

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*Методические рекомендации к лабораторным работам для
студентов всех специальностей и направлений подготовки очной
формы обучения*

Часть 2



Могилев 2023

УДК 669.01
ББК 30.3
М34

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «24» октября 2022 г.,
протокол № 4

Составитель канд. техн. наук, доц. А. И. Хабибуллин

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. Е. Науменко

Содержатся основные теоретические положения и методические указания
к выполнению лабораторных работ по курсу «Материаловедение».

Учебно-методическое издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Часть 2

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать 09.03.2023. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,19. Тираж 56 экз. Заказ № 291.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43,212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ.....	4
7 Лабораторная работа № 7. Структура и свойства углеродистой стали в равновесном состоянии.....	5
8 Лабораторная работа № 8. Закалка стали.....	10
9 Лабораторная работа № 9. Отпуск закаленной стали	15
10 Лабораторная работа № 10. Изучение зависимости между структурой и свойствами стали после различных видов термической обработки.....	19
11 Лабораторная работа № 11. Химико-термическая обработка стали.....	27
Список литературы.....	35

Часть 2

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ

1 К работе с учебным оборудованием допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторной работы.

2 Разрешается выполнять только ту работу, которая соответствует учебному плану.

3 Лабораторные работы должны проводиться в соответствии с методическими указаниями и правилами технической эксплуатации соответствующего учебного оборудования.

4 Запрещается выполнять лабораторные работы на оборудовании и установках с неисправностями, которые могут привести к пожарам или поражению электрическим током.

5 Запрещается самостоятельно устранять неисправности оборудования.

6 В лаборатории необходимо соблюдать правила внутреннего распорядка.

7 **Перед началом работы** необходимо провести внешний осмотр оборудования, используемого в лабораторной работе, убедиться в наличии заземления, огнетушителя, отсутствии оголенной электропроводки.

8 Проверить наличие необходимых для выполнения работы образцов и расходуемых материалов.

9 Обеспечить свободный доступ к используемому оборудованию.

10 **При выполнении лабораторной работы** запрещается включать оборудование и приборы без разрешения преподавателя, вращать без необходимости настроечные винты и рукоятки, перемещать приборы во время работы.

11 Во избежание удара электротоком необходимо отключать печное оборудование перед загрузкой и выгрузкой образцов.

12 Для загрузки и выгрузки образцов из печного пространства использовать специальные перчатки и клещи.

13 Не допускать контакта раскаленной заготовки с телом, одеждой, мебелью и полом.

14 **По окончании работы** необходимо отключить от электросети оборудование и приборы.

15 Убрать рабочее место.

16 В случае неполадок оборудования и приборов сообщить об этом преподавателю.

7 Лабораторная работа № 7. Структура и свойства углеродистой стали в равновесном состоянии

Цель работы: изучение диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов; анализ превращений, происходящих в сплавах при изменении температуры и концентрации; установление зависимости между структурой и свойствами стали.

Оборудование: микроскринер МС ЛабоМет-1.

Под **равновесным** понимается такое состояние, при котором все фазовые превращения в сплаве полностью закончились в соответствии с диаграммой состояния. Это имеет место только при очень малых скоростях изменения температуры. Равновесное состояние соответствует минимальному значению свободной энергии и не подвергается самопроизвольному изменению во времени. Поэтому оно называется стабильным.

Превращения, протекающие в сталях в равновесном состоянии, описываются диаграммой «железо – цементит», представленной на рисунке 7.1.

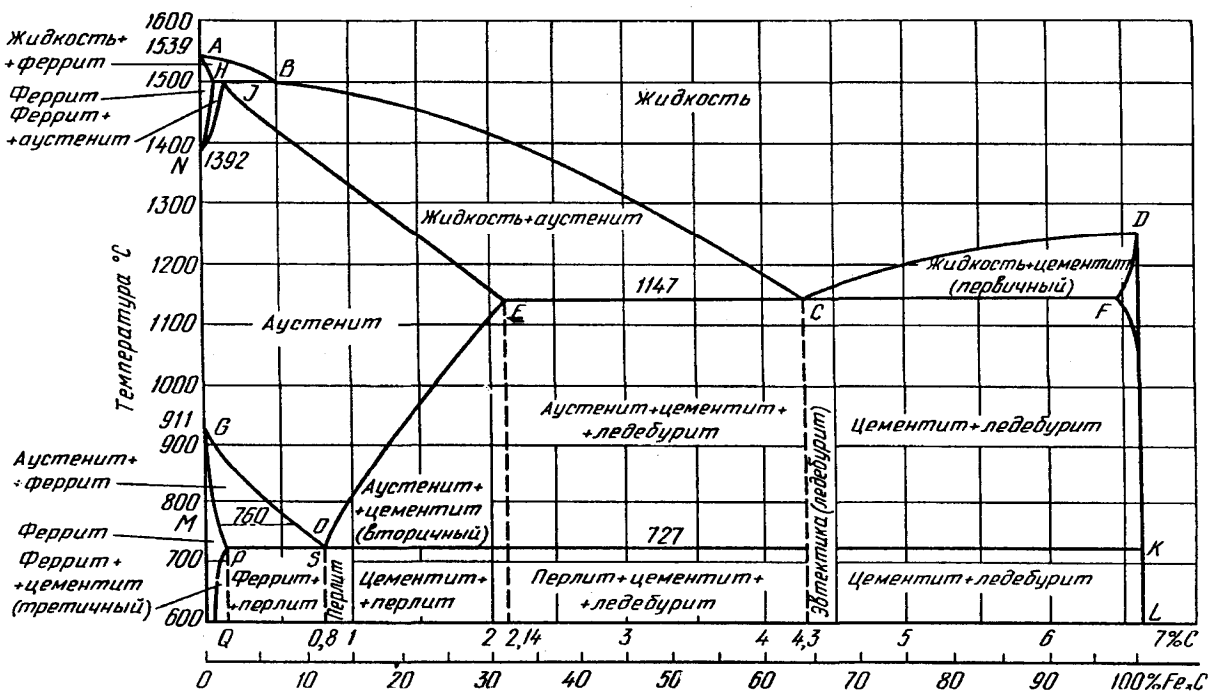


Рисунок 7.1 – Диаграмма «железо – цементит»

В железоуглеродистых сплавах могут присутствовать следующие твердые фазы: феррит, аустенит, цементит.

Феррит – твердый раствор внедрения углерода в α -железе, имеющем объёмно-центрированную кубическую решетку. На диаграмме «железо – цементит» существуют две области феррита – высокотемпературная область ANH и низкотемпературная область GPQ . Максимальная растворимость в высоко-

температурной области составляет 0,10 % (точка *H*), в низкотемпературной области – 0,02 % (точка *P*). Содержание углерода при комнатной температуре – 0,01 %. Феррит мягок и пластичен ($\sigma_B = 200 \dots 300$ МПа, $\delta = 20 \dots 50$ %, 80...100 НВ).

Аустенит – твердый раствор внедрения углерода в γ -железе, имеющем градицентрированную кубическую решетку. На диаграмме «железо – цементит» аустенит занимает область *NJESG*. Максимальная растворимость углерода в аустените – 2,14 % (точка *E*). По механическим свойствам аустенит близок к ферриту. Горячую обработку давлением проводят в области существования аустенита (однофазный твердый раствор характеризуется высокой пластичностью).

Цементит – химическое соединение железа с углеродом – карбид железа, химическая формула которого Fe_3C . Содержание углерода в цементите равно 6,67 %. Цементит обладает высокой твердостью (≈ 62 HRC) и хрупкостью. Он имеет сложную ромбическую решетку.

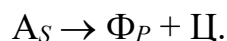
Кристаллизация сплавов, содержание углерода в которых меньше 0,5 % (точка *B*), начинается с выделения из жидкого раствора кристаллов феррита. При содержании углерода больше 0,5 % стали кристаллизуются с выделением аустенита.

Сплавы, содержащие углерод от 0,1 % (точка *H*) до 0,5 % (точка *B*), претерпевают при температуре 1499 °С (линия *HJB*) **перитектическое превращение**, заключающееся в том, что жидкий раствор, имеющий при этой температуре концентрацию, соответствующую точке *B* (0,5 % С), взаимодействуя с выделившимися из него кристаллами феррита концентрации точки *H* (0,1 % С), образует новую фазу – кристаллы аустенита концентрации точки *J* (0,16 % С):



При дальнейшем снижении температуры феррит, оставшийся после перитектического превращения, перекристаллизовывается в аустенит. В сталях с содержанием углерода больше 0,16 % оставшаяся жидкость затвердевает с образованием аустенита. Ниже линий *NJ* и *JE* сплавы имеют однородную аустенитную структуру.

При температуре 727 °С (линия *PSK*) сплавы претерпевают **эвтектоидное превращение**. При эвтектоидном превращении аустенит, имеющий при этой температуре концентрацию углерода, соответствующую точке *S* (0,8 % С), распадается с образованием **эвтектоидной смеси** – перлита (феррита состава точки *P* (0,02 % С) и цементита):



Эвтектоидная смесь феррита и цементита, образующаяся в результате эвтектоидного распада аустенита, называется **перлитом**.

В сплавах с содержанием углерода менее 0,8 % (точка *S*) эвтектоидному превращению предшествует выделение из аустенита феррита, которое протекает в интервале температур, ограниченных линиями *GS* и *PS*. При этом в остав-

шемся аустените концентрация углерода изменяется по линии GS . В сплавах с содержанием углерода более 0,8 % (точка S) эвтектоидному превращению предшествует выделение из аустенита цементита. Выделение цементита протекает в интервале температур, ограниченных линиями ES и SK . В этом случае концентрация углерода в оставшемся аустените изменяется по линии ES .

Железоуглеродистые сплавы в зависимости от содержания углерода делятся на три группы: **техническое железо, стали, чугуны**.

Техническое железо – это сплавы с содержанием углерода менее 0,02 % (точка P). Как следует из диаграммы «железо – цементит», техническое железо имеет структуру феррита (или феррита и цементита третичного, который в виде отдельных мелких включений располагается по границам зерен феррита) (рисунок 7.2, а). Третичный цементит выделяется из феррита в результате снижения растворимости углерода при уменьшении температуры от эвтектоидной до комнатной. Предельная растворимость углерода в феррите ограничивается линией GPQ . По свойствам техническое железо подобно ферриту.

Стали – это сплавы с содержанием углерода от 0,02 % (точка P) до 2,14 % (точка E). В структуре стали по мере увеличения содержания углерода возрастает доля цементита и уменьшается доля феррита. Это приводит к повышению твердости и прочности стали и снижению ее пластичности, изменению физических и технологических свойств. В зависимости от содержания углерода стали по своей структуре делятся на **доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные**.

Доэвтектоидные стали содержат от 0,02 % углерода (точка P) до 0,8 % углерода (точка S). Они имеют структуру феррита (светлые зерна) и перлита (темные зерна) (рисунок 7.2, б, в). С увеличением содержания углерода прямо пропорционально увеличивается содержание перлита. При концентрации углерода в стали 0,8 % количество перлита равно 100 %. Зная площадь, занимаемую перлитом, можно определить содержание углерода в углеродистой стали:

$$C = 0,8 \cdot A / 100,$$

где A – площадь, занимаемая перлитом.

