



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технология конструкционных материалов»

Учебное пособие по дисциплине

«Теория и технология термической обработки металлов и сплавов»

Авторы
Баклаг Г. Н.

Ростов-на-Дону, 2019

Аннотация

Учебное пособие предназначено для студентов очной формы обучения направления 22.03.02. Metallургия профиль Metallургия черных металлов

Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Технология конструкционных материалов»
Баклаг Г. Н.

Оглавление

I. ВВЕДЕНИЕ	5
1. Строение металлов и сплавов.	5
2. Типы кристаллических решеток технических металлов	7
3. Особенности строения металлических сплавов.	8
II. ТЕОРИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ [2]	11
1. Фазовые превращения в сплавах железа при нагреве	11
1.1. Рост зерна аустенита при нагреве	14
1.2 Перегрев и пережог	16
1.3 Влияние величины зерна на свойства стали	17
1.4 Выявление и определение величины зерна	17
2. Фазовые превращения при охлаждении (диаграмма изотермического превращения аустенита)	19
2.1 Перлитное превращение	22
2.2 Мартенситное превращение в стали	25
2.3 Промежуточное (бейнитное) превращение.....	30
3. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении.....	33
3.1 Термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита	36
4. Превращение мартенсита и остаточного аустенита при нагреве (отпуск стали).....	37
5. Термическое и деформационное старение углеродистой стали.....	40
III. ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ И СПЛАВОВ[3,4]	40
1. Назначение и виды термической обработки	40
1.1 Отжиг.....	42
1.2 Закалка.....	44
1.3 Отпуск.....	45
1.4 Старение	46
1.5 Обработка холодом.....	47
1.6 Методы поверхностного упрочнения	47
1.6.1 Газопламенная закалка.	47
1.6.2 Закалка в электролите.	48
1.6.3 Термомеханическая обработка	48
1.6.4 Назначение и виды химико-термической обработки	49
1.6.5 Диффузионное насыщение металлами и металлоидами.....	52
2. Термическая обработка чугуна.....	53
2.1 Химико-термическая обработка чугуна	55
3. Термическая обработка сплавов цветных металлов.....	55
IV. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ [4,5].....	59
1. Оборудование термической обработки	59



2. Вспомогательное оборудование	76
3. Приборы для измерения и регистрации температуры	78
V. Заключение	84
Литература.....	85

I. ВВЕДЕНИЕ

Роль термической обработки в повышении качества изделий и снижении металлоемкости машин [1]

Качество и эксплуатационная надежность промышленных изделий - машин, механизмов и приборов – находится в непосредственной зависимости от соответствующих свойств их элементов – деталей, соединений и узлов.

Конструкционные свойства последних связаны, в свою очередь, со свойствами материала. Статическая и динамическая прочность, сопротивление хрупкому разрушению, задира- и износостойкость, сопротивление усталостному разрушению, физические, коррозионные, жаропрочные и прочие свойства материала принадлежат к числу основных факторов, определяющих надежность и долговечность машин.

Для современного машиностроения и других отраслей металлообрабатывающей промышленности, металлургии, приборостроения характерны высокие требования к свойствам материалов, обусловленные возрастающей интенсивностью нагружения машин при одновременной тенденции к уменьшению массы. Во многих случаях характеристики массы приобретают решающее значение.

Конструкторы машин при необходимости увеличения прочности и долговечности, прежде всего, увеличивают геометрические размеры с применением высоколегированных сталей, не используя технологические возможности термической обработки.

В настоящее время термическая обработка – обязательное звено производственного процесса изготовления современных машин, механизмов, приборов и инструментов. При незначительных затратах на термическую обработку (обычно не превышающих 2-10% полной себестоимости) результаты ее могут оказывать большое влияние на коренное улучшение качества металла и конкретных изделий.

1. Строение металлов и сплавов.

Все металлы и сплавы имеют кристаллическое строение, которое характеризуется закономерным и периодическим расположением атомов в пространстве, а каждый атом находится в идентичном окружении соседних.

Следовательно, кристалл - это твердое тело, в котором пространственное расположение

атомов повторяются периодически и которое ограничено плоскостями, образующими друг с другом определенные углы.

