механизма нагружения основной нагрузки, определяемой грузом 9. Один груз на рычаге сообщает образцу дополнительную нагрузку $490,3\text{ Н}$ (50 кгс), следовательно, общая нагрузка составит $588,4\text{ Н}$ (60 кгс), два груза — $882,6\text{ Н}$ (100 кгс) при общей нагрузке

980,7 Н (100 кгс), три груза — 1373 Н (140 кгс) при общей нагрузке 1471 Н (150 кгс). На приборе указана общая нагрузка. При нагружении большая стрелка перемещается по шкале влево, против часовой стрелки. Время приложения основной нагрузки 5-7 с. Стрелка возвращается в обратную сторону автоматически при снятии основной нагрузки (предварительная нагрузка остается). Цифра, которую указывает на шкале индикатора большая стрелка, является показателем твердости по Роквеллу. Записав эту цифру, поворачивают маховик против часовой стрелки, опускают столик прибора с образцом (изделием) и снимают тем самым предварительную нагрузку.

Для каждой детали рекомендуется проводить не менее трех испытаний. С помощью прибора измеряют глубину отпечатка алмазного конуса (стального шарика) или, точнее, разность между глубинами отпечатков, полученных от вдавливания наконечника под действием основной и предварительной нагрузок. Твердость по Роквеллу возрастает с увеличением твердости материала, что позволяет сравнивать показатели твердости по Роквеллу и по Бринеллю. Твердость по Роквеллу не имеет той размерности и того физического смысла, который имеет твердость по Бринеллю. Однако показатель твердости по Роквеллу можно пересчитать на показатель твердости по Бринеллю с помощью диаграмм или таблиц, в результате которых твердость по Роквеллу измеряют, применяя следующие шкалы: А, В, С, D, E, F, G, H, K при температуре 20 °С.

При внедрении в поверхность образца алмазного конуса следует пользоваться шкалами А, С, D, а при внедрении стального сферического наконечника — шкалами В, E, F, G, H, K. Алмазный конусный наконечник типа НК по ГОСТ 9377-81 имеет угол при вершине 120°, радиус сферической части 0,2 мм. Номинальный диаметр шариков 1,588 мм (шкалы В, F, G) и 3,175 мм (шкалы E, H, K). Приложения усилий приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Приложения усилий при намерении твердости

Шкала твердости	Единица измерения	Предварительное усилие F ₀	Основное усилие F ₁	Общее усилие F	Диапазон измерений, ед. твердости
A	HRA	98,07(10)	490,3 (50)	588,4 (60)	20-88
B	HRB	98,07 (10)	882,6 (90)	980,7(100)	20-100
C	HRC	98,07 (10)	1373,0(140)	1471,0 (150)	20-70
D	HRD	98,07 (10)	882,6 (90)	980,7(100)	40-77
E	HRE	98,07 (10)	882,6 (90)	980,7(100)	70-100
F	HRF	98,07(10)	490,3 (50)	588,4 (60)	60-100
G	HRG	98,07(10)	1373,0 (140)	1471,0(150)	30-94
H	HRH	98,07 (10)	490,3 (50)	588,4(60)	80-100
K	HRK	98,07 (10)	1373,0 (140)	1471,0(150)	40-100

Твердость по Роквеллу обозначают символом HR с указанием шкалы твердости, которому предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр. Например: 72,5 HRG — твердость по Роквеллу 72,5 единиц по шкале G.

Изменяя нагрузки, методом Роквелла можно производить измерения твердости в очень широком диапазоне. Кроме того, после измерений на образцах остается незначительный след, практически не влияющий на его товарный вид.

Измеряя твердость по Бринеллю, заранее учитывают, что на образце останутся визуально заметные лунки. Но в том и другом случае на чертеже указывают желательное место замеров твердости.

Методом Роквелла можно измерять твердость закаленной или низкоотпущенной стали (твердостью свыше 450 НВ), т. е. в условиях, когда вдавливание стального шарика (на приборах Бринелля или Роквелла) в твердый материал может вызвать деформацию стального или скол твердосплавного шариков, что даст искаженные результаты.

Можно измерить поверхности тонких слоев, но толщиной более 0,5 мм (цементированные или азотированные изделия). На приборе Роквелла следует измерять очень твердые материалы (более 70 HRC) алмазным конусом при общей нагрузке 588,4 Н (60 кгс). Твердость цветных металлов, мягких чугунов и стали, изделий толщиной 0,8-2 мм невозможно точно измерить на приборе Бринелля. В этих случаях используют прибор Роквелла и стальной шарик с нагрузкой 980,7 Н (100 кгс).

Твердость следует измерять не менее чем в трех точках (особенно алмазным конусом), т. е. не менее трех раз на одном образце. Для определения твердости по Роквеллу требуется меньше времени (30—60 с), чем по Бринеллю, причем результат измерения виден на шкале (указан стрелкой). При измерении твердости по Роквеллу остается меньший отпечаток на поверхности детали. Твердость очень тонких слоев металла (толщиной менее 0,3 мм) при нагрузках 588,4 и 1471 Н (60 и 150 кгс) измерять нельзя, так как алмазный конус проникает на глубину, превышающую толщину этих слоев. Вместе с тем с увеличением твердости измеряемого материала глубина отпечатка уменьшается, вследствие чего снижается точность измерения (особенно металлов твердостью более 60 HRC). Для этих целей иногда применяют приборы типа суперроквелл (тип ТРС) по ГОСТ 22975-78 или Виккерс (тип ТВ) по ГОСТ 2999-75, с помощью которых измеряют твердость при меньшей нагрузке и с меньшей глубиной вдавливания. Предварительная нагрузка при этом составляет 29,42 Н (3 кгс). Каждое деление шкалы индикатора такого прибора соответствует глубине вдавливания, равной 1 мкм. Поэтому чувствительность данного прибора заметно выше.

3 Контрольные вопросы

- 1 Охарактеризуйте основные методы измерения твердости.
- 2 Почему для измерения твердости по Бринеллю стараются выбрать максимальные диаметры шарика и нагрузку?
- 3 Почему число твердости НВ не зависит от нагрузки?
- 4 Почему в заводских условиях чаще используют методы Бринелля и Роквелла, а в исследовательских - Виккерса?

- 5 По какому методу измерения можно измерить твердость криволинейной поверхности?
- 6 Как связано число твердости по Роквеллу с глубиной вдавливания?
- 7 Из каких соображений выбирают индентор и величину нагрузки при измерении твердости по Роквеллу?
- 8 Какова размерность числа твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу?
- 9 Определите твердость выданного преподавателем образца и укажите вид сплава.

Практическое занятие № 4. Основы микрокристаллического анализа металлов и сплавов

1 Цель занятия

- 1.1 Изучить основные методы исследования микроструктуры металлов.
- 1.2 Изучить устройство оптического микроскопа.
- 1.3 Изучить устройство электронного микроскопа.
- 1.4 Изучить устройство проекционного рентгеновского микроскопа.

2 Теоретическое введение

Микроанализом называется исследование внутреннего строения металлов и сплавов с помощью оптического микроскопа при увеличении от 50 до 1500 раз и электронного от 5000 до 60000 раз.

Внутреннее строение, изучаемое при помощи микроскопа, называется микроструктурой или структурой. Изучение структуры производится на микрошлифах. В отличие от макрошлифов, размеры микрошлифов ограничены. Наиболее удобен микрошлиф с площадью поперечного сечения 1 см². Шлифовка производится более тщательно, чем макрошлифов и заканчивается полировкой. В качестве абразива используются оксиды хрома, алюминия или алмазная паста. При полировании должны быть удалены все риски и поверхность должна приобрести зеркальный вид. Готовый шлиф промывается водой, спиртом, сушится фильтровальной бумагой. Затем исследуется под микроскопом при увеличении 100 с целью определения качества его изготовления, наличия и распределения неметаллических включений (графита, сульфидов, оксидов и т.д.).

Для выявления структуры шлиф травят, в зависимости от состава сплава и целей исследования в различных реактивах. Чаще всего применяют слабые спиртовые растворы кислот или щелочей.

Микроскопический анализ заключается в исследовании структуры металлов при больших увеличениях с помощью микроскопа. Наблюдаемая структура называется микроструктурой. В зависимости от требуемого увеличения для четкого наблюдения всех фаз, их количества, формы и распределения в микроскопах используют:

- 1 Белый свет и обычные оптические системы, меняющиеся комбинацией стеклянных линз и призм (оптическая микроскопия).

2 Электронные лучи или точнее поток электронов, для создания оптических систем, для которых применяют электромагнитные или электростатические линзы (электронная микроскопия).

3 Рентгеновское излучение (рентгенография).

Металлографический оптический микроскоп.

Металлографический микроскоп отличается от биологического или петрографического типом используемого освещения. Поскольку металлы непрозрачны для видимого света, их невозможно исследовать на просвет, поэтому приходится использовать отражение. На рисунке 4.1 показан принцип прибора. Предпочтительней вертикальное освещение. Полированная и протравленная поверхность S металлического образца помещается перпендикулярно оптической оси микроскопа. На поверхность образца через объектив О падает свет, испускаемый источником L. При помощи конденсора С и осветителя / свет фокусируется в пучок, приблизительно параллельный оптической оси микроскопа. Объектив принимает световые лучи, отражающиеся перпендикулярно от поверхности образца. Те лучи, которые отражаются от неровностей поверхности, не попадают в поле объектива. Следовательно, изображение поверхности S образованное при помощи окуляра Е, будет представлять собой большую светлую область, пересеченную темными линиями или усеянную темными точками, которые соответствуют границам зерен, фигурам травления. А также разного рода неровностям поверхности.

Этот метод исследования позволяет фиксировать цветные изображения некоторых составляющих, например, включений, графита и т.д. В микроскопе объектив дает действительное увеличенное изображение объекта. Окуляр дополнительно увеличивает это изображение на сетчатке глаза, экране или фотографической пластинке.

При определении увеличивающей способности микроскопа обходимо делать различие между применением прибора для визуального или фотографического наблюдения Масштаб изображения является отношением размера изображения к размеру объекта и его значение не зависит от наблюдателя и его положения. Оно определяется углом, под которым наблюдатель видит объект или изображение, и зависит от расположения этого объекта (или изображения) относительно глаза. Принято, что увеличение равно единице когда объект находится в плоскости наилучшего зрения невооруженным глазом.

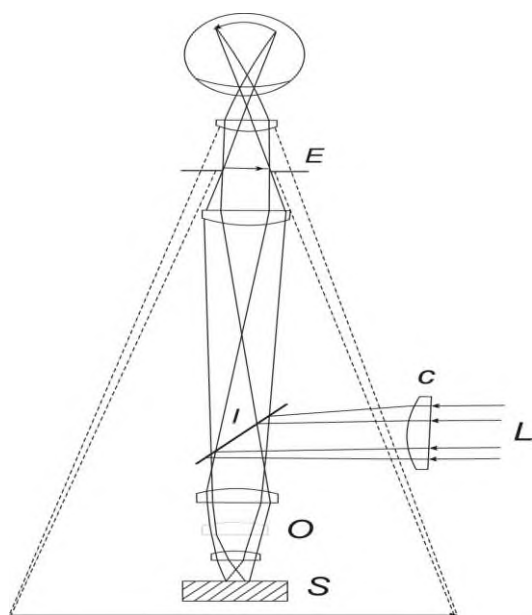


Рисунок 4.1 - Схема работы оптического микроскопа

Для нормального глаза эта плоскость расположена на расстоянии приблизительно 250 мм. Если расстояние между объектом и глазом больше, то объект будет казаться меньшим, и наоборот. Следовательно, если говорить, что микроскоп

Дает увеличение 500, это значит, что действительное изображение объекта даваемое микроскопом и расположенное в плоскости наилучшего зрения, кажется невооруженному глазу в 500 раз большим, чем объект, находящийся на том же расстоянии.

Просвечивающий электронный микроскоп.

Схемы электронных микроскопов были такими же, как у оптического микроскопа с двумя системами линз (рисунок 4.2). Электроны, испускаемые катодом S, ускоряются на пути к аноду разностью потенциалов V. Полученный таким образом электронный пучок после фокусирования конденсором C проходит через объект R (реплику - отпечаток с металлической поверхности, тонкую фольгу и т. д.). Электроны, прошедшие через объект, собираются объективом O; исключение составляют поглощенные и рассеянные электроны, количество которых зависит от рельефа, состава или структурных нарушений в объекте. Затем изображение объекта R проектируется через окуляр P на флуоресцирующий экран или фотографическую пластинку.

Де-Бройль вывел уравнение, которое связывает длину электронов с количеством их движения.

Кинетическая энергия, приобретаемая электроном в вакууме зависит от ускоряющего потенциала V согласно соотношению:

$$eV = \frac{1}{2}mv^2.$$

Например, пучок электронов, ускоренный разностью потенциалов 60 кВ.

Имеет длину волны 0,05 А (0,005 нм). При этом теоретическое разрешение должно быть в 100 000 раз больше, чем в случае оптического микроскопа. Однако сферические aberrации, которые наряду с другими ошибками

возникают из-за дефектов полюсных наконечников линз, неизбежно влекут за собой уменьшение апертуры пучка, что ухудшает разрешающую способность

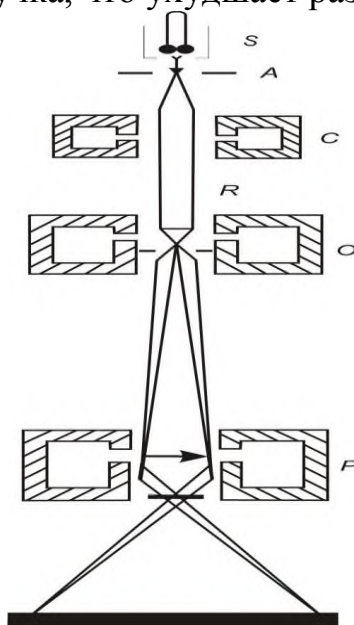


Рисунок 4.2 - Схема просвечивающего электронного микроскопа

Отражательный электронный микроскоп.