Эвтектоидная сталь содержит 0,8 % углерода (точка S) и состоит из перлита (рисунок 7.2, г).

Заэвтектоидная сталь содержит от 0,8 % углерода (точка S) до 2,14 % углерода (точка E). Ее структура состоит из перлита и цементита (рисунок 7.2, д).

Таким образом, структура, а следовательно, и свойства стали определяются количеством углерода в ней. Доэвтектоидные стали, содержащие до 0,8 % углерода, являются **конструкционными**, предназначенными для изготовления деталей машин (машиностроительные стали), конструкций и сооружений (строительные стали). В значительной мере свойства углеродистых сталей, а следовательно, и область их применения зависят от содержания в них вредных примесей серы и фосфора. Чем меньше их в стали, тем выше ее качество.

Стали **обыкновенного качества**, наиболее дешевые, являются конструкционными сталями общего назначения и содержат до 0,07 % фосфора, 0,06 % серы, 0,06 %...0,49 % углерода. По гарантируемым свойствам они подразделяются на три группы – А, Б, В. В сталях группы А гарантируются механические

свойства, группы Б – химический состав, группы В – механические свойства и химический состав.

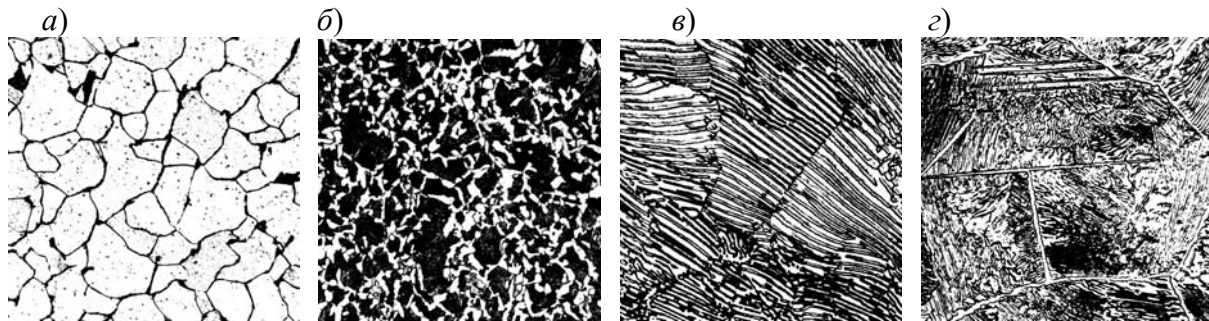


Рисунок 7.2 – Микроструктура технического железа (а), доэвтектоидной (б), эвтектоидной (в) и заэвтектоидной (г) сталей

Сталь группы А маркируется буквами Ст и номером 0, 1, 2, ... 6, например, Ст1. В сталях группы Б перед буквами Ст ставится буква Б, например, БСт2. В сталях группы В перед буквами Ст ставится буква В, например, ВСт3. С увеличением условного номера повышается содержание углерода в стали, что приводит к увеличению прочностных свойств, к снижению пластичности и свариваемости.

Стали группы А применяются для изготовления рядового проката (швеллеров, уголков, листов, прутков, труб и др.), используемого для клепанных и болтовых конструкций, а также для малонагруженных деталей машин (валов, осей, зубчатых колес, болтов и т. д.), **не подвергаемых нагреву в процессе обработки.**

Стали группы Б применяются для изготовления изделий, **подвергаемых нагреву** (горячей обработке давлением, сварке, термической обработке).

Стали группы В применяются для изготовления сварных конструкций, подвергаемых расчетам на прочность.

В конце марки стали ставятся буквы «кп», «пс», «сп». Буквы «кп» показывают, что сталь кипящая, «пс» – полуспокойная, «сп» – спокойная.

Качественная конструкционная сталь по сравнению со сталью общего назначения содержит вдвое меньше серы и фосфора и отличается более высокими механическими свойствами. Она маркируется цифрами, например, 08, 10, ... 80, показывающими содержание углерода в сотых долях процента.

Низкоуглеродистые стали, содержащие углерода до 0,25 %, обладают низкой прочностью, но высокой пластичностью и применяются для изготовления изделий листовой **холодной штамповкой** (05кп...10), а также для деталей, **упрочняемых цементацией**, и для различных **сварных соединений** (сталь 15, сталь 20). Кроме того, из них изготавливают детали неотчетственного назначения.

Среднеуглеродистые стали марок 30...50 предназначаются для **ответственных деталей** высокой прочности с вязкой сердцевиной (зубчатые колеса, шатуны, коленчатые валы, распределительные валы, винты, оси, втулки, рычаги и др.). Как правило, детали из этих сталей подвергаются улучшению (закалке и высокому отпуску).

Высокоуглеродистые стали 55...85 применяются для *пружин, рессор*, а также деталей высокой прочности: прокатных валков (сталь 60), крановых колес (сталь 75), дисков муфт сцепления (сталь 85) и др. Детали из этих сталей подвергаются упрочнению методами термической обработки.

Для изготовления различных инструментов применяется **углеродистая инструментальная сталь**, содержащая углерода от 0,7 % до 1,3 %. Эта сталь производится следующих марок: У7...У13 (качественная) или У7А...У13А (высококачественная). Здесь «У» означает «углеродистая инструментальная сталь», число после «У» – содержание углерода в десятых долях процента (например, У12 содержит углерода 1,2 %).

Стали марок У7 и У8 вязче других, т. к. не имеют в структуре цементита, и они идут на изготовление **ударных инструментов** – молотков, зубил, топоров, кернеров, стамесок, долот, штампов и т. д.

Стали У9...У11 имеют несколько меньшую вязкость и немного большую твердость (т. к. в их структуре содержится небольшое количество цементита) и используются для изготовления **резов, сверл, метчиков, лерок**.

Стали У12 и У13 обладают низкой вязкостью и высокой твердостью и используются для изготовления **инструмента, не испытывающего ударных нагрузок** (напильников, бритв, рашпилей и т. п.).

Контрольные вопросы

1 Описать превращения, протекающие в сталях при нагреве или охлаждении, указать их температуры.

2 Дать определение фазам, присутствующим в сталях, и указать содержание углерода в них.

3 Дать классификацию углеродистых сталей по качеству, содержанию углерода и назначению.

4 Изучить маркировку сталей и указать области применения перечисленных сталей: Ст2, БСт3, ВСт4, Ст6; 08кп, 10... 80; У7...У13.

Задание

1 Зарисовать диаграмму «железо – цементит».

2 Дать определение фазам и структурным составляющим в сталях (доэвтектоидной, эвтектоидной, заэвтектоидной).

3 Определить содержание углерода в образце доэвтектоидной стали.

4 Изучить и зарисовать микроструктуру предложенных шлифов; указать фазы и расставить структурные составляющие.

5 Указать марки сталей, применяемых для изготовления различных деталей машин, сварных конструкций и инструментов согласно заданию преподавателя.

8 Лабораторная работа № 8. Закалка стали

Цель работы: изучение основ теории и технологии закалки сталей.

Оборудование и инструмент: печь SNOL 05/1250; заготовки стали 40 для закалки, закалочные емкости с минеральным маслом и водой, твердомер Роквелла TR 5014.

Закалкой называется вид термической обработки, который заключается в нагреве стали на $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температур критических точек A_{c1} или A_{c3} (рисунки 8.1 и 8.2), выдержке при этих температурах (для завершения фазовых превращений) и последующем охлаждении со скоростью выше критической V_k (рисунок 8.3).

Под **критической скоростью закалки** понимается минимальная скорость охлаждения, обеспечивающая бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит. **Целью закалки** является повышение твердости, прочности и долговечности механизмов машин и инструмента.

В зависимости от температуры нагрева закалку подразделяют на **полную** и **неполную**. В первом случае сталь нагревается выше температур A_{c3} или A_{cm} в область аустенита. Во втором – выше температуры A_{c1} , но ниже A_{c3} или A_{cm} в область, где наряду с аустенитом в доэвтектоидной стали присутствует феррит, а в заэвтектоидной – цементит (см. рисунок 8.2).

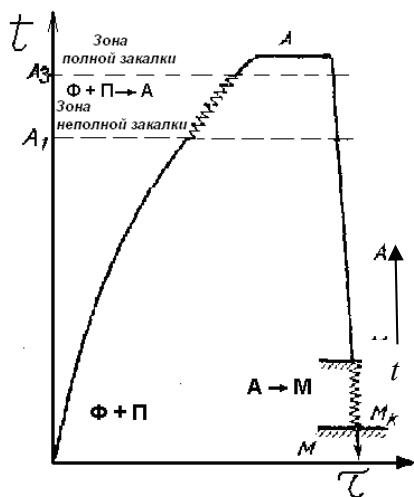


Рисунок 8.1 – Температурный режим закалки стали

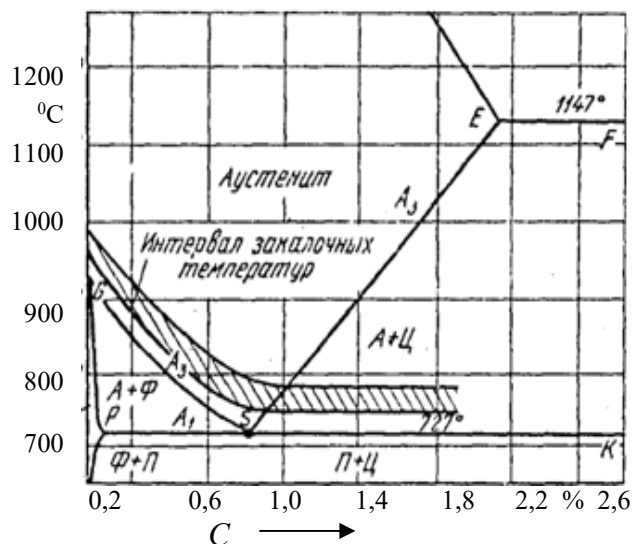


Рисунок 8.2 – Диаграмма Fe – Fe₃C

Все доэвтектоидные стали ($< 0,8\text{ \% C}$) должны подвергаться полной закалке. Нагрев осуществляется на $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше точки A_{c3} (см. рисунок 8.2, линия GS). При этом сталь с исходной структурой феррита и перлита при нагреве переходит в аустенитное состояние. При последующем охлаждении со скоростью выше критической (см. рисунок 8.3) аустенит превращается в закалочную структуру – мартенсит. Такой нагрев является оптимальным, т. к.

обеспечивает мелкое зерно аустенита при нагреве и мелкоигльчатый мартенсит с вязким изломом после охлаждения.