Кристаллы неправильной огранки называются кристаллитами, размеры кристаллов от миллиметров до микрон. Характеристикой закономерности расположения атомов в пространстве является кристаллическая решетка. Кристаллическая решетка - это простейшая модель кристалла, представляющая собой совокупность точек - центров колебания атомов, расположенных в пространстве так, что каждая точка имеет соседей, положение которых по отношению к ней совершенно одинаково.

В кристаллической решетке металла все узлы заняты одинаковыми атомами (ионами), которые удерживаются на своих местах силами межатомного взаимодействия. Величина сил взаимодействия определяет прочность кристалла.

Атомы в кристалле металла соединены металлической связью. При потере части внешних электронов атомы превращаются в положительно заряженные ионы. Потерянные электроны не связанные с конкретным атомом, свободно перемещаясь в кристалле с большими скоростями приводят к высокой тепло- и электропроводности металлов.

Взаимодействие между положительно заряженными ионами и свободными электронами является силой обеспечивающей целостность кристалла. Описание кристаллической решетки производится с помощью переноса (трансляции) какого-либо одного атома (узла решетки) по 3-м выбранным направлениям. Положение частиц в такой решетке описывается через векторы трансляции. Наименьший параллелепипед, который можно построить на векторах трансляции, называется элементарной ячейкой кристалла. Если ячейка содержит частицы только в вершинах параллелепипеда, то такая ячейка называется простой, если в объеме и гранях – сложной. Кристаллические решетки, в которых сильные связи между атомами образуются только последовательно (графит) или в определенных направлениях вдоль некоторых нитей называются нитевидными. Они образуются при полимеризации в результате соединения большого числа одинаковых молекул в длинные цепочки. Такие вещества называются полимерами (природные - каучук, целлюлоза; искусственные – фторопласты, эпоксидные смолы).

Твердые тела, у которых отсутствует строго упорядоченная кристаллическая решетка, а свойство упорядоченности расположения атомов выполняется только в малых объемах (ближний порядок), причем отклонения от периодичности, постепенно накапливаясь, приводят к ее отсутствию во всем веществе (дальний порядок), являются аморфными или стеклообразными.

2. Типы кристаллических решеток технических металлов

Кристалл, обладающий правильно уложенной кристаллической решеткой называется монокристаллом. Он имеет различные механические свойства в зависимости от направления в кристаллической решетке, т.е. он анизотропен.

Для описания строения кристаллов выбирают систему координат, осями которой служат 3 прямые, проведенные из одной точки, совпадающие с основными узловыми прямыми кристалла (рис.1 $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$) - векторами трансляции.

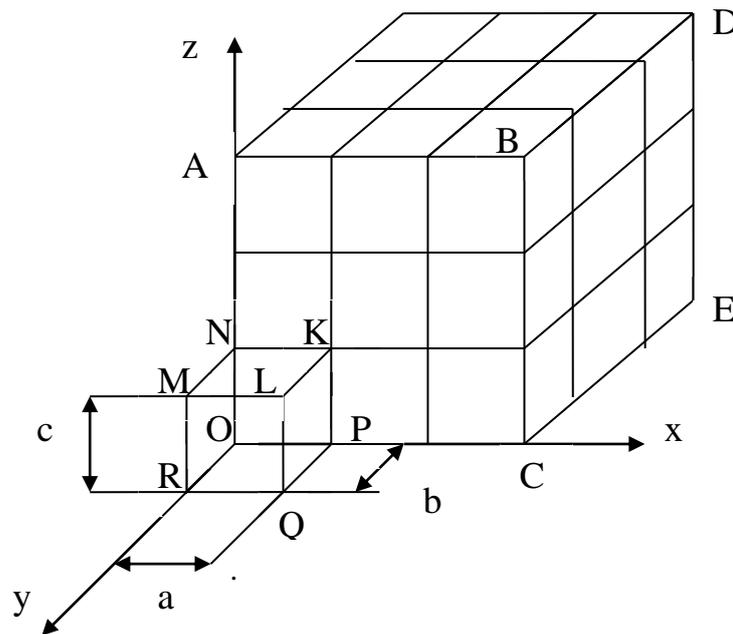


Рис. 1 Схема простой кубической решетки. KLMNOPQR- элементарная ячейка

Выбранная система координат - это кристаллографическая система осей. Длина ребра элементарной ячейки (a, b, c), которая соответствует линейному сдвигу, называется параметром решетки. Для однозначного описания элементарной ячейки задают 3 параметра решетки a, b, c вдоль осей x, y, z и 3 угла α, β, γ - между ребрами

Для описания строения металлов используются 3 типа кристаллических решеток:

- Кубическая объемно-центрированная (ОЦК) (рис.2 а)

$a=b=c; \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Элементарная ячейка - куб, в центре которой расположен атом. Эта решетка характерна для $\alpha - \beta$ -железа, α -хрома, ванадия, вольфрама, калия, лития, молибдена, натрия, и их сплавов.