В просвечивающих электронных микроскопах невозможно наблюдать поверхность массивных образцов. Наиболее простой метод исследования таких образцов заключается в следующем. Их поверхности облучают пучком монохроматических электронов, при этом отраженные электроны формируют изображение этих поверхностей при помощи электронно-оптической системы, идентичной просвечивающему электронному микроскопу. С точки зрения оптики электроны, ударяющиеся о поверхность объекта не отражаются, а рассеиваются. Формирование изображения поверхности с помощью рассеянных электронов связано с двумя трудностями.

Во-первых, рассеянные электроны не являются монохроматическими, поэтому разрешение ограничено из-за хроматической аберрации объектива.

Во-вторых, электроны рассеиваются во всех направлениях, поэтому в объектив попадает лишь некоторая их часть. Яркость изображения получается низкой, особенно когда уменьшают апертуру для улучшения разрешения.

В отражательном электронном микроскопе (рисунок 4.3) электронный пучок падающий на образец, образует с осью объективной линзы угол $\theta_1 + \theta_2$. Объект получается под углом θ_1 , в то же время его поверхность обычно не перпендикулярна оси объектива, а составляет с ней угол θ_2 .

Эти углы выбирают таким образом, чтобы можно было получить максимальное рассеяние в направлении объектива и уменьшить разброс в скоростях электронов, с целью увеличения разрешения.

Угол зрения $\theta_2 \neq 90^\circ$ значительно искажает изображение, однако, установив после проекционной линзы асимметричную систему, можно получить коррекцию изображения, аналогичную коррекции изображения объективом киноаппарата, и таким образом значительно уменьшить искажения.

Основным недостатком отражательного электронного микроскопа является низкая интенсивность изображения. Тем не менее этот прибор имеет следующие преимущества, по сравнению с оптическим микроскопом: - чувствительность к микрорельефу аналогична чувствительности интерференционного и фазоконтрастного методов. Предел разрешения в десять раз лучше, чем у оптического микроскопа и составляет 30 нм.

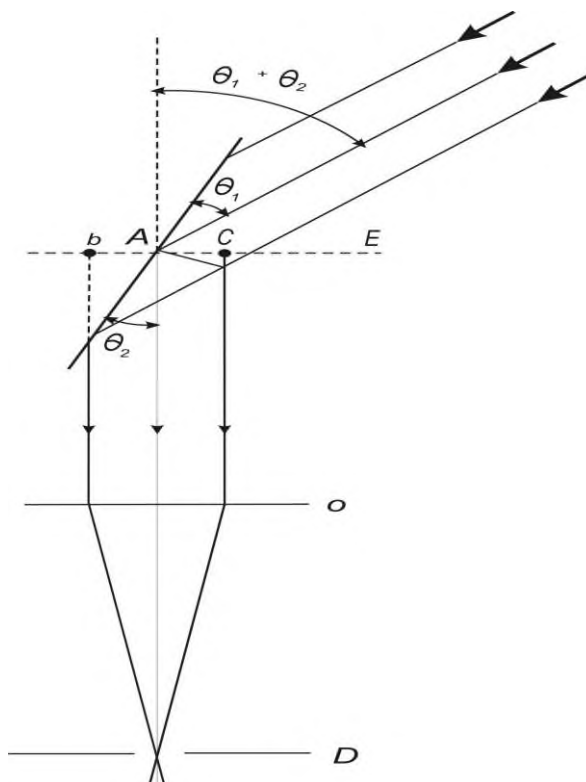


Рисунок 4.3 - Схема отражательного электронного микроскопа

Проекционный рентгеновский микроскоп.

Если объект В поместить вблизи источника рентгеновских лучей А. на некотором расстоянии от пленки, то на пленке получится увеличенное изображение объекта.

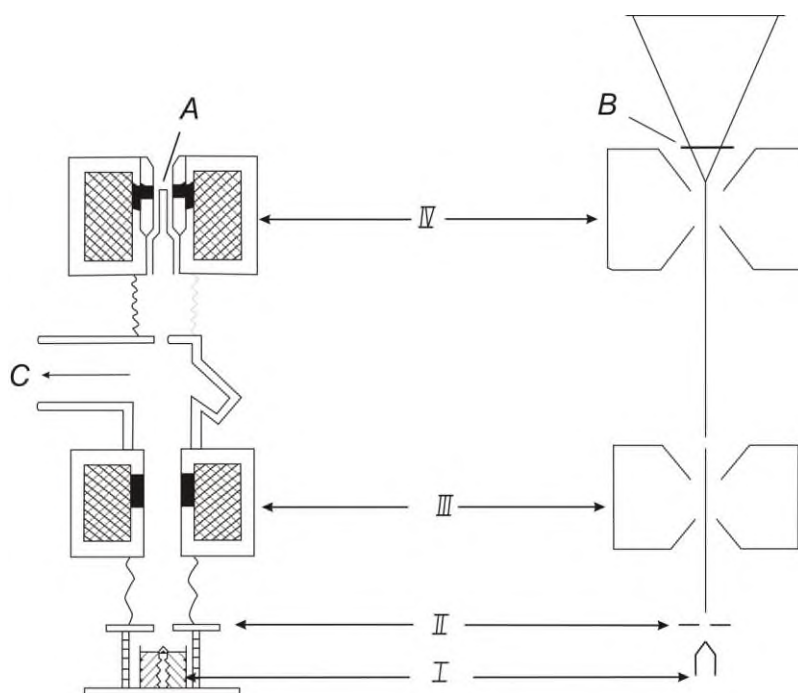


Рисунок 4.4 - Схема проекционного рентгеновского микроскопа

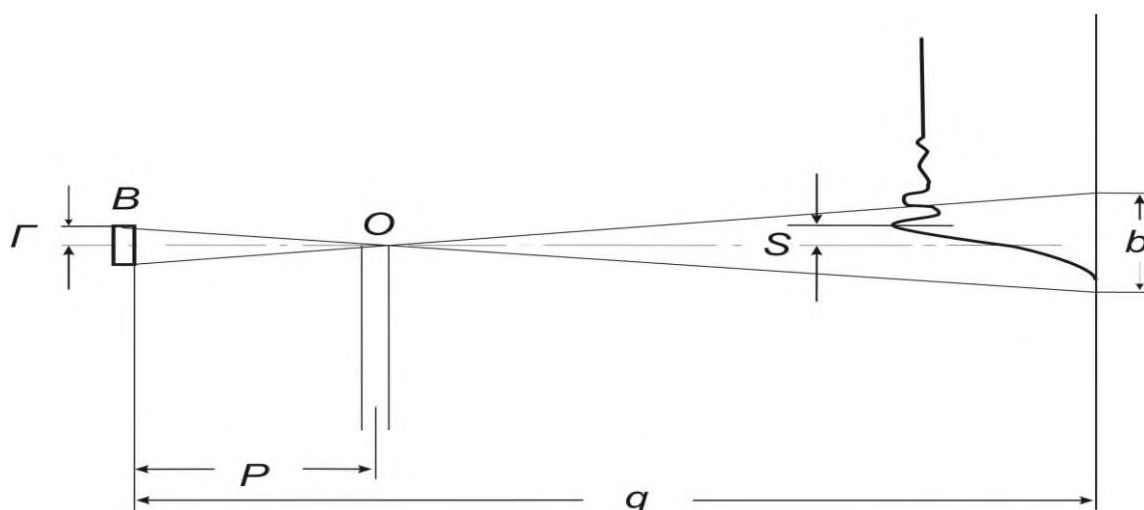


Рисунок 4.5 - Схема формирования изображения рентгеновского микроскопа

Разрешение такого прибора зависит как от полутени источника, так и от дифракции Френеля. На рисунке 4.5 показано, как формируется изображение и как дифракция и образование вуали ограничивают разрешение. Если объект находится на расстоянии p от источника, а расстояние между источником и проекционной плоскостью равно q , то увеличение фотографического изображения:

$$M = p / q,$$

а минимальное разрешаемое расстояние в плоскости приблизительно равно $(r/\lambda)^{1/2}$. Таким образом разрешение определяется размером источника и невозможно получить разрешение, которое было бы меньше размера источника.

Поэтому, при конструировании рентгеновских микроскопов, необходимо стремиться к тому, чтобы источник рентгеновских лучей был точечным, но чтобы при этом интенсивность излучения была достаточной для получения увеличенного изображения, в течение приемлемого времени экспозиции.

3 Контрольные вопросы

- 1 Объясните, каким образом микроанализ позволяет выявить границы зерна.
- 2 Опишите технологию изготовления микрошлифов.
- 3 Опишите принцип работы оптического микроскопа.
- 4 Объяснить, почему микроанализ нетравленного шлифа позволяет лучше определить форму, размеры и расположение неметаллических включений.
- 5 Объясните почему разрешающая способность электронного микроскопа на порядок выше оптического.

Практическое занятие № 5. Свойства и структура микрокристаллического строения чугунов и сталей

1 Цель занятия

- 1.1 Рассмотреть основы микрокристаллического строения чугунов и сталей.
- 1.2 Изучить микроструктуры чугунов.
- 1.3 Изучить микроструктуры сталей.

2 Теоретическое введение

По химическому составу чугун отличается от стали более высоким содержанием углерода и постоянных примесей - кремния и марганца. Он широко применяется в качестве литейного материала. Чугун обладает более низкими механическими свойствами, чем сталь. Однако его технологические свойства (литейные, способность графита приобретать различную форму, в зависимости от условий кристаллизации, способность приобретать различную структуру, в условиях различного охлаждения, хорошая обрабатываемость, высокая износостойчивость, антифрикционные свойства) делают чугун конструкционным материалом с уникальным комплексом свойств, пригодным для использования в различных областях техники.

По форме углерода чугун классифицируют на следующие виды.

- Серый чугун с пластинчатым графитом (СЧПГ) - графит находится в основном в свободном состоянии.

- Белый чугун (БЧ) - чугун, в котором весь углерод находится в химически связанном состоянии в виде цементита, имеет матово-белый излом. БЧ обладает высокой твердостью, хрупкостью, практически не поддается обработке режущим инструментом. Широко применяется для изготовления

деталей дробильного оборудования (брони шаровых мельниц, мелющие шары), лопастей шнеков.

- Отбеленный чугун (половинчатый) - внешняя часть состоит из БЧ, а внутренняя из СЧ.

- Ковкий чугун (КЧ) - чугун с хлопьевидным графитом, получается в результате отжига белого чугуна. Обладает высокой прочностью и пластичностью. Изготавливают детали, работающие при ударных и вибрационных нагрузках.

- Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) используется для деталей ответственного назначения, работающих при высоких статических, ударных и циклических нагрузках под воздействием агрессивных сред. Получение шаровидного графита достигается введением в расплав сфероидизирующих модификаторов.

- Чугун с вермикулярным (червеобразным) графитом (ЧВГ). Занимает промежуточное положение между чугунами с пластинчатым и шаровидным графитом, сочетает хорошие литейные свойства с более высокими, чем у серого чугуна, прочностью, пластичностью и ударной вязкостью. Получают обработкой расплава РЗМ-содержащими лигатурами (Се, Y).

В зависимости от того в каком состоянии находится углерод, чугуны подразделяются на две группы:

1) чугуны в которых весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита или других карбидов;

2) чугуны в котором весь углерод или часть его находится в свободном состоянии в виде графита.

Первой группе чугунов относятся белые чугуны. Излом такого чугуна будет белый, блестящий. Белые чугуны очень хрупки и тверды, плохо поддаются механической обработке режущим инструментом. Чисто белые чугуны в качестве конструкционного материала не используются. Они обычно идут на передел в сталь или используются для получения ковкого чугуна.

Структура белых чугунов соответствует диаграмме равновесного состояния «железо -цементит» образуется она в результате ускоренного охлаждения железоуглеродистых сплавов содержащих более 2,14% С при литье. По структуре белые чугуны делятся на (рисунок 5.1):

- доэвтектические, содержащие от 2,14 до 4,3% углерода Структура состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита;

- эвтектический, содержащий 4,3% углерода. Структура состоит из ледебурита;

- заэвтектические, содержащие от 4,3 до 6,67% углерода. Структура состоит из первичного цементита и ледебурита. Структура чугунов отличается от структуры стали наличием ледебурита или первичного цементита и ледебурита.



Доэвтектический белый чугун
(3,25% C; 1,02% Mn; 0,28% Si; 0,025% S; 0,040 % P)



Эвтектический белый чугун
(4,13% C; 2,55% Mn; 0,27% Si; 0,017% S; 0,039 % P)



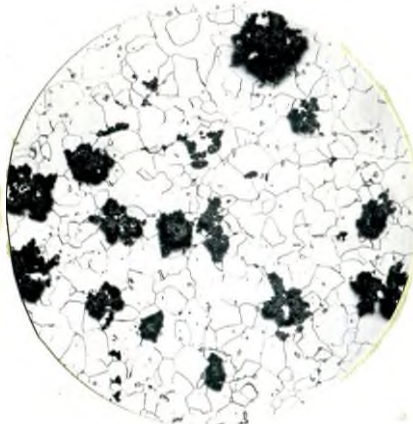
Заэвтектический белый чугун
(4,43% C; 2,72% Mn; 0,19% Si; 0,020% S; 0,131 % P)

Рисунок 5.1 - Микроструктуры белого чугуна (увеличение в 100 раз)

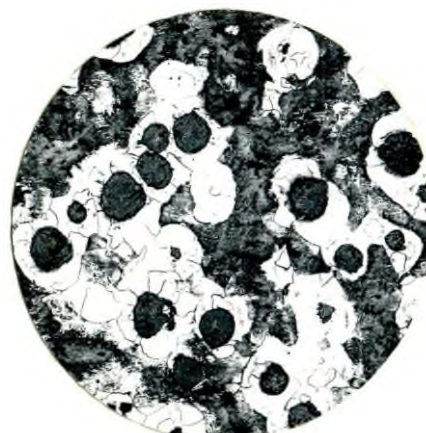
Ко второй группе чугунов относятся серые, ковкие и высокопрочные чугуны. Излом этих чугунов серый или матовый. В их структуре различают металлическую основу (металлическую матрицу) и форму выделений графита. Отличаются они друг от друга только формой выделений графита. В серых чугунах графит выделяется в виде пластинок графита; в высокопрочных - в виде шаров; в ковких - в виде хлопьев (рисунок 5.2).