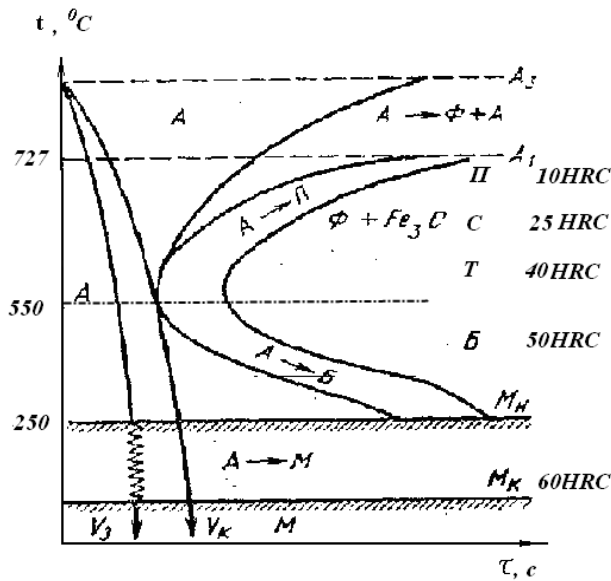


Рисунок 8.3 – Диаграмма изотермического превращения переохлажденного аустенита

Нагрев доэвтектоидной стали значительно выше точки A_{c3} приводит к перегреву (укрупнению зерна аустенита), а последующее быстрое охлаждение приводит к получению крупноигльчатого мартенсита, что ухудшает вязкость стали. Перегрев стали, кроме того, способствует обезуглероживанию поверхности и образованию трещин при закалке. Этого следует избегать.

Нагрев доэвтектоидной стали в область межкритических температур (выше A_{c1} , но ниже A_{c3}) не обеспечит растворения исходного феррита в аустените. Аустенит при закалке превратится в мартенсит, а оставшийся феррит снизит прочностные свойства стали. Поэтому такой нагрев для доэвтектоидной стали является недостаточным (неполная закалка), структурные изменения в доэвтектоидных сталях при закалке происходят по схеме, изображенной на рисунке 8.4.

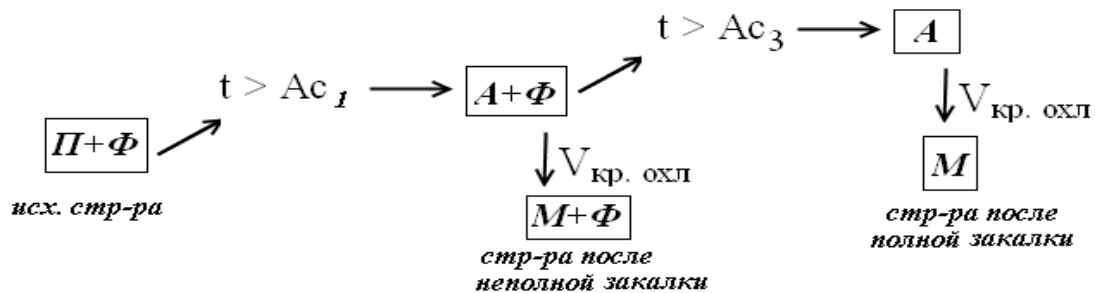


Рисунок 8.4 – Схема структурных изменений при закалке доэвтектоидных сталей

Заэвтектоидные стали ($> 0,8 \% C$) подвергаются неполной закалке, т. е. нагреваются до температуры на $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше точки A_{c1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$). При таком нагреве из перлита образуется аустенит, а избыточный цементит сохраняется. После охлаждения со скоростью выше критической аустенит превращается в структуру закаленной стали – мартенсит, а цементит без изменения сохра-

няется в мартенситной основе и обеспечивает большую твердость и износостойкость инструментальных сталей.

В реальных условиях наблюдаются нарушения режимов нагрева и имеет место неполная закалка изделий из доэвтектоидных сталей (вследствие недостаточной температуры печи), а также полная закалка изделий из заэвтектоидных сталей (вследствие повышенной температуры печи), приводящие к браку термообработки – снижению твердости.

В заэвтектоидных сталях структурные превращения при закалке происходят по следующей схеме (рисунок 8.5).



Рисунок 8.5 – Схема структурных изменений при закалке заэвтектоидных сталей

Таким образом, для заэвтектоидных сталей оптимальной будет неполная закалка.

Нагрев выше точки A_{cm} (линия SE) приводит к образованию высокоуглеродистого аустенита (вследствие растворения в нем цементита), обеспечивающего после охлаждения крупноигльчатый (вследствие перегрева) мартенсит и большее количество остаточного аустенита в связи с тем, что в таком (высокоуглеродистом) аустените конец мартенситного превращения (рисунок 8.6, точка M_{κ}) сдвигается в область отрицательных температур.

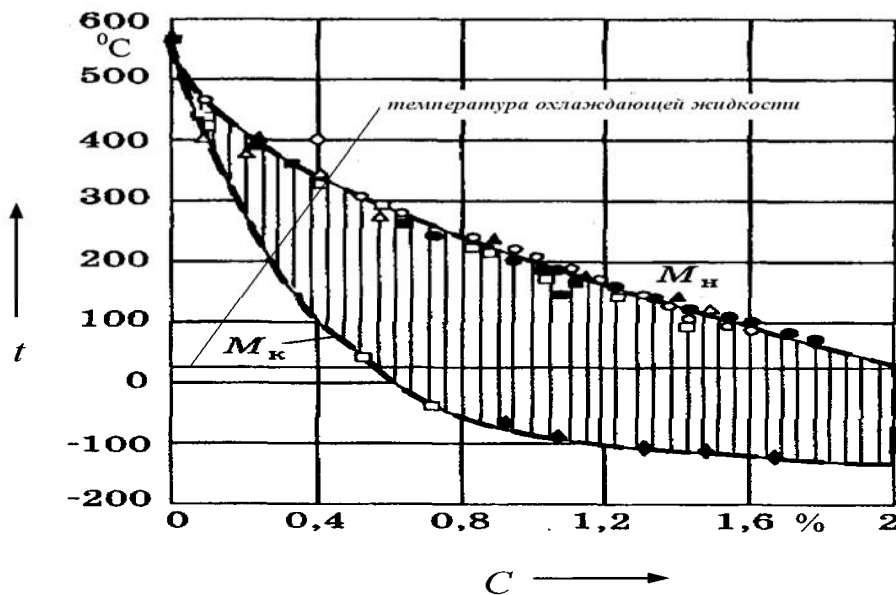


Рисунок 8.6 – Изменение температурного интервала мартенситного превращения в зависимости от содержания углерода в аустените

В соответствии с этой схемой после закалки сталей с содержанием углерода более 0,5 % в структуре всегда будет присутствовать остаточный аустенит (см. точку пересечения линий конца мартенситного превращения и температуры охлаждающей жидкости). Остаточный аустенит ухудшает свойства закаленной стали.

Нагрев под закалку производится в печах периодического и непрерывного действия. Для предотвращения обезуглероживания и окисления поверхностного слоя заготовок применяются ванны, в которых изделие нагревается в расплавленных солях или металлах.

Скорость охлаждения регулируется видом охлаждающей среды, в качестве которой наиболее часто применяются минеральное масло, вода, водные растворы солей, кислот, щелочей. Для углеродистых сталей необходимая скорость достигается при охлаждении в воде (в водных растворах), для легированных – в масле или на воздухе.

Мартенситное превращение носит бездиффузионный характер, т. е. не сопровождается диффузионным перераспределением углерода и железа в решетке. При мартенситном превращении происходит лишь переход кубической гранцентрированной решетки аустенита (γ -твердого раствора) в тетрагональную объемно-центрированную решетку α -твердого раствора. Особенность мартенситного превращения состоит в том, что весь углерод, находящийся в аустените (γ -твердом растворе), переходит в α -твердый раствор. Пересыщение углеродом α -твердого раствора вызывает искажение ОЦК решетки Fe_α , т. е. приводит к образованию тетрагональной ($c/a > 1$) кристаллической решетки. Поэтому структура закаленной стали – **мартенсит** – представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе.

Особенностью мартенсита является его высокая твердость и прочность. В сталях с содержанием 0,6 %...0,7 % С твердость мартенсита достигает ~60 HRC. Высокая твердость мартенсита объясняется большими внутренними напряжениями в растянутой решетке Fe_α , созданием микро- и субмикроскопической неоднородности строения с равномерным ее распределением по объему, т. е. большим числом нарушений кристаллического строения.

В случае охлаждения аустенита со скоростями, меньшими критической, вместо мартенсита в интервале температур 720 °С ...550 °С образуются ферритоцементитные смеси (см. рисунок 8.3), получившие название перлит, сорбит, троостит (П, С, Т). По мере увеличения скорости охлаждения дисперсность смеси возрастает, что приводит к повышению твердости и прочности. Наиболее грубой смесью является перлит, максимальной дисперсностью обладает троостит.

Внутренние напряжения, возникающие при закалке. Поверхности раздела кристаллитов мартенсита представляют собой труднопреодолимые препятствия для скольжения дислокаций при деформации кристалла. Перемещению дислокаций тормозят находящиеся в решетке мартенсита атомы углерода, создающие статические искажения решетки (напряжения III рода). Все это определяет высокую твердость структуры закаленной стали – мартенсита. С увеличением содержания углерода в мартенсите наряду с повышением твердости возрастает и хрупкость.

Мартенситное превращение, происходящее при закалке стали, приводит к увеличению удельного объема, что является одной из основных причин возникновения больших внутренних (*структурных*) напряжений II рода, вызывающих деформацию изделий или даже появление трещин. Перепад температур по сечению закаливаемого материала приводит к образованию *термических* внутренних напряжений (I рода). Эти напряжения, возникающие при закалке (структурные и термические), тем больше, чем выше температура закалки и скорость охлаждения в мартенситном интервале температур ($M_n - M_k$).

Контрольные вопросы

1 Дать определения закалке, полной и неполной, указать области их применения. Описать превращения, протекающие в сталях при полной и неполной закалках, и указать образующиеся при этом структуры.

2 Дать определение мартенситу, указать особенности мартенситного превращения и причины повышения прочностных свойств.

3 Описать превращения, протекающие в стали в случае охлаждения аустенита со скоростями, меньшими критической.

4 Указать, от чего зависит количество остаточного аустенита в закаленной стали и причину его появления.

5 Дать классификацию внутренних напряжений и причины их возникновения.

Задание

1 Начертить стальной участок диаграммы состояния Fe–Fe₃C и нанести на него температурные интервалы нагрева стали под закалку.

2 Начертить диаграмму изотермического распада аустенита и нанести на нее скорости охлаждения, обеспечивающие получение структуры мартенсита и феррито-цементитных смесей.

3 Описать фазовые превращения при полной и неполной закалках сталей, записать образующиеся при этом структуры в таблицу 8.1 и обосновать выбор режима их термической обработки.

4 Произвести полную и неполную закалку стали 40, измерить твердость и занести данные в таблицу 8.2, указав структуры закаленной стали.