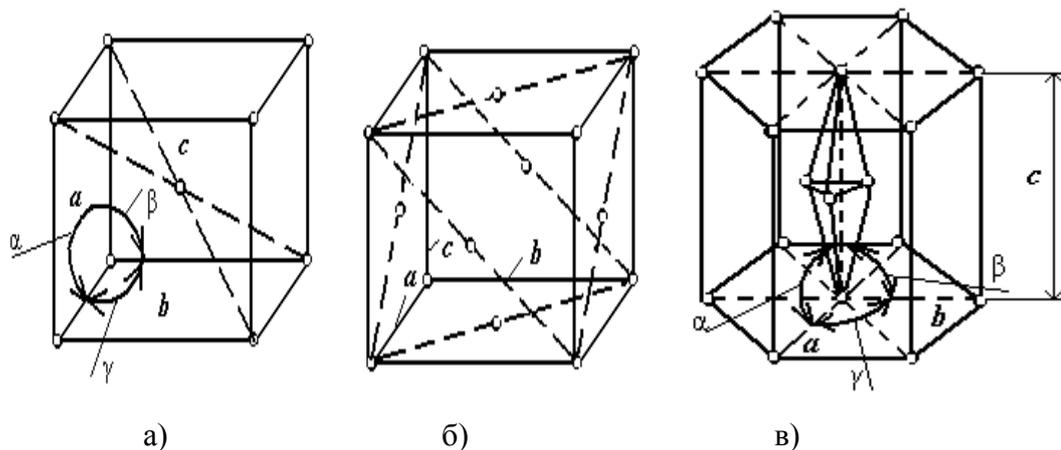


Рис.2 Типы кристаллических решеток металлов и сплавов.

- Кубическая гранецентрированная (ГЦК) (рис.2 б)

$a=b=c$; $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Элементарная ячейка - куб, в центре каждой грани расположено по атому. Это решетка: γ -железа, цветных и благородных металлов: алюминия, золота, меди, никеля, платины, серебра, свинец, и их сплавов.

- Гексагональная плотноупакованная (ГПУ) (рис.2 в)

$a=b \neq c$; $\gamma=120^\circ$, $\alpha=\beta=90^\circ$. Элементарная ячейка – прямоугольная шестигранная призма, внутри которой расположено по 3 атома. Это решетка – бериллия, кадмия, кобальта, магния, титана, цинка и т.д.

Расстояния между соседними атомами различны и зависят от выбранного направления. Поэтому физические и механические свойства металлов зависят от направления. Это явление анизотропии. Так как все технические металлы являются поликристаллическими телами, в которых кристаллографические оси кристаллов ориентированы случайным образом, то принимается изотропность механических свойств. Она является кажущейся. Такая изотропность называется квазиизотропностью.

3. Особенности строения металлических сплавов.

Для повышения механических свойств, коррозионной стойкости и получения специальных физических свойств чистые металлы сплавляют с металлами и неметаллами.

Под сплавом понимается вещество с металлическими свойствами, полученных при кристаллизации расплава из нескольких компонентов.

Наиболее распространены сплавы черных металлов (углеродистая и легированная сталь), медные (латунь, бронза), алюминиевые, магниевые, титановые.

В результате совместной кристаллизации нескольких элементов могут образоваться следующие типы сплавов:

Механическая смесь образуется при раздельной кристаллизации компонентов. Структура сплава будет состоять из кристаллов отдельных компонентов, связь между которыми осуществляется по границам зерен.