Серый чугун
(3,4% C; 0,83% Mn; 2,54% Si; 0,084% S; 0,340 % P)
Увеличение в 200 раз



Ковкий чугун
(1,75% C; 0,44% Mn; 1,21% Si; 0,040% S; 0,10 % P)
Увеличение в 100 раз



Высокопрочный чугун
(2,43% C; 0,85% Mn; 2,75% Si; 0,016% S; 0,097 % P)
Увеличение в 100 раз

Рисунок 5.2 - Микроструктуры чугуна в зависимости от формы графита

По металлической основе (структуре) все чугуны классифицируются на:

- ферритные - структурой феррита и графита. Количество связанного углерода $C_{связ} \leq 0,025\%$;
- феррито - перлитные со структурой феррита, перлита и графита. Количество связанного углерода $C_{связ}$ от 0,025 до 0,8%;

- перлитные со структурой перлита и графита. Количество связанного углерода $C_{\text{связ}} = 0,8\%$.



Серый чугун
(3,4% C; 0,83% Mn; 2,54% Si; 0,084% S; 0,340 % P)
(графит на ферритной основе)



Серый чугун
(3,34% C; 0,65% Mn; 2,73% Si; 0,055% S; 0,137 % P)
(графит на феррито-перлитной основе)



Серый чугун
(3,40% C; 0,65% Mn; 1,95% Si; 0,119% S; 0,180 % P)
(графит на перлитной основе)

Рисунок 5.3 - Микроструктуры серого чугуна на разной металлической основе

Структура чугунов второй группы отличается от структуры стали только наличием свободного графита.

По структуре в равновесном состоянии стали делятся следующим образом (рисунок 5.4).

Доэвтектоидные, содержащие от 0,025 до 0,8 % углерода. Структура этих сталей состоит из феррита - светлые пятна и перлита - темные пятна. Количество перлита изменяется пропорционально содержанию углерода.

Эвтектоидная, содержащая 0,8 % углерода. Структура этой стали состоит из перлита. Зерна перлита состоят из пластинок феррита и цементита.

Заэвтектоидные, содержащие от 0,8 до 2 % углерода. Структура этих сталей состоит из перлита и вторичного цементита. При медленном охлаждении вторичный цементит выделяется по границам зерен аустенита, образуя твердую и хрупкую оболочку, видимую под микроскопом в виде сетки. Цементит, также как и феррит, при травлении раствором HNO_3 сохраняет белый цвет.



Пластинчатый перлит
(C=0,45%, ×500)

Зернистый перлит
(C = 0,8%, ×500)

Перлит и цементит
(C=1,2 %, ×150)

Рисунок 5.4 - Микроструктуры стали в равновесном состоянии

Выделение вторичного цементита по границам зерен аустенита и цементита перлита в виде пластинок (игл) нежелательно, так как такая структура обладает повышенной хрупкостью, плохо обрабатывается резанием и после окончательной термообработки готовые детали будут иметь пониженные механические свойства, главным образом, низкую пластичность и ударную вязкость. Поэтому, оптимальной является структура с цементитом в виде мелких зерен округлой формы (зернистый перлит). Структуру зернистого перлита получают путем специальной термической обработки. Структура зернистого перлита является исходной структурой для инструментальных сталей.

Наиболее характерными структурами стали после термической обработки являются: перлит, мартенсит, сорбит, троостит аустенит и бейнит они представлены на рисунке 5.5.



Мартенсит
(закалка 1050 °С, ×500)

Мартенсит + троостит
(закалка 950 °С, охлаждение в масле 130°С, × 150)

Сорбит
(закалка 850 °С, отпуск 600 °С, × 150)

Рисунок 5.5 - Микроструктуры стали после термической обработки, на примере стали 20ХГ (C=0,24%, Cr = 2,4%; Mn = 1,7%)

Мартенсит обладает самой высокой твердостью наряду со значительной хрупкостью. Он имеет пластинчатое строение, но в плоскости микрошлифа пластинки приобретают вид игл, поэтому мартенсит часто называют игольчатым.

Троостит является высокодисперсным перлитом. Последний, в свою очередь, представляет собой эвтектоидную смесь феррита и цементита. Троостит образуется в результате распада аустенита при температурах ниже 600 °С.

Сорбит - тонкая (дисперсная) механическая смесь феррита и цементита. Сталь, в которой доминирует структура сорбита, имеет твердость 30-40 HRC₃. Такая сталь обладает высокой прочностью и пластичностью.

Перлит, сорбит и троостит - структуры, имеющие одинаковую природу (феррит + цементит) и отличающиеся лишь степенью дисперсности этих составляющих.

3 Контрольные вопросы

- 1 Объясните механизм графитизации серых чугунов.
- 2 Приведите классификацию чугуна по форме углерода.
- 3 Какие микроструктуры имеет серый и белый чугун?
- 4 Приведите классификацию стали по структуре в равновесном состоянии.
- 5 Какие микроструктуры имеет стали в равновесном состоянии и после термической обработки?
- 6 По выданной структуре чугуна определите его вид и механические свойства.

Практическое занятие № 6. Свойства и структура микрокристаллического строения цветных металлов и сплавов

1 Цель занятия

- 1.1 Рассмотреть основы микрокристаллического строения цветных металлов.
- 1.2 Изучить микроструктуры меди и её сплавов.
- 1.3 Изучить микроструктуры алюминия и его сплавов.

2 Теоретическое введение

Из всего многообразия цветных металлов и сплавов наиболее широкое применения нашли материалы на основе меди, алюминия и их сплавов. Обладая замечательными свойствами, медь в то же время как конструкционный материал не удовлетворяет требованиям машиностроения, поэтому ее легируют, т. е. вводят в ее состав такие металлы, как цинк, олово, алюминий, никель и др., за счет чего улучшаются ее механические и технологические свойства. В зависимости от чистоты медь маркируется буквой М и порядковыми номерами. Наиболее чистая медь М00 содержит 0,01 % примесей

(в сумме); в меди М1, М2, М3 примеси составляют 0,1, 0,3 и 0,5 % соответственно. Хорошо растворимые в твердом состоянии примеси (Al, Ni, Fe, Zn, Cd, Sb) не ухудшают механических свойств меди и ее сплавов. По химическому составу медные сплавы подразделяют на латуни, бронзы и медноникелевые, по технологическому назначению - на деформируемые, используемые для производства полуфабрикатов (проволоки, листа, полос, профиля), и литейные, применяемые для литья изделий.

Микроструктуры меди и ее сплавы представлены на рисунке 3.1.



Рисунок 6.1 - Микроструктуры меди и сплавов на её основе (×500)

Маркировка медных сплавов производится с помощью букв, обозначающих элемент, и цифр, указывающих среднее содержание этого элемента. Приняты обозначения элементов: О - олово, А - алюминий, Ц - цинк, Ф - фосфор, С - свинец, Ж - железо, Н - никель, К - кремний, Мц - марганец.

Маркировка бронз начинается с букв Бр, а латуней - с буквы Л. Например: БрА10Ж4Н4Л обозначает бронзу состава: 10 % Al, 4 % Fe, 4 % Ni, Cu - остальное; ЛЦ38Мц2С2 обозначает латунь состава: 38 % Zn, 2 % Mn, 2 % Pb, Cu - остальное. Буква в конце маркировки ставится для отличия литейных сплавов от деформируемых, если их маркировка совпадает. Содержание цинка в обозначении марки латуни не указывается. Для того чтобы определить его содержание цинка, необходимо от 100 % вычесть процентное содержание меди и других химических элементов, входящих в данную латунь.

Латуни сплавы меди с цинком и другими компонентами, они содержат кроме цинка другие легирующие элементы, называются сложными, или специальными, и именуются по вводимым, кроме цинка, легирующим компонентам.

Содержание цинка в кристаллической решетке может достигать 39%. Латуни, состоящие из меди и цинка, называют простыми. Они могут быть однородными (до 39% цинка) и двухфазными (более 39% цинка).

Специальные (многокомпонентные) латуни содержат и другие легирующие элементы: алюминий (Al), никель (Ni), Марганец (Mn), олово (Sn) и др. Алюминий, кремний, марганец и никель повышают механические свойства

латуни и сопротивление коррозии, а свинец улучшает обрабатываемость резанием.

Области применения и механические свойства наиболее массовых марок латуней представлены в таблице 6.1

Таблица 6.1 - Области применения и механические свойства латуней

Сплав	σ_b , МПа	δ , %	Назначение
Деформируемые			
ЛАЖ60-1-1	450	8	Тубы, прутки
ЛЖМц59-1-1	450	10	Полосы, прутки, мелкие поковки
ЛС59-1	400	6	Мелкие поковки
Литейные			
ЛЦ40С	215	12	Втулки, сепараторы
ЛЦ40Мц5Ж	440	10	Винты, лопасти
ЛЦ30А3	300	12	Коррозионно-стойкие детали

По сравнению с медью латуни обладают большей прочностью, коррозионной стойкостью и упругостью. Они обрабатываются литьем, давлением и резанием. По технологическому назначению их подразделяют на обрабатываемые давлением и литейные.

Бронзы - это сплавы на основе меди, в которых в качестве добавок используют олово, алюминий, бериллий, кремний, свинец, хром и другие элементы. Как и латуни, бронзы подразделяют на литейные и обрабатываемые давлением. В обозначении марок бронз принята та же система, что и у латуней, только в начале проставляют буквы Бр, означающие - «бронза».

Области применения и механические свойства наиболее массовых марок бронз представлены в таблице 6.2

Таблица 6.2 - Области применения и механические свойства бронз

Сплав	σ_b , МПа	δ , %	Назначение
Деформируемые			
БрОФ6,5-0,4	400	5	Арматура
БрОЦ4-3	330	4	Пружины
БрОЦС4-4-2,5	350	2	Антифрикционные детали
Литейные			
ЛЦ40С	200	8	Арматура
ЛЦ40Мц5Ж	175	4	Вкладыши подшипников
ЛЦ30А3	150	5	Антифрикционные детали

Химический состав и механические свойства оловянных литейных бронз регламентированы ГОСТ 613-79. Эти бронзы получают литьем в песчаные формы или в кокиль.

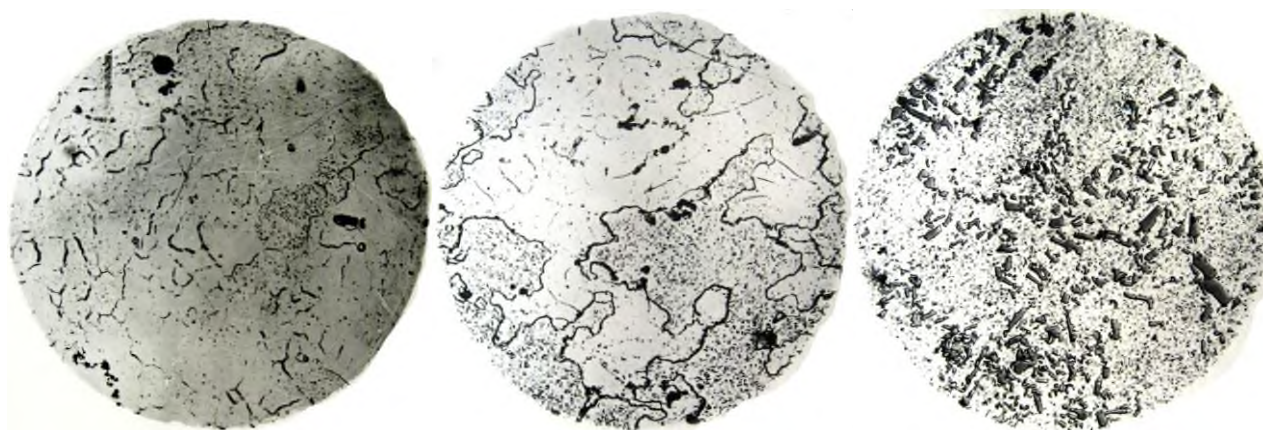
Алюминий - серебристо-белый пластичный металл. Механические свойства алюминия невысоки: сопротивление на разрыв 50-90 МПа (5-9 кгс/мм²), относительное удлинение 25-45 %, твердость 13-28 НВ. Высокая пластичность (максимальная пластичность достигается отжигом при

температурах 350-410 °С) этого металла позволяет прокатывать его в очень тонкие листы (фольга имеет толщину до 0,003 мм).

Исходным материалом для получения алюминиевых сплавов является первичный алюминий (иногда с добавками вторичного - лома).

Первичный алюминий нормируется ГОСТ 11069-74. Этот стандарт распространяется на алюминий, изготавливаемый в форме чушек, слитков, катанки и ленты. Наибольшее распространение получили такие сплавы как силумин и дюралюминий.