Таблица 8.1 – Влияние вида закалки на микроструктуру стали

Марка стали	Структура после полной закалки	Структура после неполной закалки
20		
30		
45		
60		
70		
80		
У7		
У8		
У9		
У13		

Таблица 8.2 – Влияние условий термообработки на твердость и структуру стали 40

Условие закалки		Твердость	Структура
Температура, °С	Среда		
Полная закалка	Масло		
	Вода		
Неполная закалка	Масло		
	Вода		
Без термической обработки			

9 Лабораторная работа № 9. Отпуск закаленной стали

Цель работы: изучение теории и технологии отпуска закаленной стали; проведение заключительной термической обработки – отпуска закаленной стали.

Оборудование и инструмент: печи SNOL 02/1250; стальные заготовки для отпуска; твердомер Роквелла ТР 5014.

Отпуском называется вид термической обработки, заключающийся в нагреве закаленной стали до температуры ниже критической точки A_1 , выдержке при этой температуре и последующем охлаждении с заданной скоростью.

Отпуск является окончательной операцией термической обработки, в результате которой снимаются внутренние закалочные напряжения (термические и структурные) и формируется требуемый комплекс механических свойств.

После закалки сталь имеет структуру мартенсита с некоторым количеством аустенита остаточного. Эти фазы при комнатной температуре являются метастабильными (неустойчивыми) и сохраняются только по той причине, что в этих условиях отсутствует диффузионная подвижность атомов железа и углерода. Повышение температуры, активизирующее диффузию, приводит к распаду этих фаз, конечным продуктом которого в равновесных условиях должна являться феррито-цементитная смесь. Степень распада мартенсита и аустенита остаточного при отпуске определяется температурой обработки. При этом в зависимости от температуры нагрева в процессе отпуска имеют место четыре превращения.

Первое превращение при отпуске – при температурах от 80 °С до 250 °С происходит распад мартенсита (пересыщенного углеродом α -твердого раствора), обусловленный выделением части углерода из решетки мартенсита и образованием ϵ -карбидов с гексагональной решеткой (Fe_3C). Пластинки ϵ -карбидов когерентно связаны с решеткой α -твердого раствора (мартенсита). Образующаяся после первого превращения при отпуске структура, представляющая собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе (но степень пересыщения меньше,

чем непосредственно после закалки) и когерентно связанные с ним дисперсные выделения ϵ -карбидов, называется *отпущенным мартенситом* (рисунок 9.1).

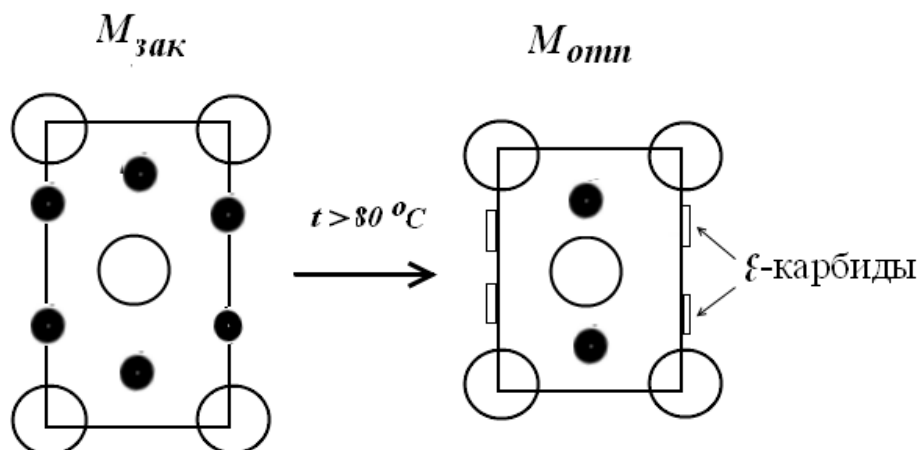


Рисунок 9.1 – Схема образования мартенсита отпуска при нагреве

Уменьшение количества растворенного углерода снижает тетрагональность решетки мартенсита. Некоторое снижение внутренних напряжений приводит к повышению вязкости материала. Твердость, прочность и износостойкость при этом практически не изменяются. Низкотемпературный отпуск предназначен для инструментальных сталей, а также для деталей машин, прошедших цементацию, нитроцементацию.

Структура «мартенсит отпуска» характерна для инструментов, подвергаемых ударным нагрузкам, например, клеймам, зубилам, топорам, молоткам, вырубным пуансонам. Эти инструменты изготавливают из доэвтектоидных сталей У7, 6ХС, 7ХС, отсутствие цементита в которых обеспечивает достаточную вязкость.

Второе превращение при отпуске – превращение аустенита остаточного в мартенсит отпущенный. При температурах отпуска $150\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ остаточный аустенит обедняется углеродом и легирующими элементами. В результате этого температуры точек M_n и M_k повышаются (рисунок 9.2). Например, при закалке стали У12 температура конца мартенситного превращения составляет $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к образованию большого количества остаточного аустенита (около 50 %).

В процессе нагрева при отпуске аустенит остаточный стали У12 обедняется углеродом до 0,4 %, что приводит к повышению температуры конца мартенситного превращения от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (т. е. на $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ согласно рисунку 9.2). При извлечении заготовки из печи температура ее снижается от $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к превращению аустенита в мартенсит закалочный. В процессе дальнейшего снижения температуры (до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) завершается первое превращение при отпуске и образуется мартенсит отпуска. Таким образом, продуктом распада остаточного аустенита является гетерогенная смесь, состоящая из мартенсита отпуска и цементита (Fe_3C).

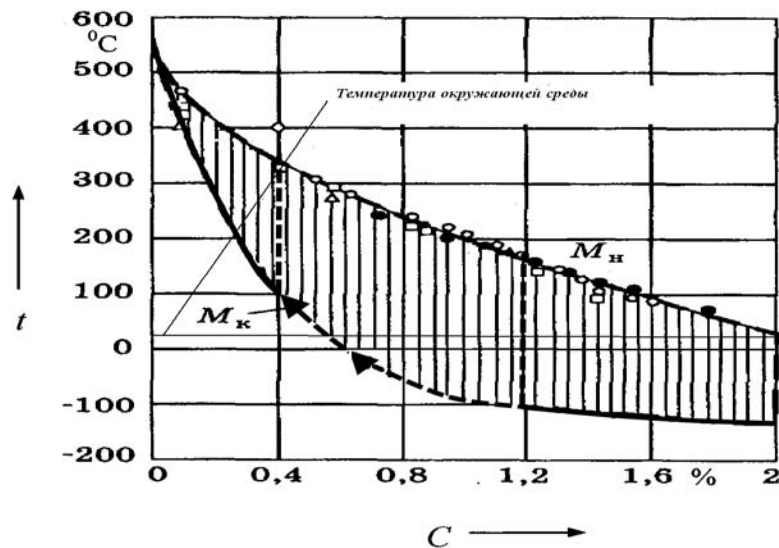


Рисунок 9.2 – Изменение температуры окончания мартенситного превращения в стали У12 при снижении содержания углерода в аустените остаточном

Третье превращение (превращение мартенсита отпуска в тонкую феррито-цементитную смесь). При нагреве закаленной стали до температур выше 300 °С из пересыщенного твердого раствора углерода в α -железе (мартенсита) выходит весь избыточный углерод и он превращается в феррит, а покинувший решетку мартенсита углерод образует тонкие пластинки цементита, которые не имеют когерентной связи с решеткой мартенсита. Это приводит к снижению внутренних напряжений и вызывает значительное уменьшение твердости и прочности (≈ 40 HRC).

К концу третьего превращения образуется дисперсная (тонкая) феррито-карбидная смесь, называемая **трооститом отпуска**. Характерной особенностью этой структуры является **высокий предел упругости**, что обуславливает использование ее при изготовлении упругих элементов: пружин, рессор.

Четвертое превращение (коагуляция и сфероидизация карбидов). Повышение температуры отпуска до 500 °С...600 °С не вызывает фазовых превращений, но вследствие развития диффузионных процессов реализуется стремление системы к снижению свободной энергии из-за уменьшения поверхностной энергии в процессе объединения групп мелких зерен в более крупные. Поэтому при этих температурах основными процессами являются начавшиеся на стадии третьего превращения коагуляция и сфероидизация карбидов. Образующаяся структура представляет собой более грубую (крупную), чем после третьего превращения, феррито-карбидную смесь **зернистого типа**, называемую **сорбитом отпуска**. Укрупнение зерен приводит к снижению прочностных свойств (до 25 HRC), но округление формы зерен обуславливает снижение напряжений, возникающих в процессе нагрузок, повышение ударной вязкости, что, в совокупности, приводит к **повышению надежности** изделий от внезапного хрупкого разрушения. Сорбит отпуска используют для изготовления **ответственных деталей машин**, работающих в тяжелых условиях нагружения

(знакопеременных нагрузках и сложных напряженных состояниях), например: валов, осей, полуосей, шатунов, коленчатых валов и пр.

Перлит, сорбит и троостит являются механической смесью феррита и цементита, но размер зерен каждый раз уменьшается в 5 раз при переходе от перлита к сорбиту и от сорбита к трооститу.

Общая закономерность изменения механических свойств при повышении температур отпуска заключается в снижении прочностных характеристик (σ_s , НВ) и возрастании характеристик пластичности (δ , ψ) и особенно ударной вязкости (КСУ).

Виды отпуска. В зависимости от температуры различают три разновидности отпуска: низкий, средний и высокий.

Низким отпуском называют нагрев закаленной стали до температур, не превышающих 200 °С. Такой отпуск практически не вызывает снижения твердости закаленной стали; образующаяся структура – отпущенный мартенсит (плюс цементит вторичный в заэвтектоидных сталях). Такой отпуск рекомендуется при термической обработке инструментальных сталей и цементированных деталей.

Средним отпуском называют нагрев закаленной стали до температур 350 °С...450 °С. Такой отпуск вызывает снижение твердости до 40 HRC; образующаяся структура – троостит отпуска. Этот вид отпуска рекомендуется при термической обработке рессор и пружин.

Высоким отпуском называют нагрев закаленной стали до температур 500 °С...600 °С. Такой отпуск вызывает значительное снижение твердости закаленной стали (до 25 HRC), но повышение вязкости; образующаяся структура – сорбит отпуска.

Сорбит отпуска обеспечивает хорошее сочетание свойств – достаточной прочности, вязкости и пластичности. Поэтому закалка стали с последующим высоким отпуском носит название термического **улучшения**. Эта обработка рекомендуется для среднеуглеродистых (**улучшаемых**) конструкционных сталей, применяемых для изготовления ответственных деталей машин.

Контрольные вопросы

- 1 Дать определение отпуску, указать виды отпуска и область их применения.
- 2 Изложить сущность и механизм четырех превращений, протекающих в процессе отпуска закаленной стали, указать образующиеся при этом структуры, их свойства и области применения.

Задание

- 1 Изучить и описать основные превращения при отпуске.
- 2 Определить твердость образцов после отпуска, результаты экспериментов свести в таблицу 9.1 и сделать соответствующие выводы.
- 3 Нарисовать схему и описать процессы, обеспечивающие протекание второго превращения при отпуске.