Микроструктуры алюминия и сплавов на её основе представлены на рисунке 3.2.



Алюминий

Дюралюминий

Силумин

Рисунок 6.2 - Микроструктуры алюминия и сплавов на её основе ($\times 500$)

Выделяют следующие основные сплавы на основе алюминия:

- алюминиевые сплавы системы алюминий-медь-магний и алюминий-медь-марганец;
- алюминиевые сплавы системы алюминий-марганец;
- алюминиевые сплавы системы алюминий-магний;
- алюминиевые сплавы системы алюминий-магний-кремний;
- алюминиевые сплавы системы алюминий-цинк-магний;
- алюминиевые сплавы, предназначенные для изготовления проволоки при холодной высадке;
- алюминиевые сплавы, предназначенные для изготовления сварочной проволоки.

Маркировка сплавов на основе алюминия означает: А - технический алюминий; Д - дюралюминий; АК - алюминиевый сплав, ковкий; АВ - авиаль; В - высокопрочный алюминиевый сплав; АЛ - литейный алюминиевый сплав; АМг - алюминево-магниевый сплав; АМц - алюминево-марганцевый сплав; САП - спечённые алюминиевые порошки; САС - спечённые алюминиевые сплавы.

Вслед за буквами идёт номер марки сплава. За номером марки сплава ставится буква, обозначающая состояние сплава: М - сплав после отжига (мягкий); Т - после закалки и естественного старения; А - плакированный

(нанесён чистый слой алюминия); Н - нагартованный;
П - полунагартованный.

3 Контрольные вопросы

1 Приведите классификацию сплавов на основе меди.

2 Изобразите микроструктуру меди и её сплавов.

3 Приведите классификацию сплавов на основе алюминия.

4 Изобразите микроструктуру алюминия и его сплавов.

5 Расшифруйте маркировку сплавов на основе меди: ЛЖМц59-1-1; ЛС59-1; ЛЦ30А3; ЛЦ40Мц5Ж; ЛАЖ60-1-1; БрА9Мц2Л; БрА10Мц2Л; БрА10Ж3Мц2; БрА10Ж4Н4Л; БРА11Ж6Н6 БрА7Мц15Ж3Н2Ц2

6 Расшифруйте маркировку сплавов на основе алюминия: Д16, 1160 (AlCuMg1, 2024); Д16ч (212ч); В65; 1165; Д18, 1180 (AlCu2,5Mg, 2117); Д19; 1190; Д19ч; АК4; 1140; АК4-1; 1141; АК4-1ч; 2618; 1201 (AlCuMn, 2219); АК6, 1360, АК8, 1380 (AlCu4SiMg, 2014); АМг0,5, 1505; АМг1, 1510 (AlMg1, 5005); АМг1,5 (AlMn1,5, 5050); АМг2, 1520 (AlMg2, 5251); АМг2,5 (AlMn2,5, 5052); АМг3, 1530 (AlSn3, 5754); АМг3,5 (AlMg3,5, 5154); АМг4,0, 1540 (AlMg4, 5086); АМг4,5 (AlMg4,5, 5083); (AlMg5Cr, 5056); АМг5, 1550; АМг6СвА99, СвА97, СвА95Т, СвА5, СвАМц, СвАМг3, СвАМг5, Св1557, Св1577пч, СвАМгб, СвАМгб3, СвАМг61, СвАК5, СвАКЮ, Св1201.

Практическое занятие №7. Изучение диаграммы «железо-цементит»

1 Цель занятия

1.1 Рассмотреть механизм построения диаграмм «железо-цементит для разных сплавов».

1.2 Изучить основные структурные составляющие диаграммы «железо-цементит».

1.3 Изучить основы построения кривых охлаждения диаграммы «железо-цементит».

1.4 Научится строить кривые охлаждения.

2 Теоретическое введение

Диаграмма состояния - это графическое изображение фазового состояния сплавов в зависимости от температуры и концентрации компонентов в условиях равновесия.

В сплавах системы Fe-Fe₃C встречаются следующие фазы: жидкий раствор, твердые растворы на основе различных кристаллических модификаций железа, химическое соединение Fe₃C (цементит). На рисунке 7.1 представлена диаграмма состояния железо-цементит в фазовом виде.

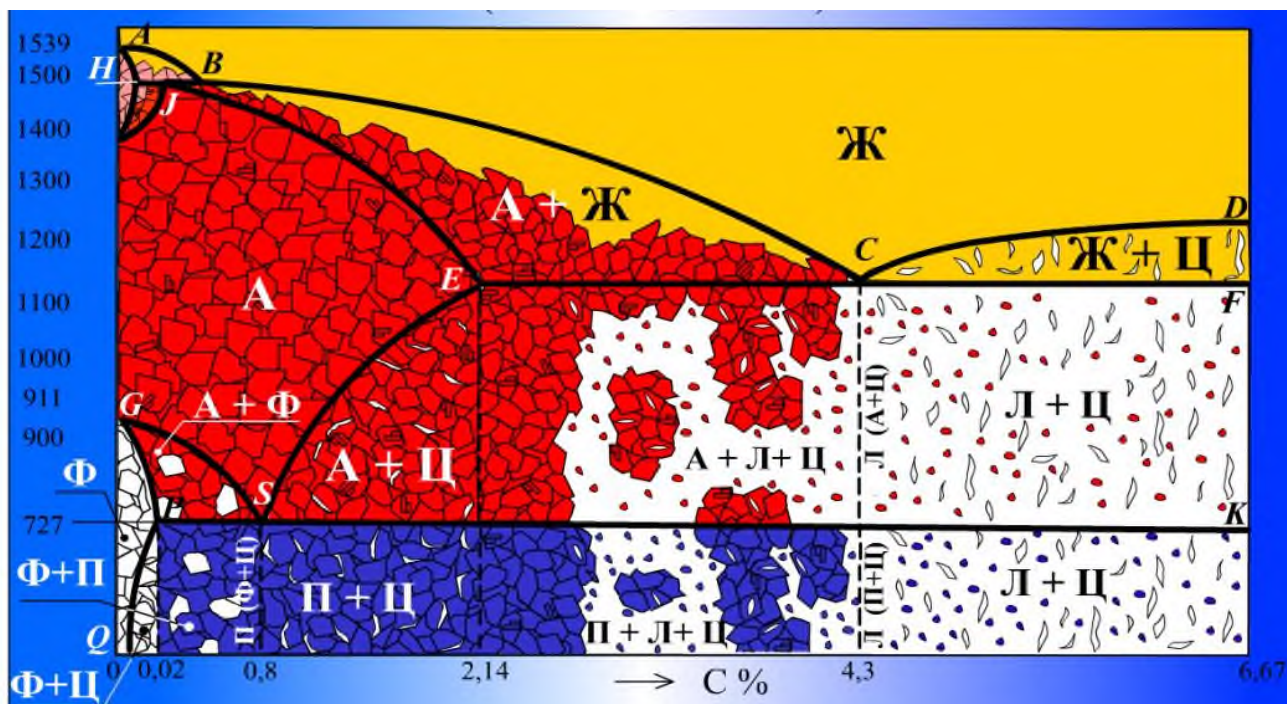


Рисунок 7.1 - Фазовая диаграмма состояния железо-цементит

Жидкая фаза представляет собой неограниченный раствор железа и углерода, распространяющийся выше линии ликвидус ACD - от 0 до 6.67 %C.

Твердые растворы. В данной системе имеются твердые растворы железа с углеродом на основе двух кристаллических модификаций железа. Они являются твердыми растворами внедрения, т.е. атомы железа занимают узлы пространственной решетки, а атомы углерода размещаются в междуузлиях.

Аустенит - твёрдый раствор внедрения углерода в γ -железе (высокотемпературная гранецентрированная модификация железа и его сплавов). Аустенит имеет твердость 200...250 НВ, пластичен (относительное удлинение - $\delta = 40...50$ %), парамагнитен. Максимальное содержание углерода 2,14 % при 1147°C и 0,8 % при 727°C.

Феррит - твердый раствор внедрения углерода в α -железе. Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок (твердость - 130 НВ, временное сопротивление - $\sigma_v = 300$ МПа) и пластичен (относительное удлинение - $\delta = 50$ %), магнитен до 768° С. Различают низкотемпературный феррит с предельной растворимостью углерода 0,02 % при температуре 727° С (точка Р) и высокотемпературный δ -феррит с предельной растворимостью углерода 0,1 % при температуре 1499° С (точка J).

Цементит (Fe_3C) - химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержит 6,67 % углерода. При низких температурах цементит слабо ферромагнитен, магнитные свойства теряет при температуре около 210° С. Цементит имеет высокую твердость (более 800 НВ, легко царапает стекло), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность.

Цементит бывает первичным, вторичным и третичным ($Ц_I$, $Ц_{II}$, $Ц_{III}$). Цементит первичный выделяется из жидкости, цементит вторичный выделяется

из аустенита, цементит третичный выделяется из феррита при охлаждении сплавов.

Перлит (П) - механическая смесь (эвтектоид) феррита и цементита, образующаяся при эвтектоидном распаде аустенита. В перлите содержится 0,8 % С. Перлит обладает высокими прочностью ($\sigma_b = 800$ МПа), твердостью (200 НВ) и повышает механические свойства сплава. Структура перлита - чередующиеся пластинки феррита и цементита.

Ледебурит (Л) - механическая смесь аустенита (или перлита) и цементита, образуется при кристаллизации сплава с 4,3% углерода при температуре 1147°C. При температурах ниже 727°C аустенит в ледебурите превращается в перлит, и после охлаждения ледебурит представляет собой смесь перлита с цементитом. Ледебурит - эвтектика. Он тверд (700 НВ). Имеет сотовое или пластинчатое строение и содержится во всех белых чугунах.

Все линии диаграммы можно разделить на следующие группы: линии **ликвидус** - начало затвердения при охлаждении или конец плавления при нагревании; линии **солидус** - конец затвердевания при охлаждении и начало плавления при нагревании; линии превращения в твердом состоянии. Из них особо выделяются горизонтальные линии (параллельные оси составов), отвечающих невариантному равновесию.

В таблицах 7.1 и 7.2 приведены основные характеристики линий и точек диаграммы.

Таблица 7.1 - Характеристики линий диаграммы

Индекс линий	Температурный интервал, °С	Интервал концентраций (% углерода)	Основная характеристика линии
<i>Линия ликвидуса</i>			
AC	1539 - 1147	0 - 4,3	Линия ликвидус (начало затвердевания аустенита).
CD	1147 - 1600	4,3 - 6,67	Линия ликвидус (начало затвердевания первичного цементита)
<i>Линия солидуса</i>			
AE	1539 - 1147	0 - 2,14	Конец затвердевания аустенита
ECF	1147	2,14 - 6,67	Линия эвтектического равновесия
<i>Линии превращения в твердом состоянии</i>			
SE	727 - 1147	0,8 - 2,14	Линия ограниченной растворимости углерода в аустените. Начало выделения вторичного цементита.
GS	911 - 727	0 - 0,8	Начало аллотропического превращения аустенита в феррит
GP	911 - 727	0 - 0,025	Конец аллотропического превращения (аустенита в феррит)
PSK	727	0,025 - 6,67	Линия эвтектоидного равновесия аустенита, феррита, цементита
PQ	727 - комн.	0,025 - 0,006	Линия выделения третичного цементита

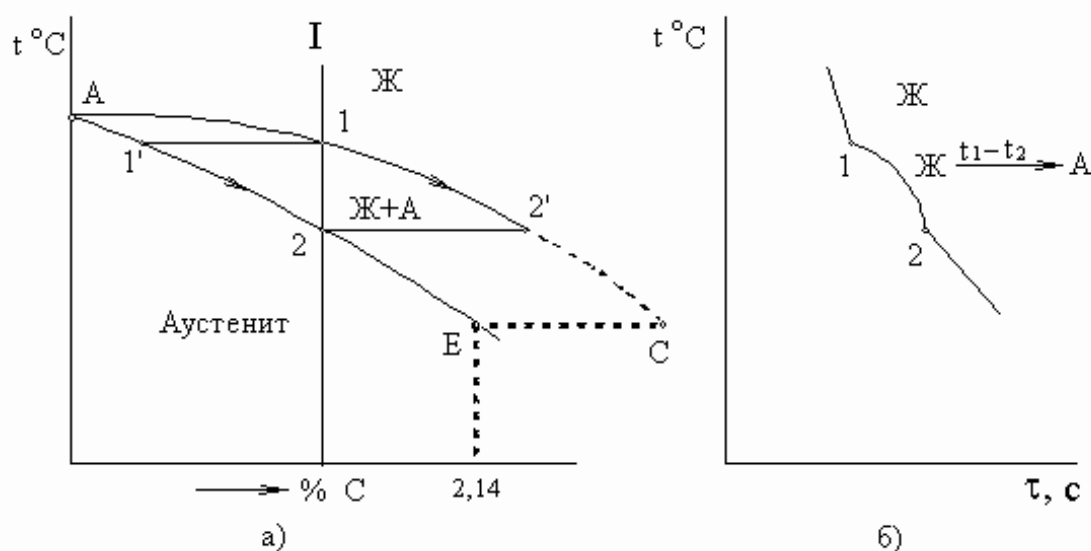
Таблица 7.2 - Характеристики точек диаграммы

Индекс точки	Содержание углерода, %	Температура, °C	Характеристика
A	0	1539	Точка затвердевания жидкого железа
C	4,3	1147	Состав жидкой фазы при эвтектическом равновесии с аустенитом и цементитом
E	2,14	1147	Предельное содержание углерода в аустените. Состав аустенита при эвтектическом равновесии с жидкой фазой и цементитом
S	0,8	727	Состав аустенита при эвтектоидном равновесии с ферритом и цементитом
P	0,025	727	Предельное содержание углерода в феррите. Состав феррита при эвтектоидном равновесии с аустенитом и цементитом
Q	0,006	Комнатная	Предельное содержание углерода в феррите при комнатной температуре

Стаями называются железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода до 2,14 %. Сплавы с большим содержанием углерода (2,14 до 6,67 %) называются чугунами. Границей между сталями и чугунами принято считать проекцию точки E, т.е. точки максимального насыщения аустенита углеродом, от которой начинается линия эвтектического равновесия. В результате первичной кристаллизации стали образуется аустенит (линия AE).

В отличие от сталей структура чугуна характеризуется наличием эвтектики, которая состоит из аустенита и цементита.

Первичная кристаллизация стали представлена на рисунке 7.2 (показан верхний участок упрощенной диаграммы Fe-Fe₃C).



а) первичная кристаллизация сплавов до 2,14 %С (сталей); б) кривая охлаждения сплава 1

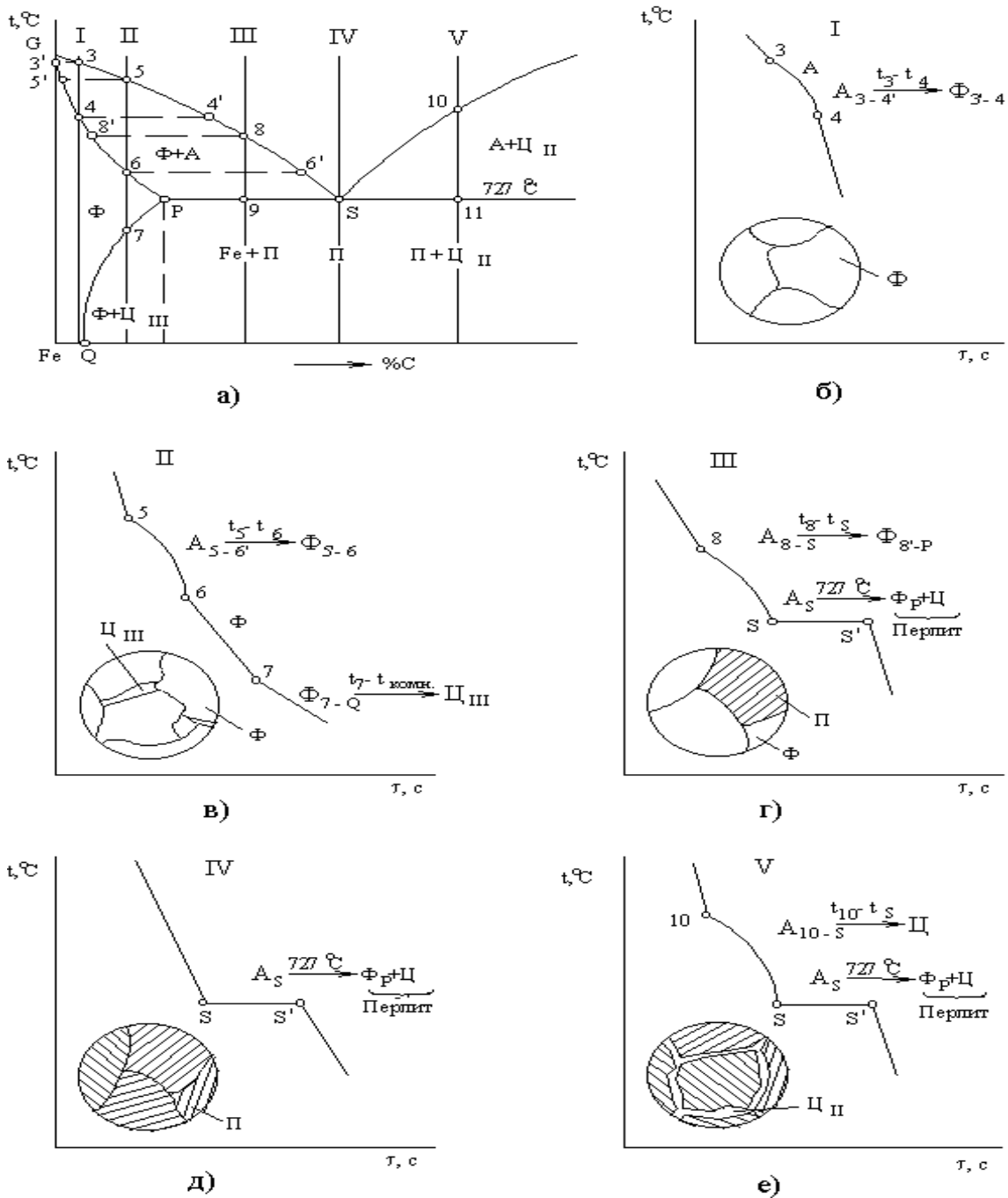
Рисунок 7.2 - Верхний левый участок упрощенной диаграммы состояния железо-цементит

В сталях из жидкой фазы кристаллизуется аустенит. Состав жидкой фазы меняется по проекции линии AC на ось концентраций, твердой фазы по проекции линии AE.

Превращения в твердом состоянии. Окончательное формирование структуры стали происходит в результате превращений аустенита при дальнейшем охлаждении. Основой этого превращения является полиморфизм, связанный с перегруппировкой атомов из ГЦК решетки аустенита в ОЦК решетку феррита, а также изменение растворимости углерода по линии ES в аустените и PQ в феррите. В сплавах с содержанием от 0,025 до 2,14 % C вторичные превращения начинаются при температурах, соответствующих линиям GS и SE и заканчиваются при температуре ниже 727 °C и линии PSK, в результате эвтектоидной реакции.

Сплавы с содержанием углерода менее 0,025 % не испытывают эвтектоидного превращения. Критические точки аустенит- феррит превращения (линия GS) в доэвтектоидных сталях обозначаются так же, как аллотропическое превращение в чистом железе, с индексом A_3 , т.е. при нагреве A_{c3} , т.е. при охлаждении A_{f3} . Выделение цементита из аустенита в заэвтектоидной стали (линия SE) обозначается индексом A_{cm} . При температуре 727 °C (линия PSK) критические точки обозначаются индексом A_1 ; при нагреве A_{c1} ; при охлаждении A_{f1} . Распад аустенита при эвтектоидном превращении по метастабильной системе проходит с образованием феррита и цементита при переохлаждении ниже 727 °C.

Рассмотрим структурообразование нескольких групп сплавов. На рисунке 7.3 приведена левая нижняя часть диаграммы состояния железо-цементит с кривыми охлаждения типичных сплавов и микроструктурой.



Вторичная кристаллизация сплавов:

а) диаграмма, б), в), г), д), е) кривые охлаждения сплавов

Рисунок 7.3 - Левый нижний участок диаграммы состояния железо-цементит

Сплавы с содержанием углерода менее 0,006 %C (на примере сплава I. До температуры несколько ниже t_3 (линия GS) аустенит охлаждается без изменения состава. В интервале $t_3 - t_4$ происходит полиморфное $A \rightarrow \Phi$ превращение. На стыках и границах зерен аустенита возникают зародыши феррита, которые растут и развиваются за счет атомов аустенитной фазы. Ниже температуры t_4 сплав состоит из однородного феррита. При дальнейшем охлаждении никаких превращений не происходит.

Сплавы с содержанием углерода от 0,006 до 0,025 % (сплав II). Так же как и в предыдущем сплаве в интервале температур $t_5 - t_6$ происходит полиморфное $A \rightarrow \Phi$ превращение. Ниже t_6 в сплаве имеется ферритная фаза. Однако ниже температуры t_7 изменение состава феррита, согласно предельной растворимости углерода в феррите по линии PQ, приводит к образованию более высокоуглеродистой фазы - цементита. Этот цементит называется третичным.

Сталь эвтектоидного состава - содержание углерода 0,8 % (сплав III).

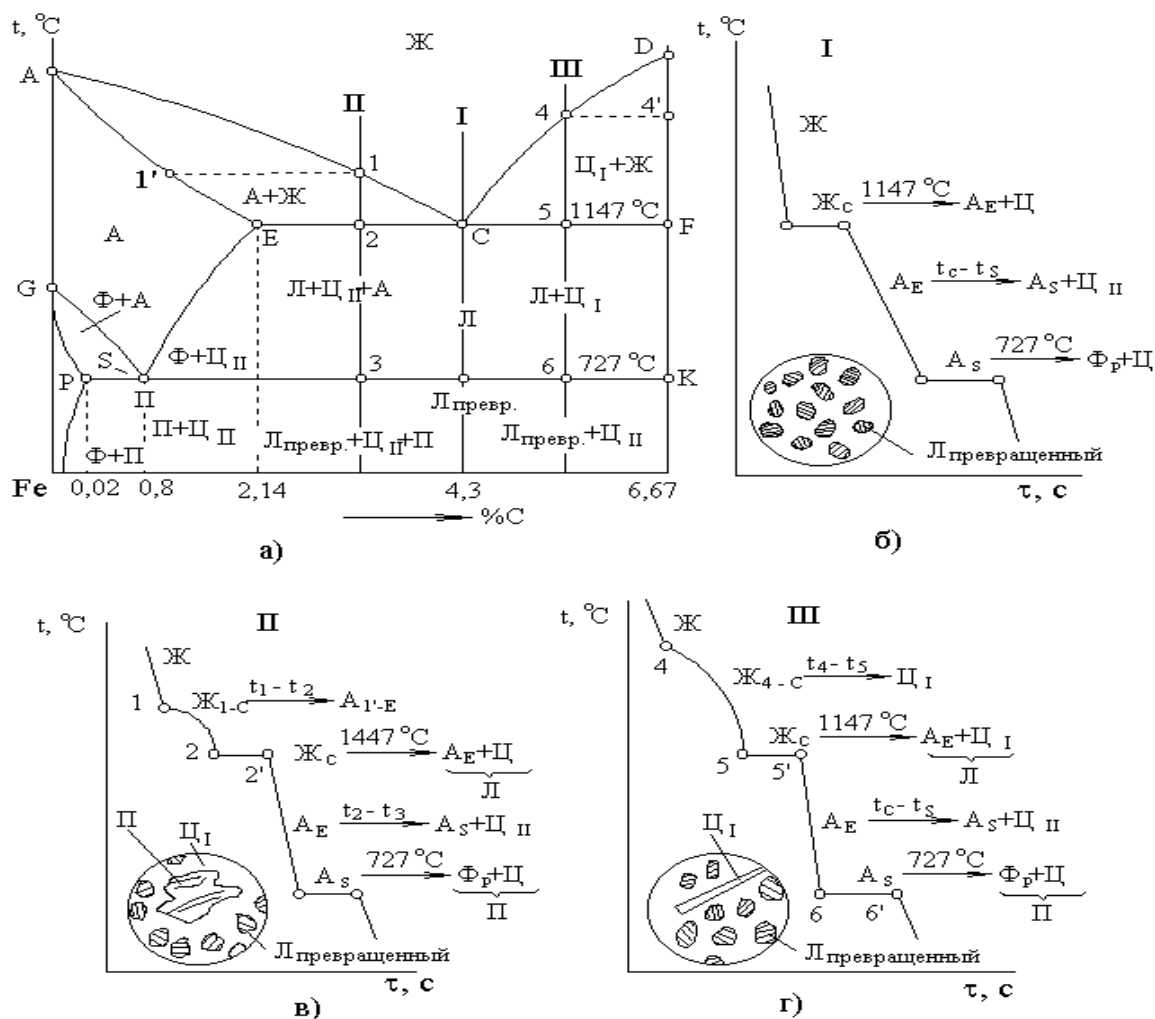
В этом случае при охлаждении аустенита имеется только одна критическая точка A_s , отвечающая температуре 727°C . При этой температуре аустенит находится в равновесии с ферритом и цементитом: $A_s \rightarrow \Phi_p + \text{Ц}$. Эвтектоидный распад аустенита состава точки S (0,8 %C) на феррит состава точки P (0,025 %C) и цементит происходит при некотором переохлаждении, т.е. ниже 727°C . Эвтектоидная смесь феррита с цементитом называется *перлитом*. Соотношение феррита и цементита в перлите составляет примерно 7,3:1.

Дозэвтектоидные стали (сплава IV). Сплавы с содержанием углерода от 0,025 до 0,8 % называются доэвтектоидными сталями. Рассмотрим фазовые и структурные изменения доэвтектоидной стали на примере сплава IV. В интервале температур $t_8 - 727^\circ\text{C}$ идет полиморфное превращение $A \rightarrow \Phi$. Состав аустенита меняется по линии GS, а феррита - по линии GP. При 727°C концентрация углерода в аустените равна 0,8 % (точка S) и в феррите - 0,025 % (точка P). Ниже этой температуры происходит эвтектоидное превращение. В равновесии находятся три фазы: феррит состава точки P, аустенит состава точки S, цементит. Так как число степеней свободы равно нулю, т.е. имеется инвариантное равновесие, то процесс протекает при постоянном составе фаз. На кривых охлаждения или нагрева наблюдается температурная остановка. Таким образом, структура доэвтектоидной стали характеризуется избыточными кристаллами феррита и эвтектоидной смесью феррита с цементитом, называемой перлитом. Количественные соотношения феррита и перлита зависят от состава сплава.