Таблица 9.1 – Влияние температуры отпуска на твердость и микроструктуру стали 40

Температура отпуска, °С	Твердость, HRC	Микроструктура
Без отпуска		
200		
400		
600		

10 Лабораторная работа № 10. Изучение зависимости между структурой и свойствами стали после различных видов термической обработки

Цель работы: изучение методики назначения режимов термической обработки и основных фазовых превращений, протекающих в сталях при отжиге, нормализации, закалке и отпуске.

Оборудование и инструмент: микроскринер МС ЛабоМет-1.

Термической обработкой называют технологические процессы, состоящие из нагрева и охлаждения металлических изделий с целью изменения их структуры и свойств. При термической обработке стали протекают фазовые превращения. Они вызваны тем, что вследствие изменившихся условий (температуры) новое состояние оказывается более устойчивым, чем старое, т. к. обладает меньшим запасом свободной энергии. Характер фазовых превращений зависит от скорости охлаждения. Превращения, протекающие при медленном охлаждении, близкие к равновесным, описываются диаграммой «железо – цементит». Участок диаграммы «железо – цементит», необходимый для назначения термической обработки стали, представлен на рисунке 10.1.

Критические точки обозначаются буквой «А» (от фр. Arrêt – остановка). Точка A_1 лежит на линии PSK и соответствует превращению «аустенит – перлит».

Точка A_3 лежит на линии GSE и соответствует началу выделения (или окончанию растворения) феррита в доэвтектоидных сталях или цементита вторичного в заэвтектоидных сталях. Чтобы отличить критическую точку при нагреве от критической точки при охлаждении, после буквы «А» ставят буквы «с» и «r», соответственно, Ac_1 , Ar_1 , Ac_3 , Ar_3 . Точку Ac_3 для заэвтектоидной стали часто обозначают как точку Ac_m .

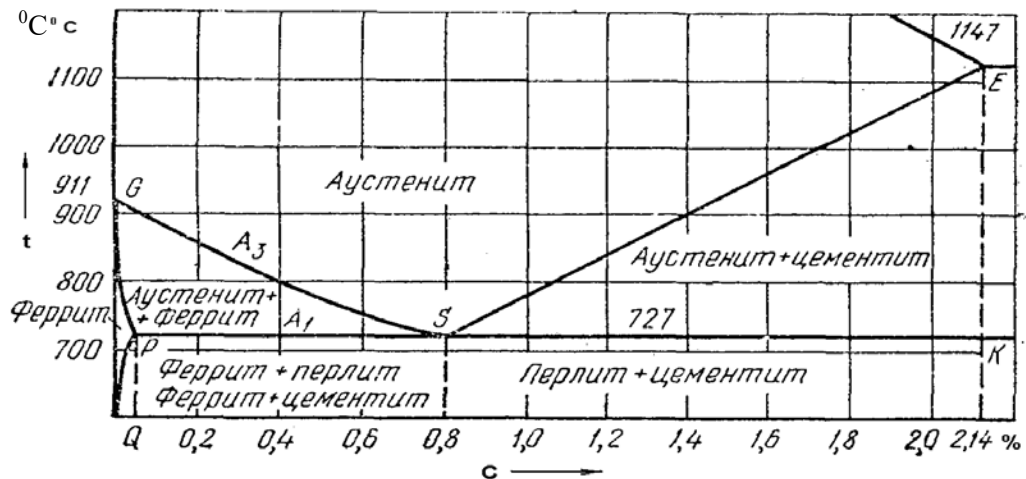


Рисунок 10.1 – «Стальной» участок диаграммы «железо – цементит»

Основными видами термической обработки стали являются *отжиг первого рода, отжиг второго рода, закалка, отпуск*.

Отжиг первого рода. Отличительная особенность отжига первого рода состоит в том, что его проведение не обусловлено фазовыми превращениями. Основными параметрами отжига первого рода являются температура нагрева и время выдержки при этой температуре. Скорости нагрева и охлаждения при этом имеют второстепенное значение. Отжиг первого рода устраняет отклонения от равновесного состояния, имеющиеся в стали после литья, обработки давлением, сварки и других технологических операциях. В зависимости от того, какие отклонения от равновесного состояния устраняются, различают *гомогенизационный, рекристаллизационный* и *отжиг для снятия внутренних напряжений*.

Гомогенизационный отжиг предназначен для устранения дендритной ликвации в литой стали. При этом сталь подвергается длительной выдержке (до 48 ч) при 1000 °С. При высокой температуре подвижность атомов в кристаллической решетке высокая и с течением времени за счет процессов диффузии происходит постепенное выравнивание химического состава. Однако усреднение химического состава происходит в пределах одного зерна, т. е. устраняется в основном дендритная ликвация. После гомогенизации металл обладает повышенной пластичностью и легко поддается пластической деформации.

Рекристаллизационный отжиг. Холодная пластическая деформация вызывает изменение структуры металла и его свойств. Сдвиговая деформация вызывает увеличение плотности дефектов кристаллической решетки, таких как вакансии, дислокации. Все эти процессы ведут к тому, что прочность металла постепенно увеличивается, пластичность падает, т. е. возникает наклеп (нагартовка). Дальнейшая деформация такого металла невозможна, т. к. происходит его разрушение. Для снятия эффекта упрочнения применяют рекристаллизационный отжиг, т. е. нагрев металла до температур выше начала рекристаллизации, выдержку с последующим медленным охлаждением. Температура отжига на 100 °С...200 °С выше температуры рекристаллизации, определяемой из выражения $T_{рек} = 0,4 \cdot T_{пл}$.

Продолжительность такого отжига зависит от размеров детали и в среднем составляет от 0,5 до 2 ч. В процессе рекристаллизационного отжига происходит растворение старых вытянутых зерен, образование зародышей новых зерен и последующий рост этих зародышей. Постепенно старые деформированные зерна исчезают. Количество дефектов в кристаллической решетке уменьшается, наклеп устраняется, и металл возвращается в исходное состояние.

Рекристаллизационный отжиг может применяться как предварительная, промежуточная, так и как окончательная термообработка. Как предварительная термообработка он применяется перед холодной деформацией, если исходное состояние металла неравновесное и имеет какую-то степень упрочнения. Как промежуточная операция рекристаллизационный отжиг применяется между операциями холодной деформации, если суммарная степень деформации слишком велика и запасов пластичности металла не хватает. Как окончательный вид отжига его применяют в том случае, если потребитель требует поставки полуфабрикатов в максимально пластичном состоянии.

Отжиг для снятия внутренних напряжений. Внутренние напряжения в металле могут возникать в результате различных видов обработки. Это могут быть *термические* напряжения, образовавшиеся в результате неравномерного нагрева или различной скорости охлаждения отдельных частей детали (после горячей деформации, литья, сварки, обработки резанием). Это могут *структурные* напряжения, появившиеся в результате структурных превращений, происходящих внутри детали в различных местах с различной скоростью. Внутренние напряжения в металле могут достигать большой величины и, складываясь с рабочими, могут превышать предел прочности и приводить к разрушению. Этот отжиг проводится при температурах ниже температуры рекристаллизации: $t_{отж} = 0,2...0,3 T_{пл}$. Повышенная диффузия облегчает скольжение дислокаций и, под действием внутренних напряжений, происходит их перераспределение, т. е. из мест с повышенным уровнем внутренних напряжений дислокации перемещаются в области с пониженным уровнем. Происходит как бы разрядка внутренних напряжений. При комнатной температуре этот процесс будет длиться в течение нескольких лет. Увеличение температуры резко увеличивает скорость разрядки, и продолжительность такого отжига составляет несколько часов.

Отжиг второго рода. При отжиге второго рода сталь нагревается на 30 °С...50 °С выше критических точек A_{c1} или A_{c3} с последующим медленным охлаждением, как правило, вместе с печью. На диаграмме изотермического превращения аустенита (рисунок 10.2) скорость охлаждения при отжиге соответствует кривой V_1 .

В зависимости от температуры нагрева стали различают *полный* и *неполный* отжиг. При полном отжиге нагрев ведется на 30 °С...50 °С выше точки A_{c3} , при неполном – в область межкритических температур ($A_{c1} < t_{нагрева} < A_{c3}$). Основными целями отжига являются перекристаллизация стали и устранение внутренних напряжений. Полный отжиг приводит к полной перекристаллизации (все составляющие исходной структуры при температуре нагрева превращаются в аустенит). При неполном отжиге перекристаллизацию испытывает только

перлит; феррит (в доэвтектоидной стали) и цементит вторичный (в заэвтектоидной стали) перекристаллизовываются частично.

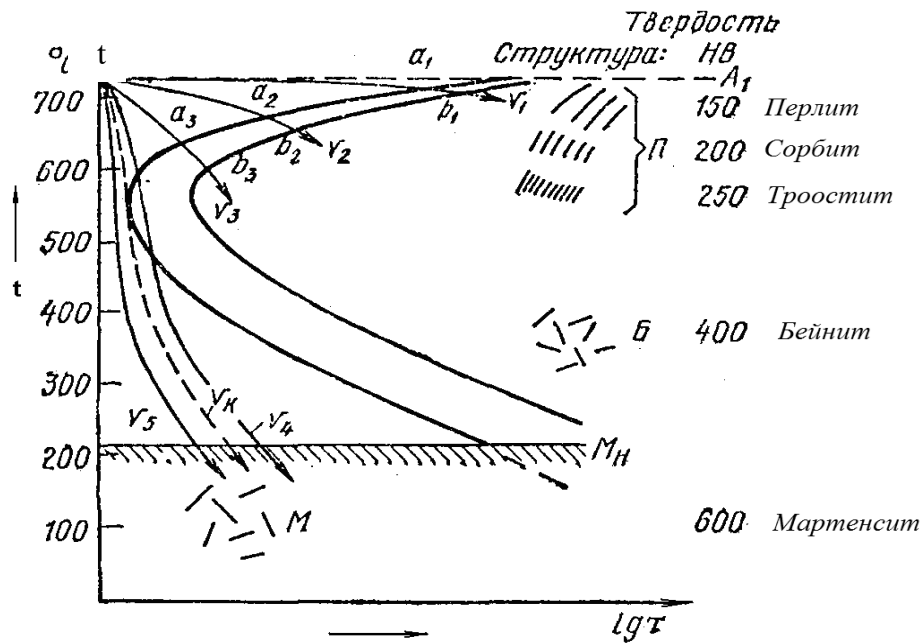


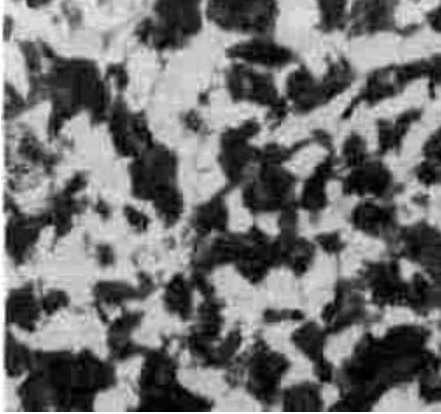
Рисунок 10.2 – Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали

Отжиг приводит к снижению твердости, повышению пластичности и получению однородной мелкозернистой структуры. Для доэвтектоидных сталей, как правило, проводится **полный отжиг**, для заэвтектоидных – **неполный**.