Заэвтектоидные стали (сплава V). Сплавы с содержанием углерода от 0,8 до 2,14 % называются заэвтектоидными. Процессы структурообразования рассмотрим на примере сплава V. До температуры t_{10} (линия ES) аустенит охлаждается без изменения состава. Несколько ниже этой температуры аустенит достигает предельного насыщения углеродом согласно линии растворимости углерода в аустените ES. В интервале температур $t_{10} - 727^\circ\text{C}$ из пересыщенного аустенита выделяется высокоуглеродистая фаза - цементит, который называется *вторичным*. Состав аустенита меняется по линии ES и при температуре 727°C достигает точки S (0,8 %C). Ниже 727°C происходит эвтектоидное превращение: аустенит состава точки S (0,8 %C) распадается на смесь феррита состава точки P (0,025 %C) и цементита. Таким образом, структура заэвтектоидной стали характеризуется зернами перлита и вторичного цементита.

Чугуны. Все превращения в белых чугунах, начиная от затвердевания и до комнатных температур, полностью проходят по метастабильной диаграмме Fe-Fe₃C. Наличие цементита придает излому светлый блестящий цвет, что привело

к термину “белый чугун”. Независимо от состава сплава обязательной структурной составляющей белого чугуна является цементитная эвтектика (*ледебурит*). На рисунке 7.4 изображена структурная диаграмма равновесия железо-цементит и кривые охлаждения типичных сплавов.



а) - диаграмма, б), в), г) - кривые охлаждения сплавов со схемами микроструктур при нормальной температуре
 Рисунок 7.4 - Диаграмма состояния “железо-цементит” (структурная) и кристаллизация белых чугунов

Эвтектический белый чугун. Рассмотрим процессы затвердевания, формирования первичной структуры и дальнейших структурных превращений в твердом состоянии сплава эвтектического состава с 4,3 % С (сплав I рисунок 4.4).

Затвердевание происходит в один этап при температуре ниже 1147 °С. Жидкая фаза с 4,3 % С образует эвтектическую структуру: смесь аустенита с 2,14 %С и цементита. Эта эвтектика называется ледебуритом. Как и всякая эвтектическая реакция, отвечающая нонвариантному (безвариантному) равновесию протекает при постоянной температуре и постоянном составе фаз. При эвтектической реакции ниже (1147 °С) содержание углерода в аустените максимально (2,14 %). Дальнейшее охлаждение от температуры 1147 °С до

727 °С приводит к непрерывному уменьшению в нем углерода согласно линии ограниченной растворимости ES. Углерод выделяется из аустенита в виде цементита, который называется вторичным цементитом ($\text{Ц}_{\text{вторичн.}}$). Однако он, как правило, не обнаруживается, т.к. присоединяется к эвтектическому цементиту.

Правило рычага.

Диаграмма состояния дает возможность установить состав и весовые количества фаз образующихся в процессе кристаллизации. Для этой цели служит правило рычага.

Имеется система, состоящая из двух фаз М и N с неизвестными количествами р и q.

Составы отдельных фаз и средний состав сплава определены. Для решения поставленных вопросов используем правило рычага. Количество фаз в процентах определяем соотношением:

$$P = \frac{X_2 - X}{X_2 - X_1} 100\%$$

$$Q = \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} 100\%.$$

В процессе кристаллизации изменяются концентрация компонента в фазах и количество фаз. Для их определения служит правило фаз.

Рассмотрим процесс кристаллизации произвольного сплава (рисунок 7.5) состава 50 % А и 50 % В при очень медленном охлаждении (когда успевают проходить диффузионные процессы).

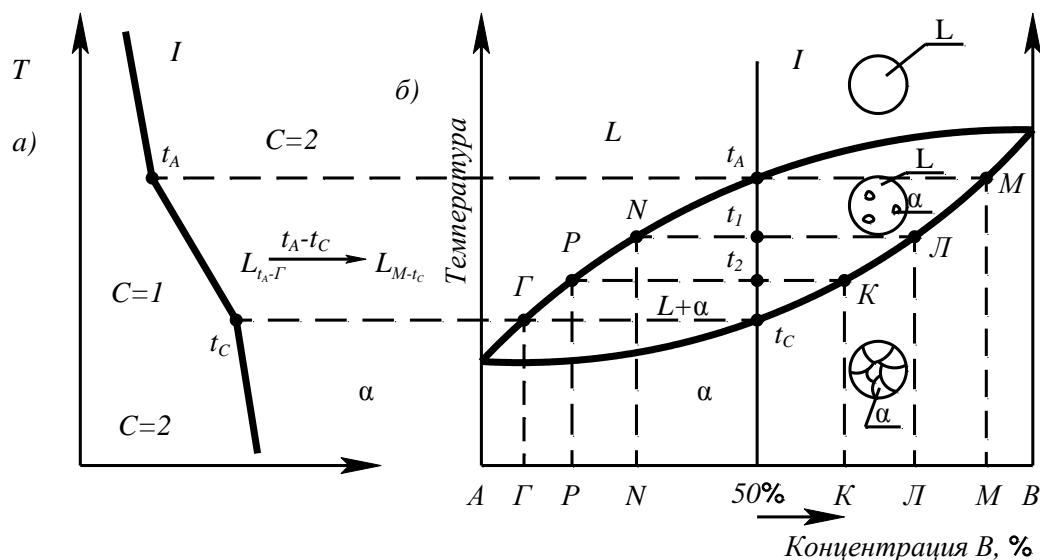


Рисунок 7.5 - Кривая охлаждения сплава (а) и диаграмма состояния сплава с неограниченной растворимостью в твердом состоянии (б)

При температуре t_A начинается кристаллизация.

В процессе кристаллизации в интервале температур t_A и t_C в жидкой фазе выделяются кристаллы α (альфа) твердого раствора различного состава.

За счет диффузионных процессов (при медленном охлаждении) состав жидкой фазы изменяется по кривой линии $t_A \rightarrow N \rightarrow P \rightarrow \Gamma$ (линия ликвидус).

Состав кристаллов изменяется по линии солидус $M \rightarrow L \rightarrow K \rightarrow t_c$ ($\alpha_M - t_c$) (рисунок 7.5).

В момент окончания кристаллизации (точка t_c) состав кристаллов такой, как и состав исходной фазы.

В реальных условиях быстрого охлаждения состав кристаллов будет неоднороден, так как скорость кристаллизации больше скорости диффузии. Неоднородность химического состава внутри зерна называется дендритной ликвацией.

Чтобы определить концентрации компонентов в фазах, через данную точку, характеризующую состояние сплава (рисунок 7.5), проводят горизонтальную линию (коноду) до пересечения с линиями, ограничивающими данную область; проекции точек пересечения коноды с линиями диаграммы на ось концентраций показывают составы фаз.

Например, при температуре t_A химический состав первичных кристаллов α определяется проекцией точки M на ось концентраций; при температуре t_1 состав жидкой фазы определится проекцией точки N на ось концентраций, а состав твердой фазы - проекцией точки L .

Для того, чтобы определить количественное соотношение фаз, через заданную точку проводят горизонтальную линию (коноду). Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

Например, при t_1 количество жидкой фазы определяется отношением отрезков: $t_{1L} / NL * 100 \%$; количество твердой фазы - отношением $Nt_1 / NL * 100 \%$.

3 Контрольные вопросы

- 1 Назовите все характерные точки диаграммы «железо-цементит» и их общепринятые обозначения.
- 2 Дайте характеристику точкам и линиям диаграммы «железо-цементит».
- 3 Что называют аустенитом?
- 4 Что называют: ферритом, перлитом, ледебуритом?
- 5 Какой сплав называют техническим железом?
- 6 Чем отличаются превращения в твердом состоянии у доэвтектоидной и заэвтектоидной стали?
- 7 Изобразите фазовую диаграмму железо-цементит.
- 8 Как называется чугун в котором весь углерод находится в связанном состоянии в виде карбида?

Практическое занятие №8. Основы рекристаллизации металлических сплавов

1 Цель занятия

- 1.1 Изучить влияние холодной пластической деформации на свойства стали.

1.2 Изучить процессы, происходящие при нагреве холоднодеформированной стали.

1.3 Научиться выбирать режимы (температура) рекристаллизационного отжига.

2 Теоретическое введение

Рекристаллизационный отжиг может использоваться перед холодной обработкой давлением как подготовительная операция, обеспечивающая необходимые: пластичность, структуру и текстуру. Он проводится между операциями холодного деформирования для снятия наклепа. В ряде случаев рекристаллизационный отжиг является окончательной термической обработкой, при которой формируется необходимый комплекс свойств.

Положение температурного порога рекристаллизации железа сильно зависит от его чистоты. После большой пластической деформации при комнатной температуре очень чистое карбонильное железо рекристаллизуется при 350°C; железо, полученное вакуумным переплавом, при 450°C, а техническое железо при 500°C.

Большинство легирующих элементов тормозит рекристаллизацию деформированного железа, приводя к смещению температурного интервала развития рекристаллизации в сторону более высоких температур. При этом температура конца рекристаллизации обычно повышается в большей мере, чем температура начала рекристаллизации. Интенсивность влияния легирования на кинетику рекристаллизации зависит от условий проведения пластической деформации и может ослабляться с увеличением степени пластической деформации.

В случае нагрева после больших пластических деформаций, по данным Р. И. Энтина, наиболее сильное тормозящее воздействие на развитие рекристаллизации железа оказывают в порядке возрастания Сг-Со-Мо-V. Например, при нагреве технически чистого железа, содержащего 0.03 % С и подвергнутого холодной прокатке с обжатием 60 %, равнялась 520 °С, а для сплавов Fe + 2 % Сг; Fe + 2 % Мо; Fe + 1.5 % V — 630, 650 и 655 °С соответственно. Марганец слабее замедляет кинетику рекристаллизации железа. По одним данным, никель практически не препятствует рекристаллизации железа, по другим, при малых количествах он повышает температуру рекристаллизации, а при больших, наоборот, ее снижает.

Характер влияния примесей и легирующих элементов в области малых и больших концентраций на положение температурного порога рекристаллизации может определяться преимущественным действием различных факторов. Считается, что при очень малых добавках примесей существенную роль играет взаимодействие атомов с дислокациями. Атомы примесей могут ощутимо уменьшать упругую энергию дислокаций и их подвижность и тем самым приводить к затруднению формирования центров рекристаллизации. Поэтому введение небольших добавок обычно вызывает резкое повышение температурного порога рекристаллизации. В области достаточно больших концентраций легирующих элементов основное влияние

на положение T_p оказывает изменение ими прочности межатомных связей и диффузионной подвижности. От вида легирования зависит и величина зернограничной энергии. Если увеличение прочности межатомных связей и уменьшение диффузионной подвижности при легировании приводит к повышению T_p , то увеличение зернограничной энергии должно влиять в противоположном направлении. Действие последнего фактора может быть причиной того, что при увеличении содержания легирующего элемента рост T_p сменяется ее снижением.

Под действием легирования изменяются и другие характеристики, существенно важные для скорости рекристаллизации, например дислокационная структура, возникающая при холодной деформации (характер распределения и концентрация дислокаций, дефектов упаковки, вакансий), подвижность дислокаций при нагреве и т. д.

Данные о влиянии содержания углерода на склонность стали к рекристаллизации противоречивы. По-видимому, этот вопрос нельзя рассматривать без учета дисперсности карбидной фазы. По крайней мере при крупных карбидах увеличение содержания углерода в стали приводит к снижению T_p . В то же время в высокоуглеродистых сталях, где имеется большое количество карбидных частиц, рост рекристаллизованных зерен оказывается затрудненным.

Следует отметить, что в разных структурных составляющих рекристаллизация феррита может протекать с существенно различной скоростью. Так, в доэвтектоидной стали с исходной феррито-перлитной структурой, рекристаллизация после умеренной пластической деформации начинается в избыточном феррите преимущественно около границ перлитных колоний. При этом она протекает при температурах, более низких, чем в случае безуглеродистого железа, деформированного на ту же степень, что и сталь.

Необходимо учитывать, что при нагреве холоднодеформированных сталей не только происходит рекристаллизация феррита, но могут изменяться морфология и дисперсность карбидной фазы. Если сталь имела в исходной структуре пластинчатый перлит, то при проведении отжига не исключено интенсивное развитие сфероидизации и коалесценции карбидов. Эти процессы значительно ускоряются под действием предварительной деформации. В результате рекристаллизационный отжиг может привести к формированию структуры с зернистым цементитом.

Чаще всего рекристаллизационный отжиг холоднодеформированных углеродистых и легированных сталей осуществляется ниже критической точки A_{c1} , при температурах 600-720 °С. Значительно реже нагрев производится в межкритическом интервале A_{c1} - A_{c3} .

При выборе режима рекристаллизационного отжига для оценки размеров образующихся зерен используются диаграммы рекристаллизации, которые иллюстрируют зависимость размера зерна от степени предварительной деформации и температуры отжига при определенной длительности выдержки. Но при применении диаграмм рекристаллизации следует учитывать условия,

при которых они были построены (вид деформации, скорость нагрева при отжиге, исходный размер зерна и т. д.).

Рекристаллизационный отжиг широко применяется на металлургических заводах при производстве листов, лент, труб, прутков и проволоки с использованием методов холодной обработки давлением. В качестве примера рассмотрим режимы рекристаллизационного отжига калиброванных прутков из конструкционных и инструментальных сталей. При их производстве подкат со структурой зернистого перлита подвергается холодному волочению со сравнительно небольшими обжатиями. Затем следует отжиг, основной целью которого является снижение твердости. Если для его проведения используют печной нагрев, то температура нагрева обычно составляет от 700 до 720 °С. При таком нагреве рекристаллизация феррита существенно не сказывается на характере структуры зернистого перлита. Некоторое развитие коалесценции карбидов может лишь улучшить обрабатываемость стали резанием и давлением. Рекристаллизационный отжиг калиброванных прутков осуществляют также в индукционных установках. Так как при скоростном нагреве температурный интервал рекристаллизации смещается в сторону более высоких температур, то температура отжига выбирается выше обычной. Для широкого круга применяемых конструкционных и инструментальных сталей она составляет 760...780°С. Температурно-временные параметры отжига в каждом конкретном случае уточняются опытным путем, так как скорость рекристаллизации зависит от химического состава стали и степени деформации при калибровке.

Для изготовления холоднокатаного листа, предназначенного для холодной штамповки, используют малоуглеродистые стали. В автомобилестроении широко применяется тонкий холоднокатаный лист из кипящей стали 08кп. Рекристаллизационный отжиг такого листа проводят после холодной прокатки, осуществляемой с большими обжатиями. После отжига листы должны обладать высокой пластичностью, чтобы не разрушаться при глубокой вытяжке, а также сохранять при проведении штамповки гладкую, бездефектную поверхность.

Рекристаллизационный отжиг листа должен обеспечить формирование определенного размера ферритного зерна (от 6 до 8 балла).

Сталь со слишком мелким зерном феррита характеризуется повышенным пределом текучести, что затрудняет проведение штамповки. При наличии крупного зерна на поверхности листа при штамповке возникает шероховатость, получившая название апельсиновой корки. Это связано с тем, что соседние крупные зерна, выходящие на свободную поверхность листа, из-за различия в ориентации деформируются по-разному.

На кривой растяжения для малоуглеродистой отожженной стали 08кп характерно наличие зуба и площадки текучести. Неоднородность деформации на площадке текучести вызывает появление при штамповке полос Чернова—Людерса, что ухудшает внешний вид и качество поверхности изделия. Чтобы избежать этого нежелательного эффекта, лист после рекристаллизационного отжига подвергают дрессировке, которая представляет собой дополнительную прокатку с небольшим обжатием (до 2%). Такая деформация устраняет

площадку текучести, а следовательно, и возможность образования полос Чернова-Людерса. Однако после дрессировки сталь 08кп склонна к деформационному старению. Этот процесс может получить развитие во время длительного вылеживания (транспортировка, складирование) перед окончательной штамповкой. Деформационное старение не только вызывает уменьшение способности стали к глубокой вытяжке, но и приводит к возврату площадки текучести и образованию полос Чернова-Людерса, портящих поверхность.

Режим рекристаллизационного отжига зависит от того, обрабатывается холоднокатаный лист в рулонах в печах периодического действия или в развернутом виде в печах непрерывного действия. Отжиг листов в камерных печах проводится при температуре от 640 до 710 °С. Нагрев выше точки A_c , в межкритическом интервале не применяется, так как в листе возникает разнородность, вызванная частичной перекристаллизацией. Разнородность ухудшает способность стали к глубокой вытяжке при штамповке. Кроме того, при охлаждении из межкритического интервала при диффузионном распаде переохлажденного аустенита может образовываться структурно-свободный цементит, что также отрицательно влияет на способность, стали к глубокой вытяжке.

Ускоренное охлаждение при непрерывном отжиге способствует пресыщению α - твердого раствора элементами внедрения, что может вызвать после дрессировки интенсивное развитие деформационного старения. Чтобы уменьшить этот эффект снижают, по возможности, скорость охлаждения в интервале температур от 720 до 480 °С, с этой же целью, в процессе охлаждения осуществляют изотермическую выдержку при температурах от 350 до 450 °С, обеспечивающую выделение растворенного углерода в виде карбидов с последующей их коалесценцией. Для уменьшения склонности к деформационному старению может быть использован и другой режим обработки, при котором после ускоренного охлаждения листа до комнатной температуры проводят дополнительный нагрев до температур от 300 до 400 °С.

3 Контрольные вопросы

- 1 С какой целью проводится отжиг?
- 2 В чем заключается отличие отжига от закалки и нормализации?
- 3 Объясните явление критической степени деформации.
- 4 Выбрать и обосновать температуру отпуска балки: материал - 38Х2Н2.
- 5 Выбрать и обосновать температуру отпуска изгиба трубы пароперегревателя: материал - сталь 18К.
- 6 При каких температурах производят различные виды пластической деформации?

Практическое занятие № 9. Изучение влияния термической обработки на прочностные и пластические свойства стали

1 Цель занятия

Получить практические навыки выбора режима термической обработки для деталей машин из углеродистых и легированных конструкционных сталей

2 Теоретическое введение

Термическая обработка - один из важнейших технологических процессов, используемый во всех отраслях машиностроения.

Термической обработкой называется тепловая обработка металлов и сплавов, при которой происходит изменение их строения, а следовательно, и свойств. Механические свойства стали при этом могут изменяться в очень широком диапазоне. Так твердость стали, содержащей 0,8 % углерода, после такой обработки возрастает от 160 до 600 НВ.

Выделяют следующие основные виды термической обработки:

- 1) отжиг;
 - отжиг I рода (без фазовых превращений);
 - отжиг II рода (с фазовыми превращениями);
- 2) нормализация;
- 3) закалка;
- 4) отпуск;
- 5) химико-термическая обработка (ХТО);
- 6) термомеханическая обработка (ТМО).

Термическая обработка состоит из трех переходов, следующих один за другим:

- 1) нагрев до определенной температуры;
- 2) выдержка при заданной температуре;
- 3) охлаждение с различной скоростью от заданной температуры до комнатной.

Термическая обработка заключается в нагреве до определенной температуры, регламентированной выдержке при этой температуре и последующем охлаждении. Ее основными параметрами являются температура нагрева, длительность выдержки, скорости нагрева и охлаждения. Термическая обработка может быть весьма сложной и включать несколько циклов нагрева и охлаждения, осуществление нагрева и охлаждения по ступенчатому режиму, охлаждение в область отрицательных температур.

Термическая обработка подразделяется на собственно термическую, химико-термическую и термомеханическую.

Собственно термическая обработка включает следующие основные виды: отжиг первого рода, отжиг второго рода, закалку без полиморфного превращения, закалку с полиморфным превращением, старение и отпуск.

Под отжигом понимают термическую обработку, обеспечивающую достижение равновесного состояния или близкого к нему. При отжиге первого рода для этой цели не используются фазовые превращения, хотя они могут

протекать во время его осуществления. В основе такой обработки лежат процессы, самопроизвольно развивающиеся во время выдержки при повышенных температурах и приводящие к снижению свободной энергии системы.

Отклонения от равновесного состояния возникают при различных операциях: литье, обработке давлением, сварке, механической обработке. В этих случаях используются разные виды отжига первого рода. Например, для устранения дендритной ликвации в сплавах применяется гомогенизационный (диффузионный) отжиг. Он характеризуется нагревом до высоких температур, обеспечивающих интенсивное развитие диффузионных процессов, и длительными выдержками. Другим примером может служить рекристаллизационный отжиг, при котором деформированный металл или сплав нагревают выше температуры рекристаллизации. В результате рекристаллизационных процессов снимается наклеп, созданный пластической деформацией.

При отжиге второго рода используются фазовые превращения, протекающие при нагреве и охлаждении по нормальному диффузионному механизму, для достижения равновесного или близкого к нему состояния. Это могут быть полиморфные и эвтектоидные превращения, а также превращения, связанные с изменением растворимости компонентов в твердом состоянии. При таком отжиге нагрев производится выше температур фазового превращения. Охлаждение осуществляется с небольшой скоростью, чтобы превращение высокотемпературной фазы в структуры, устойчивые при низкой температуре, прошло в полной мере.

Закалка — это термическая обработка, при которой получают неравновесные структуры. Такой обработке подвергают сплавы, имеющие фазовые превращения в твердом состоянии. При закалке, как и при отжиге второго рода, нагрев проводят выше температур фазового превращения. Охлаждение осуществляют с высокой скоростью, чтобы подавить фазовые превращения, связанные с диффузией. Различают два вида закалки: без полиморфного превращения и с полиморфным превращением. Закалка без полиморфного превращения, *или* истинная закалка — это обработка, при которой быстрым охлаждением фиксируют состояние сплава, характерное для высоких температур. Она применима к сплавам, отличающимся значительной температурной зависимостью растворимости компонентов в твердом состоянии. При такой закалке возникает пересыщенный твердый раствор.

При закалке с полиморфным превращением в результате быстрого охлаждения высокотемпературной фазы возникает новая метастабильная структура, отличная от той, которая наблюдается в равновесном состоянии. Такая структура образуется в тех случаях, когда фазовое превращение осуществляется сдвиговым упорядоченным механизмом. Эту термическую обработку называют также закалкой на промежуточную метастабильную структуру.

Уже при комнатной температуре в закаленном сплаве могут протекать процессы, приближающие его к равновесному состоянию. Нагрев, увеличивая

диффузионную подвижность атомов, приводит к интенсификации этих процессов. Термическая обработка, при которой закаленный сплав подвергают дополнительному нагреву в целях перехода в более стабильное состояние, называется старением, или отпуском раствора, а термин применяется "отпуск" — к сплавам, при закалке которых возникает промежуточная метастабильная структура.

На рисунке 9.1 представлен диапазон оптимальных температур для нагрева при различных видах термообработки

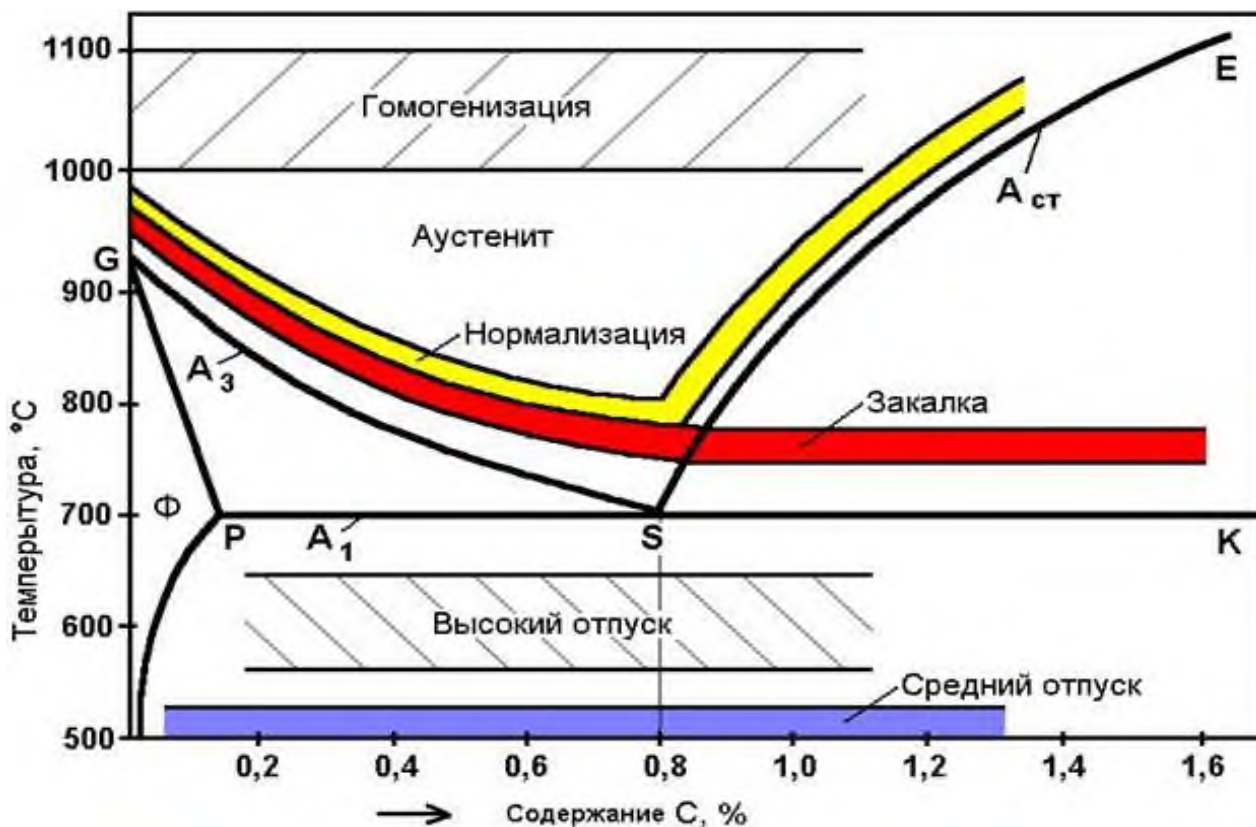


Рисунок 9.1 - Диапазон оптимальных температур нагрева при различных видах термообработки

Химико-термическая обработка (ХТО) сочетает тепловое воздействие с изменением химического состава поверхностных слоев изделий. Обычно при ХТО происходит насыщение наружной зоны металла одним или несколькими химическими элементами, но существуют и такие разновидности этой обработки, при которых из поверхностного слоя деталей удаляется тот или иной элемент. При ХТО изделия нагревают в активной среде, где реакции и диффузионные процессы в металле обеспечивают желаемое изменение химического состава поверхностных слоев. Для сталей чаще всего используют насыщение поверхностных слоев изделий углеродом - цементацию, азотом - азотирование или совместно обоими элементами - нитроцементация и цианирование.

Термомеханическая обработка (ТМО) - это совокупность операций пластической деформации и термической обработки, выполняемых в определенной последовательности. Известно, что дефекты кристаллического строения оказывают значительное влияние на формирование структуры при фазовых превращениях. Поэтому, создавая при пластической деформации повышенную плотность дефектов и определенное их распределение, можно в существенной мере воздействовать на структурообразование при термической обработке и целенаправленно изменять свойства.

Пример. Выберите режим термической обработки стали марки 38Х2Н2МА.

Так как сталь марки 38Х2Н2МА является конструкционной, от которой требуется комплекс механических свойств: высокая прочность, твердость и пластичность, поэтому оптимальной термообработкой для неё является закалка с последующим отпуском.