На структуру стали оказывает влияние температура отжига. Отжиг при температурах, значительно превышающих A_{c3} , приводит к перегреву стали. У перегретой стали величина, форма и расположение зерен будут иными. Так, при нагреве стали 45 до 1000 °С (нормальный отжиг проводится при 860 °С) зерна аустенита вырастают до значительных размеров. В результате этого при охлаждении образуются крупные зерна перлита, а феррит выделяется в виде крупных игл (пластин) внутри перлита по определенным кристаллографическим плоскостям (рисунок 10.3). Такая структура носит название **видманштетовой**. Сталь с видманштетовой структурой имеет низкую ударную вязкость. Перегретую крупнозернистую сталь можно исправить путем нормального отжига. Видманштетова структура характерна также для литой стали, для сварных швов, для ковальной стали, если ковка закончилась при высокой температуре.

При неполном отжиге заэвтектоидных сталей нагрев проводится на 30 °С ... 50 °С выше A_{c1} . Так как в заэвтектоидных сталях количество цементита вторичного по сравнению с перлитом относительно невелико, при неполном отжиге они испытывают практически полную перекристаллизацию. Не растворившиеся при нагреве частицы цементита вторичного (присутствующие в структуре в небольшом количестве) являются центрами кристаллизации для цементита, образующегося при последующем охлаждении ниже точки A_{c1} в результате эвтектоидного распада аустенита. В этом случае цементит принимает зернистую форму. Такой отжиг часто называют **сфероидизирующим**.

а)



б)



а – при 860 °С (правильный режим); б – при 1000 °С (перегрев)

Рисунок 10.3 – Микроструктура стали 45 после отжига

В результате сфероидизирующего отжига образуется зернистый перлит (рисунок 10.4). Изменение формы включений цементита позволяет повышать вязкость стали; облегчает процесс обработки резанием. Такая структура стали является идеальной перед закалкой.

Разновидностью отжига является **нормализация**. Особенностью нормализации является то, что охлаждение проводится на воздухе. После нормализации среднеуглеродистые стали имеют тот же фазовый состав, что и после отжига, однако дисперсность фаз в этом случае выше в 5 раз, вместо перлита образуется структура, близкая к сорбиту (рисунки 10.5 и 10.6). Это приводит к повышению твердости и прочности материала, но не повышает вязкость и пластичность, в отличие от **сорбита отпуска**, у которого цементит имеет округлую форму, а не пластинчатую (см. рисунки 10.5 и 10.7).

Нормализация является более дешевой термической обработкой, чем отжиг или улучшение.

Для низкоуглеродистых сталей ($C < 0,3 \%$) разница в структуре и свойствах материалов, подвергнутых отжигу и нормализации, невелика. Эти стали рекомендуется подвергать не отжигу, а нормализации.

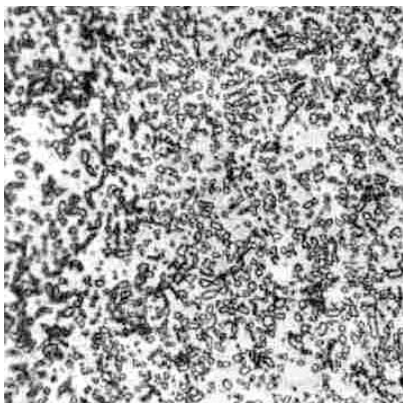


Рисунок 10.4 – Микроструктура зернистого перлита заэвтектоидной стали

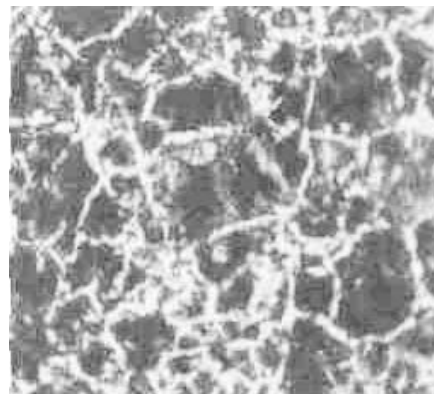
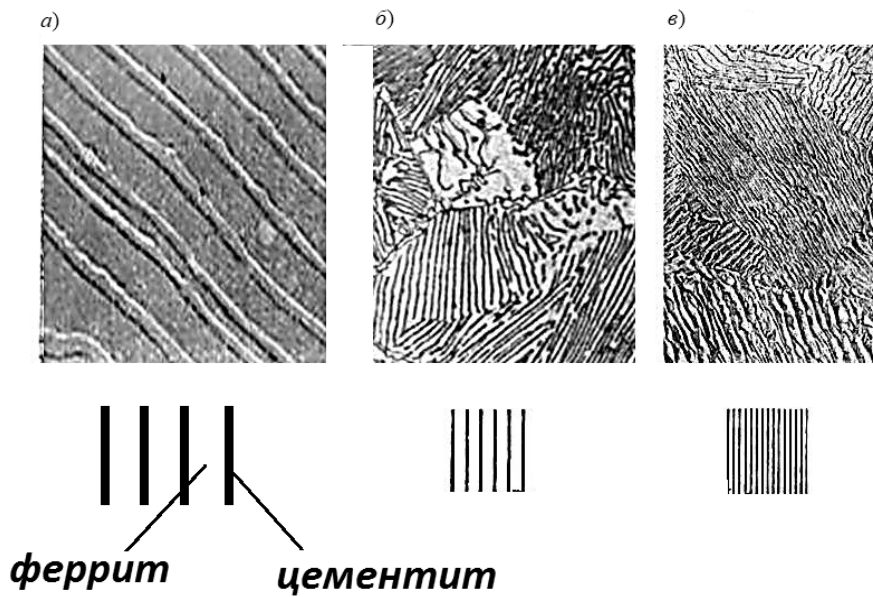


Рисунок 10.5 – Микроструктура стали 45 после нормализации (цементит в форме пластин)

Для среднеуглеродистых сталей различие в свойствах нормализованной и отожженной сталей более значительно. Для этих сталей нормализация часто заменяет более дорогую операцию – улучшение, состоящую в двойной обработке, включающей закалку и высокий отпуск. Однако пластинчатая форма зерен цементита, образующегося в результате нормализации, не обеспечивает высокую пластичность и ударную вязкость, в отличие от круглых зерен сорбита отпуска (см. рисунок 10.7).

Закалкой называется такой вид термической обработки, который заключается в нагреве на $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше точки A_{c3} или A_{c1} , выдержке для завершения фазовых превращений и последующем охлаждении со скоростью выше критической V_k . При охлаждении со скоростью выше критической, аустенит переохлаждается ниже температуры точки M_n , при которой атомы железа и углерода практически теряют диффузионную подвижность, и происходит бездиффузионная перестройка гранцентрированной решетки аустенита в тетрагональную объёмно-центрированную решетку мартенсита. При этом весь углерод остается в твердом растворе $\text{Fe}_\gamma(\text{C}) \rightarrow \text{Fe}_\alpha(\text{C})$. Таким образом, **мартенсит** является пересыщенным твердым раствором углерода в α -железе. Он имеет игольчатое строение. Размер игл мартенсита определяется величиной исходного зерна аустенита. Чем больше зерно аустенита, тем крупнее размер игл образовавшегося мартенсита (рисунок 10.8). При нормальной закалке образуется мелкоигльчатый мартенсит. Высокая твердость и прочность мартенсита объясняется искажением решетки вследствие образования пересыщенного твердого раствора.

В зависимости от температуры нагрева различают полную и неполную закалку. В случае нагрева под неполную закалку (выше A_{c1} , но ниже A_{c3}) доэвтектоидная сталь имеет структуру аустенита и феррита, а заэвтектоидная – аустенита и цементита вторичного. Количество избыточных фаз (феррита или цементита) зависит от температуры закалки. Чем ближе температура нагрева к точке A_{c3} , тем меньше в структуре закаленной стали избыточных фаз. При увеличении содержания углерода в аустените снижаются температуры начала и конца мартенситного превращения (рисунок 10.9, линии M_n , M_k).



а – перлит (15 HRC); б – сорбит (25 HRC); в – троостит (40 HRC)

Рисунок 10.6 – Различие ферритно-цементитных структур

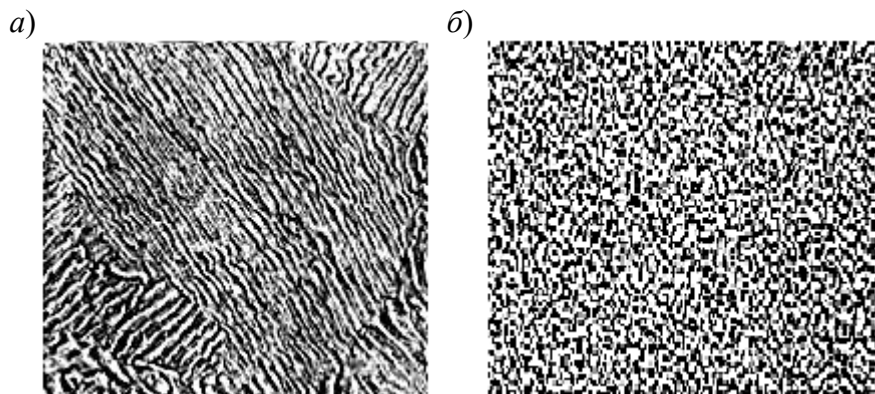


Рисунок 10.7 – Отличие сорбита, получаемого нормализацией (а), от сорбита отпуска (б), образующегося в результате улучшения

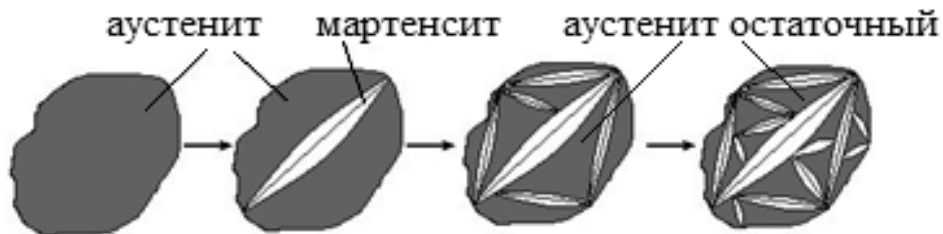


Рисунок 10.8 – Схема образования зерен мартенсита из аустенита

Для стали У12 точка конца мартенситного превращения сдвигается в область отрицательных температур ($M_k = -100\text{ }^{\circ}\text{C}$), таким образом, структура после закалки наполовину состоит из аустенита остаточного.

В соответствии с этой схемой после закалки сталей с содержанием углерода более 0,5 % в структуре всегда будет присутствовать остаточный аустенит

(см. точку пересечения линий конца мартенситного превращения и температуры охлаждающей жидкости). Остаточный аустенит ухудшает свойства закаленной стали.

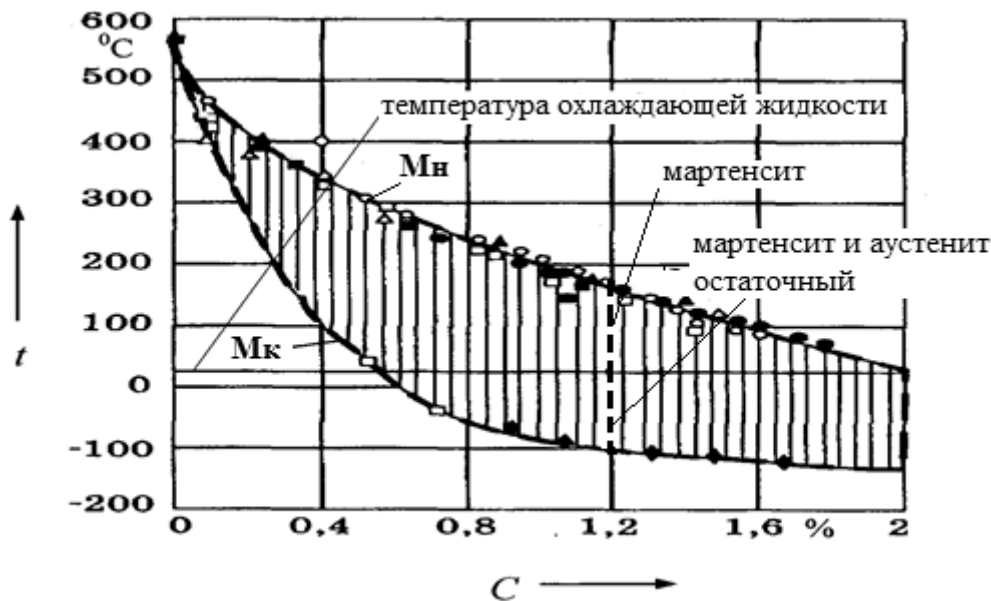


Рисунок 10.9 – Изменение температурного интервала мартенситного превращения в зависимости от содержания углерода в аустените

После закалки сталь подвергают отпуску. Под *отпуском* понимается совокупность операций, заключающихся в нагреве закаленной стали до температуры ниже критической точки A_{c1} , выдержке и охлаждении до комнатной температуры. Практическими целями отпуска являются уменьшение закалочных напряжений, получение нужного комплекса механических свойств (прочности, пластичности и вязкости).

Отпуск приводит к снижению твердости, прочности и повышению пластичности. Причем влияние на указанные свойства тем больше, чем выше температура отпуска.

В зависимости от температуры нагрева различают три разновидности отпуска: *низкий, средний и высокий*.

Низкий отпуск проводят путем нагрева закаленной стали до температур ≈ 200 °С. При этом мартенсит закалочный превращается в мартенсит отпущенный. Низкий отпуск частично снимает внутренние напряжения и несколько повышает вязкость. Твердость при низком отпуске практически не снижается. Такой отпуск наиболее часто применяется при термической обработке инструментальных сталей и изделий после цементации.

При **среднем отпуске** нагрев закаленной стали производится до температур ≈ 400 °С, при этом образуется структура троостита отпуска. Троостит отпуска состоит из дисперсных частиц феррита и цементита. Сталь со структурой троостита отпуска имеет высокий предел упругости. Поэтому средний отпуск обычно применяют при термической обработке рессор и пружин.

При **высоком отпуске** нагрев закаленной стали производится до температур ≈ 600 °С; образуется структура – сорбит отпуска, представляющий собой

смесь укрупненных зерен феррита и цементита округлой формы. Сорбит отпуска имеет хорошее сочетание свойств: прочность, пластичность и вязкость. Твердость сорбита составляет 25...30 HRC. Закалка стали с последующим высоким отпуском на сорбит носит название термического улучшения. Эта обработка рекомендуется для среднеуглеродистых конструкционных сталей.

Контрольные вопросы

- 1 Дать определения термической обработке, отжигу первого рода, отжигу второго рода, закалке, отпуску.
- 2 Описать разновидности отжига первого и второго рода, указать их режимы и назначение.
- 3 Указать преимущества и недостатки нормализации.
- 4 Указать разницу и сходство структур перлита, сорбита и троостита.

Задание

- 1 Дать определение основным видам термической обработки, указать их цель.
- 2 Описать разновидности отжига первого и второго рода, указать их режимы и назначение.
- 3 Изучить влияние отпуска на фазовые превращения и характер образующихся микроструктур.
- 4 Зарисовать структуры предложенных шлифов, указать фазы.

11 Лабораторная работа № 11. Химико-термическая обработка стали

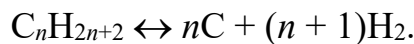
Цель работы: изучение технологических процессов основных видов химико-термической обработки и структуры поверхностных слоев стали.

Оборудование и инструмент: микроскринер МС ЛабоМет-1.

Химико-термической обработкой (ХТО) называют технологические процессы, приводящие к диффузионному насыщению поверхностного слоя деталей различными элементами. ХТО применяют для повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, сопротивления усталости и контактной выносливости. При ХТО деталь помещают в среду, богатую насыщающим элементом. При ХТО происходят три элементарных процесса: **диссоциация**, **абсорбция** и **диффузия**. **Диссоциация** протекает в газовой среде и состоит в распаде молекул и образовании активных атомов диффундирующего элемента. **Абсорбция** заключается в поглощении поверхностью металла насыщающего элемента. Под **диффузией** понимают проникновение элемента вглубь насыщаемого металла за счет теплового движения атомов. В результате ХТО образуется диффузионный слой.

Наибольшая концентрация насыщаемого элемента наблюдается на поверхности изделия, по мере удаления от поверхности она снижается. Фазовые и структурные изменения, происходящие при ХТО в диффузионном слое, и его строение определяются изотермическим разрезом диаграммы состояния «обрабатываемый металл – насыщающий элемент» при температуре диффузионного насыщения.

Цементация стали – технологический процесс диффузионного насыщения углеродом поверхностного слоя. Цель цементации – получить детали машин с твердой и износоустойчивой поверхностью при сохранении вязкой, хорошо выдерживающей динамические нагрузки сердцевины. Цементированные изделия предназначены для работы при знакопеременных нагрузках и в условиях трения и износа. Цементации подвергают зубчатые колеса, валы, оси, распределительные валики, кулачки, червяки, изготовленные, как правило, из низкоуглеродистой стали. Цементация проводится путем нагрева и длительной выдержки деталей в науглероживающей среде при температуре аустенитного состояния стали 900 °С...950 °С. Цементацию наиболее часто осуществляют в газовой среде или в твердом карбюризаторе. При газовой цементации образование атомарного углерода происходит в результате диссоциации предельных углеводородов:



При цементации в твердом карбюризаторе атомарный углерод образуется в результате диссоциации оксида углерода:



Обычно цементацию проводят таким образом, чтобы содержание углерода в поверхностной зоне не превышало 1,2 %. По мере удаления от поверхности в глубину изделия содержание углерода постепенно снижается, доходя до исходного состояния. После медленного охлаждения от температуры цементации поверхностная зона имеет структуру заэвтектоидной стали и состоит из перлита и карбидов (цементита). Это так называемая заэвтектоидная зона. Далее следует эвтектоидная зона, представляющая собой перлит. Под эвтектоидной находится доэвтектоидная зона со структурой перлита и феррита. Микроструктура поверхностной области стали после цементации приведена на рисунке 11.1.

После цементации изделия подвергаются неполной закалке с последующим низким отпуском. В результате термической обработки высокоуглеродистая поверхностная зона приобретает структуру отпущенного мартенсита с включением карбидов (цементита). Твердость ее достигает значения 62 HRC.

После термической обработки твердость сердцевины определяется химическим составом стали и находится в пределах 15...35 HRC.

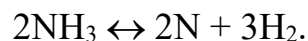


Рисунок 11.1 – Микроструктура поверхностной зоны стали, подвергнутой цементации

В зависимости от упрочнения сердцевины цементируемые стали делятся на три группы: углеродистые стали *с неупрочняемой сердцевиной*, низколегированные стали *со слабо упрочняемой сердцевиной*, среднелегированные стали *с упрочняемой сердцевиной*.

К *первой группе* относятся стали 10, 15, 20. В этом случае после закалки в воде сердцевина имеет феррито-перлитную структуру (т. е. не закаливается). При закалке в масле сердцевина низколегированных сталей *второй группы*, к которым относятся 15Х, 20Х, 15ХР, 20ХН, претерпевает бейнитное превращение и заметно упрочняется. В сердцевине среднелегированных цементируемых сталей (20ХГР, 20ХНР, 18ХГТ, 12Х2Н4) после охлаждения в масле образуется структура мартенсита, что приводит к весьма интенсивному упрочнению.

Азотированием называется процесс поверхностного насыщения стали азотом. Оно применяется в целях повышения твердости, износостойкости и предела усталости, а также коррозионной стойкости деталей машин. Процесс азотирования проводится при 500 °С...650 °С в течение 1...90 ч в среде газообразного аммиака, диссоциирующего по реакции



Образовавшийся атомарный азот адсорбируется поверхностью и диффундирует в металл. На поверхности углеродистой стали образуется слой ϵ -фазы толщиной 0,01...0,03 мм, который обладает *высокой стойкостью против коррозии* (ϵ -фаза – твердый раствор на основе нитрида железа Fe_2N , имеющий гексагональную решетку).

Твердость обычных конструкционных сталей после азотирования невысока (около 180 НВ).

Но при азотировании *легированных* сталей образуются *спецнитриды* легирующих элементов. Для повышения *твердости* и *износоустойчивости* азотированию подвергают специальные стали, получившие название *нитраллои*. Они содержат алюминий, хром, молибден, которые образуют стойкие против

коагуляции и роста нитриды. Наиболее часто азотированию подвергают стали 35ХМЮА, 38ХМЮА, 38Х2МЮА, 35ХМА. Азотирование проводится при температурах около 500 °С в течение 25...60 ч.

В процессе охлаждения нитраллов от температуры азотирования до комнатной, вследствие понижения растворимости легирующих элементов, происходит *распад пересыщенного твердого раствора* с образованием очень дисперсных спецнитридов CrN, MoN, AlN. Эти дисперсные частицы препятствуют движению дислокаций и тем самым повышают твердость азотированного слоя до 1100 HV (66 HRC).

Для повышения *усталостной прочности* азотируют конструкционные хромоникелевые стали.

Для повышения коррозионной стойкости азотированию могут подвергаться любые стали. Процесс проводится при 600 °С в течение 1,0 ч. Коррозионная стойкость повышается в результате образования на поверхности изделия сплошной зоны из ε-фазы.

Азотирование является окончательной обработкой после улучшения (закалки и высокого отпуска) и шлифования окисленного слоя. Азотированию подвергают такие детали, как гильзы гидроцилиндров, коленчатые валы дизелей, валы, шпиндели, ходовые винты, зубчатые колеса и пр.

Цианированием называется процесс одновременного насыщения поверхности деталей углеродом и азотом. При проведении цементации в присутствии аммиака обнаружались неожиданные эффекты, появилась возможность: снизить температуру процесса на 150 °С (что обеспечивает мелкозернистую структуру в отличие от цементации); обеспечить высокую коррозионную стойкость поверхности; повысить твердость и износостойкость поверхности.