Для определения температуры закалки воспользуемся диаграммой Fe-Fe₃C (железо-цементит). На рисунке 9.2 представлена схема определения требуемой температуры закалки для стали марки 38Х2Н2МА. Для расчёта принимаем содержание углерода в стали равное 0,38%.

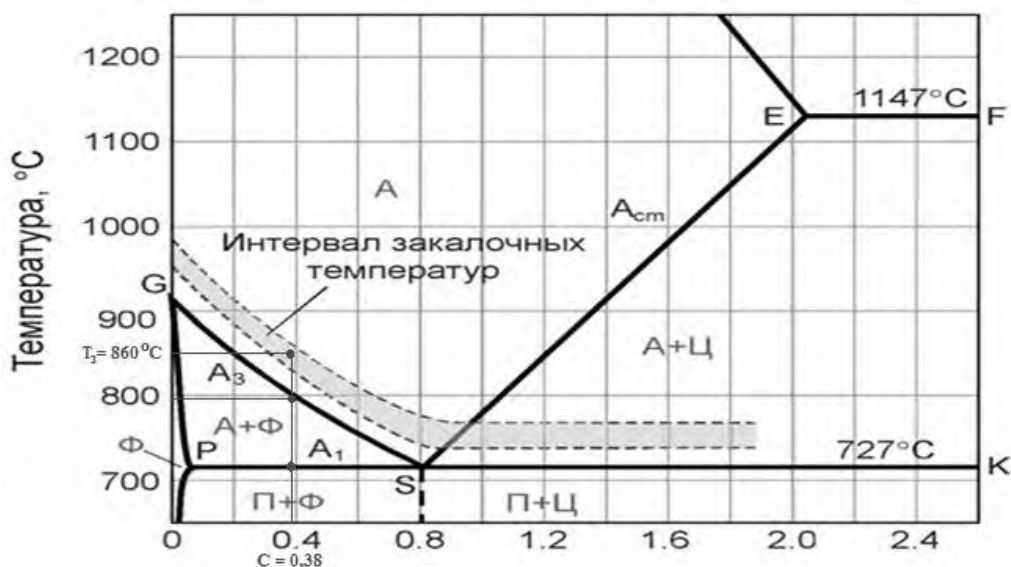


Рисунок 9.2 - Определение температуры закалки стали 38Х2Н2МА

Из рисунка 9.2 видно, что температура закалки для стали 38Х2Н2МА находится выше верхней критической точки А_{С3} и составляет 860 °С.

Критической скоростью закалки обеспечивает получение структуры мартенсита или мартенсита с остаточным аустенитом.

При скорости охлаждения меньше критической в структуре закаленной стали, наряду с мартенситом, будет находиться троостит, а при дальнейшем уменьшении скорости получают структуры троостита или сорбита без мартенсита. Критическую скорость закалки для стали 38Х2Н2МА на мартенсит определяем по диаграмме, представленной на рисунке 9.3.

На диаграмме распада переохлажденного аустенита критическая скорость заковки изображается в виде касательной к С - образным кривым в области минимальной устойчивости переохлажденного аустенита.

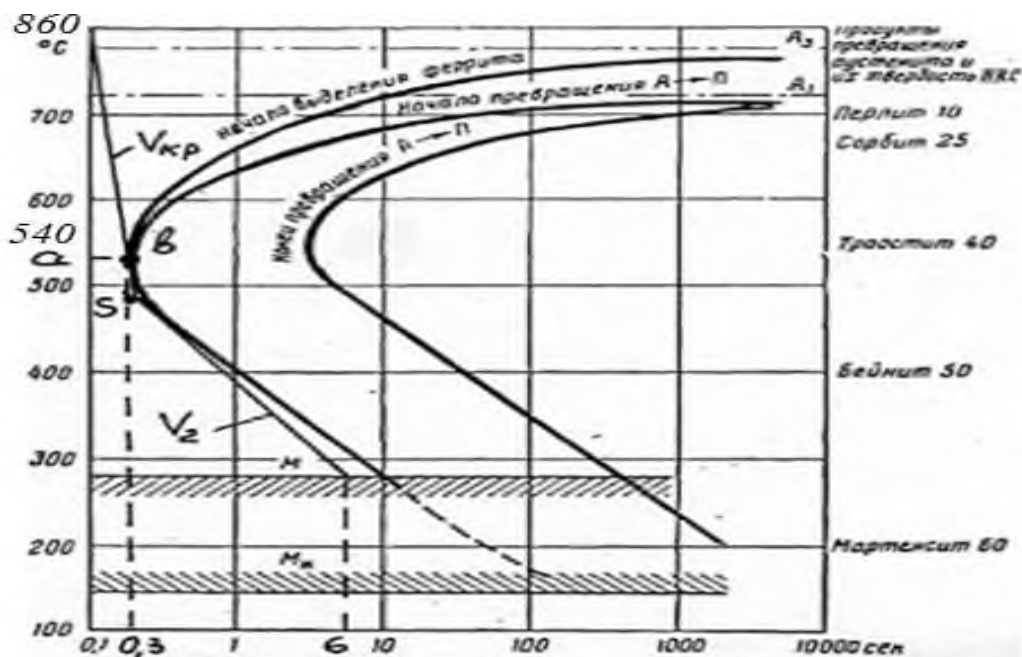


Рисунок 9.3 - Определение критической скорости заковки стали 38Х2Н2МА

Критическая скорость заковки определяется по формуле:

$$V_{кр} = \frac{t_3 - t_a}{1,5 \cdot \tau_b}$$

где t_3 - температура заковки, °С;

t_a - температура при которой переохлажденный аустенит имеет наименьшую устойчивость, °С;

τ_b - время минимальной устойчивости аустенита при 550 °С выражается отрезком $a_b = 0,3$ с.

Из рисунка 9.3 определяем значения t_a и τ_b и далее рассчитываем критическую скорость охлаждения:

$$V_{кр} = \frac{860 - 540}{1,5 \cdot 0,3} = 711^\circ\text{C}/\text{с}$$

При температуре ниже изгиба кривых (ниже точки «а») устойчивость аустенита повышается, поэтому его можно охлаждать до температуры M_n с меньшей скоростью V_2 (изображена вектором SM, проходящим близко к кривой начала диффузионного превращения). Скорость охлаждения V_2 определяется по формуле:

$$V_2 = \frac{t_s - M_n}{\tau_0 \cdot \tau_s}$$

где τ_s - температура в точке S, °С;

M_n - температура начала мартенситного превращения, °С;
 τ_0 и τ_3 - устойчивость аустенита в точках S и M_n .

$$V_2 = \frac{480 - 280}{6 \cdot 0,3} = 111^\circ\text{C}/\text{с}$$

Зная необходимые скорости охлаждения выбираем нужную среду охладителя по таблице 9.1.

Таблице 9.1 - Показатели охлаждающей способности закалочных сред

Виды закалочных сред	Скорости охлаждения, °С/с, в температурном интервале охлаждения, °С	
	650 - 550	300 - 200
10% водный раствор NaCl при 18°С	1100	300
Вода при температуре 18 °С	600	270
Вода при температуре 28 °С	500	270
Вода при температуре 50 °С	100	270
Дистиллированная вода	250	200
Минеральное масло	100-150	20-50
Спокойный воздух	3	1

На рисунке 9.4 представлен предлагаемый режим термической обработки для стали 38Х2Н2МА.

Для данной стали рекомендуется закалка в масле при температуре 860 °С с последующим высоким отпуском при температуре 560 °С.

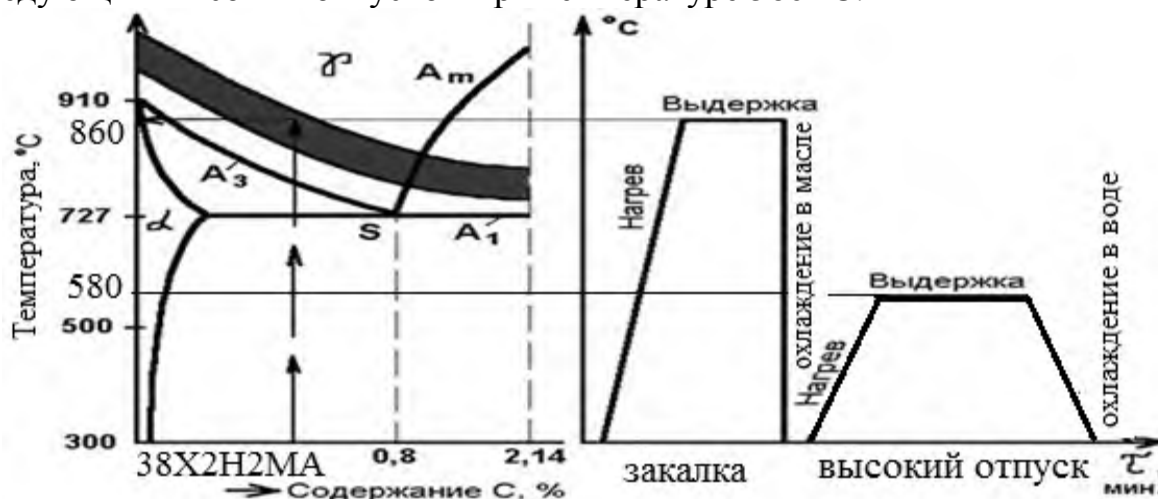


Рисунок 9.4 - Предлагаемый режим термической обработки стали 38Х2Н2МА

Твердость мартенсита стали марки 38Х2Н2МА после закалки определяем из рисунка 9.5 и таблицы 9.2.

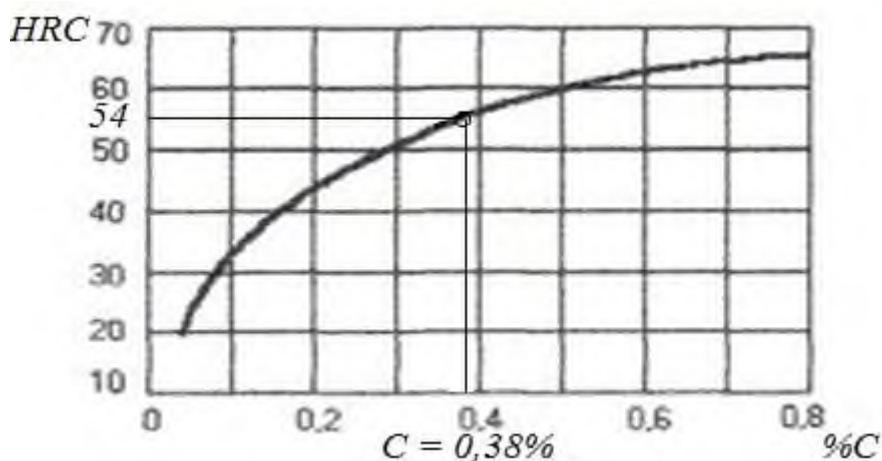


Рисунок 9.5 - Влияние содержания углерода в стали на твердость мартенсита

В таблице 9.2 представлен стандартный ряд изменения твердости мартенсита от содержания углерода в стали.

Таблица 9.2 - Стандартный ряд изменения твердости мартенсита от содержания углерода

Твердость, HRC	40	48	55	59	62	65	66
Содержание углерода, %	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0

Из рисунка 9.5 и данных представленных в таблице 9.2 видно, что после закалки стали 38X2H2MA на мартенсит при содержании углерода 0,38 % получаем твердость равную 54 HRC.

3 Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные виды термических обработок?
- 2 Назовите основные виды отжига?
- 3 В чем различие между отжигом первого и отжигом второго рода?
- 4 Назовите основные виды закалки?
- 5 На основании каких данных выбирают вид термической обработки металла?
- 6 Что подразумевают под химико-термической обработкой стали?
- 7 Что подразумевают под термомеханической обработкой стали?
- 8 Выберите вид термической обработки для сварной конструкции: материал сталь 45.
- 9 Выберите вид термической обработки для крупногабаритной штамповки КП350: материал сталь 35.
- 10 Выберите вид термической обработки для поковки из стали 45X12H.

Список использованных источников

- 1 Материаловедение: учеб. для студентов вузов / В.С. Кушнер, А.С. Верещака, А.Г. Схиртладзе и др. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. - 232 с.
- 2 Лякишев Н.П. Энциклопедический словарь по металлургии: Справочное издание. В 2-х т. Т. 1: А-О/ Н.П. Лякишев и др. - М.: «Интермет Инжиниринг», 2000. - 412 с.
- 3 Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1984. - 432 с.
- 4 Стерин И.С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки / Учебное пособие. - СПб.: Политехника, 2003.- 344 с.
- 5 Кудрюмов А.В., Пикунов М.В. Литейное производство цветных и редких металлов. - М.: Металлургия, 1982. - 352 с.
- 6 Материаловедение и технология материалов: Учебник / В.Т. Жадан, П.И. Полухин, А.Ф. Нестеров и др. - М.: Металлургия, 1994. - 623 с.
- 7 Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. В 3-х т. - 4-е изд. - М.: Металлургия, 1991. - 1131 с.
- 8 Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. - М.: Металлургия, 1981. - 414 с.
- 9 Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для студентов высших учебных заведений. / В.Б. Арзамасов, А.Н. Волчков, В.А. Головин и др. - М.: Издательский центр «Академия», 2007. - 446 с.

БРАТКОВСКИЙ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ
ШЕВЧЕНКО ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания для практических занятий
для бакалавров направления подготовки
15.03.03 «Технологические машины и оборудование»,
всех форм обучения

Подписано в печать 23.11.2017 г.		
Формат 60x90 _{1/16} Рег. № 104	Печать цифровая Тираж 30 экз.	Уч.-изд.л. 3,69

ФГАОУ ВО
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Новотроицкий филиал
462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.
E-mail: nfmisis@yandex.ru
Контактный тел. 8 (3537) 679729.