Для повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и усталостной прочности деталей машин из малоуглеродистых, среднеуглеродистых простых и легированных сталей цианирование проводят при 850 °С в течение 2...8 ч.

После цианирования поверхность состоит из перлита и карбонитрида Fe₃(C, N), образующегося вместо цементита. Под ним лежит слой азотистого феррита. После закалки и низкого отпуска поверхностный слой представляет собой мелкокристаллический мартенсит с включениями карбонитридных фаз.

Процесс цианирования осуществляется в жидких и газообразных средах. Жидкое цианирование осуществляется в ваннах в смеси расплавленных цианистых солей типа NaCN, KCN с нейтральными солями типа NaCl, BaCl₂. Недостатками процесса жидкостного цианирования являются большая ядовитость цианистых солей и высокая их стоимость.

Газовое цианирование называют *нитроцементацией*. Этот процесс осуществляют в смеси науглероживающих и азотирующих газов. В качестве науглероживающего может быть любой газ, применяемый при газовой цементации. Азотирующим газом является аммиак. Структура цианированного слоя определяется количеством углерода и азота, находящихся в нем. На состав и свойства цианированного слоя особое влияние оказывает температура цианирования.

Повышение ее увеличивает содержание углерода в слое, снижение – увеличивает содержание азота.

В настоящее время нитроцементация широко внедряется вместо газовой цементации, т. к.:

- 1) образуется мелкозернистая структура сердцевины (обеспечиваются более высокие механические свойства);
- 2) выше твердость и износостойкость поверхности (из-за образования $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{N})$ вместо Fe_3C);
- 3) обеспечивается высокая коррозионная стойкость поверхности.

Борирование – это диффузионное насыщение поверхностного слоя бором. Процесс проводится с целью повышения поверхностной твердости и износостойкости, а также коррозионной стойкости. Наиболее перспективны для промышленного использования борирования в порошкообразных смесях, в расплавах солей и газовое борирование.

Твердое борирование проводят в порошковых смесях на основе технического **карбида бора** (B_4C) или в металлотермических смесях, основу которых составляют **оксид бора** (B_2O_3) и алюминий. Борирование из обмазок целесообразно применять при необходимости упрочнения крупногабаритных изделий или для местного борирования отдельных участков деталей. Поставщиками бора при насыщении из обмазок являются карбид бора или оксид бора. На поверхность обрабатываемого изделия обмазки наносят кистью.

Борирование в расплавах солей и окислов делится на электролизное и безэлектролизное. Электролизное борирование проводят в расплаве буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$). Обрабатываемая деталь является катодом.

Безэлектролизное борирование осуществляют в расплавах боросодержащих веществ (B , B_4C и др.) и нейтральных солей.

Газовое борирование проводят в среде, полученной разложением газообразных соединений бора. Наиболее часто применяется **диборан** (B_2H_6) и **треххлористый бор** (BCl_3), которые разбавляют газами, не содержащими бор (H_2 , Ar , N_2).

Борирование сталей проводят при температурах $800\text{ }^\circ\text{C} \dots 1050\text{ }^\circ\text{C}$ в течение $2 \dots 10$ ч. Борированный слой состоит из двух зон: зоны боридов и переходной зоны (рисунок 11.2, а). Зона боридов имеет характерное игольчатое строение и представляет собой химические соединения бора и железа (FeB и Fe_2B). Переходная зона представляет собой твердый раствор бора, углерода и легирующих элементов в железе.

Тяжелонагруженные детали после борирования подвергаются закалке и отпуску. Борирование используют для упрочнения различных деталей машин, технологической оснастки и инструмента, работающих в условиях интенсивного износа. Твердость поверхности после борирования наибольшая из всех операций ХТО – 2000 HV (более 72 HRC).

Хромирование – это процесс диффузионного насыщения поверхностных деталей хромом. Цель хромирования низкоуглеродистых сталей – повышение

коррозионной и жаростойкости, среднеуглеродистых – повышение твердости, износостойкости, а также коррозионной и жаростойкости.

При хромировании низкоуглеродистых сталей образующийся диффузионный слой представляет собой твердый раствор хрома в α -железе $Fe_\alpha(Cr)$. Толщина слоя не превышает 0,2 мм. Диффузионный слой сталей, содержащих более 0,3 % углерода, состоит из трех зон: карбидной, промежуточной и обезуглероженной. С увеличением углерода до 0,8 % толщина карбидной и промежуточной зон возрастает. Карбидная зона представляет собой сплошной слой карбидов хрома ($Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3) толщиной до 0,02 мм. Промежуточная зона имеет перлитное строение и состоит из феррита и карбидов хрома. Содержание углерода в обезуглероженной зоне ниже, чем в сердцевине. Микроструктура стали У8 после хромирования представлена на рисунке 11.2, б. Режим ХТО – продолжительность 4...10 ч, температура 1000 °С.

Благодаря наличию карбидов хрома твердость поверхности превосходит твердость азотированной и цементованной закаленной стали (до 1300 HV или 72 HRC). Слой обладает высокой износоустойчивостью, но и повышенной хрупкостью, что является его основным недостатком.

Хромирование осуществляют в *порошковых смесях*, в *газовой* и *жидкой* средах. Порошковая смесь для хромирования состоит из порошков хрома, феррохрома, оксидов хрома.

При хромировании в газовой среде источником активных атомов хрома служат галогениды хрома (CrF_2 , CrF_3), находящиеся в газообразном состоянии.

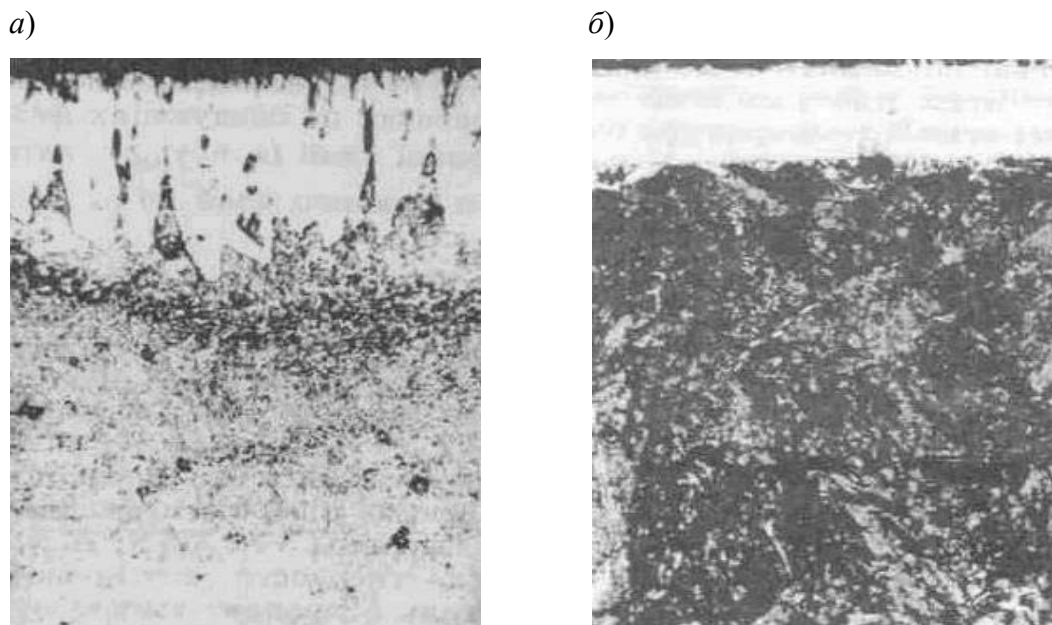


Рисунок 11.2 – Микроструктура поверхностной области стали, подвергнутой борированию (а) и хромированию (б)

Жидкой средой при хромировании являются расплавы солей хлоридов хрома (CrCl_2 и CrCl_3), а также соли-стабилизатора, в качестве которой используют одно из следующих соединений BaCl_2 , CaCl_2 , MgCl_2 . Диффузионное насыщение хромом проводится при температурах $900\text{ }^\circ\text{C} \dots 1200\text{ }^\circ\text{C}$ в течение $4 \dots 10$ ч.

При необходимости, после хромирования, тяжело нагруженные детали подвергают закалке с последующим отпуском. Хромирование применяется для повышения стойкости штампового инструмента, пресс-форм литья под давлением алюминиевых сплавов, различных деталей двигателей и газовых турбин, работающих при высоких температурах, фильтров нефтяных скважин, деталей насосов и турбобуров, крепежных деталей.

Основные виды и режимы химико-термической обработки, а также свойства поверхностных слоев приведены в таблице 11.1.

Контрольные вопросы

- 1 Дать определения основным видам ХТО, назначить режимы, указать образующиеся при этом структуры, их свойства и области применения.
- 2 Изложить сущность процессов, протекающих при различных видах ХТО.

Задание

- 1 Изучить теорию и технологию химико-термической обработки.
- 2 Провести микроанализ шлифов, подвергнутых химико-термической обработке, определить и записать микроструктуру диффузионных слоев и сердцевины, указать их свойства.

Таблица 11.1 – Основные виды и режимы химико-термической обработки, свойства поверхностных слоев

Вид ХТО	Цементация	Нитроцементация	Азотирование		Хромирование	Борирование
Среда	СО, С	СО + NH ₃	NH ₃		Пасты, содержащие хром	Пасты, содержащие В ₄ С, В ₂ О ₃
Температура	≈ 950	850	500...650		≈ 1000	1000
Длительность	4...8	2...8	1 (углеродистые стали)	30...90 (нитраллои) 38ХМЮА...	4...10	2...10
Фазы, образующие в поверхностном слое	П + Fe ₃ С	П + Fe ₃ (С, N)	ε-фаза	CrN, MoN, AlN...	Fe _α (Cr) (низкоуглеродистые)	FeВ, Fe ₂ В
Свойства верхних слоев	Высокая твердость и износостойкость (после закалки и низкого отпуска)	Высокие твердость и износостойкость (после закалки и низкого отпуска), коррозионная стойкость	Повышенная прочность, коррозионная стойкость	Высокая износостойкость, коррозионная стойкость	Высокая износостойкость, коррозионная стойкость, жаростойкость	Наибольшая износостойкость, коррозионная стойкость
Примечания	Крупнозернистая структура (следствие перегрева)	Мелкозернистая структура		Азотирование – окончательный вид обработки (после шлифования)	При необходимости – закалка и отпуск	При необходимости – закалка и отпуск

Список литературы

1 **Материаловедение. Технология композиционных материалов: учебник для студ. вузов / А. Г. Кобелев [и др.]. – Москва: КНОРУС, 2020. – 270 с.**

2 **Богодухов, С. И. Материаловедение: учебник / С. И. Богодухов, Е. С. Козик. – 3-е изд., стер. – Старый Оскол: ТНТ, 2018. – 536 с.**

3 **Бондаренко, Г. Г. Материаловедение: учебник для вузов / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова; под ред. Г. Г. Бондаренко. – 2-е изд. – Москва: Юрайт, 2021. – 327 с.**