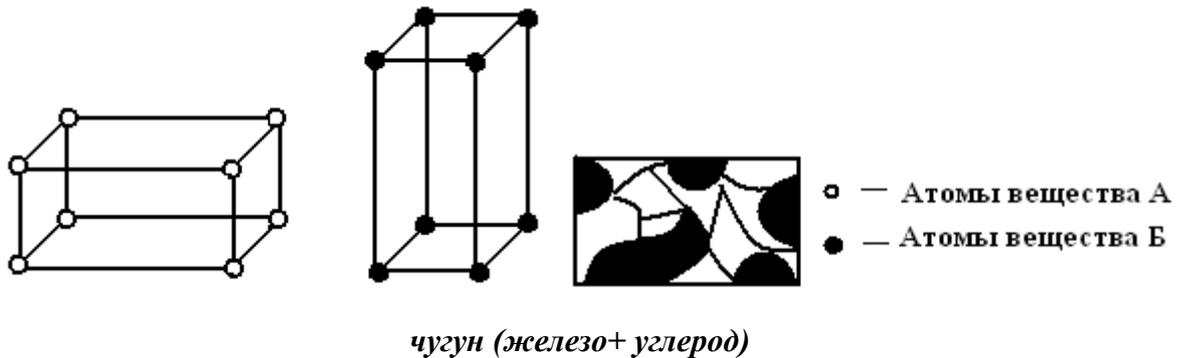


Рис. 3 Механическая смесь

Механическая смесь – мелкодисперсная – ледебурит (НВ=500), феррит+цементит вторичный (С=0,8%), чугун – Fe+2÷4%С.

Химическое соединение происходит, когда кристаллизующиеся компоненты взаимно химически активны. Кристаллическая решетка соединения будет новой, не похожей на кристаллические решетки исходных компонентов.

По свойствам сплав сильно отличается от свойств образующих его компонентов. Свойства такого сплава будет средним между свойствами элементов, которые его образуют.

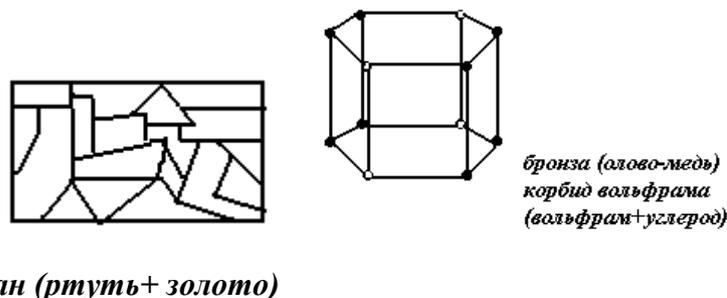


Рис.4 Химическое соединение

Химическое соединение – Fe+С цементит (первичный, вторичный, третичный) (НВ=800).

Твердый раствор образуется, когда кристаллическую решетку строит только один из компонентов, а другой компонент в этой решетке размещается в атомном виде.

Твердые растворы бывают 2-х типов: растворы замещения и внедрения.

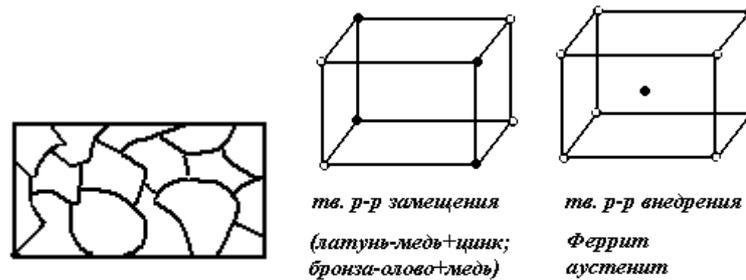


Рис. 5 Твердый раствор

Свойства сплава – твердого раствора могут быть выше или ниже свойств исходных компонентов.

Твердые растворы внедрения характерны для сплавов один из компонентов которых имеет большой атомный радиус (различие не может быть $\geq 59\%$). (Например: железо – углерод.)

В твердых растворах внедрения решетка искажается значительно. Это связано с расположением атомов примеси в междоузлиях решетки основного компонента.

Высокие локальные напряжения, возникающие в решетке, приводят к тому, что внедренные атомы располагаются в областях искажения решетки вокруг дислокаций – дефект, связанный со смещением нескольких рядов атомов.

Важнейшие твердые растворы внедрения:

Феррит – раствор углерода в α - железе (растворимость max 0,02%). Обладает высокой пластичностью (очень мягкий НВ=80) и небольшим сопротивлением деформации.

Аустенит – раствор углерода в γ - железе (растворимость 2,14%). Обладает высокой пластичностью (НВ 160-180) и небольшим сопротивлением деформации.

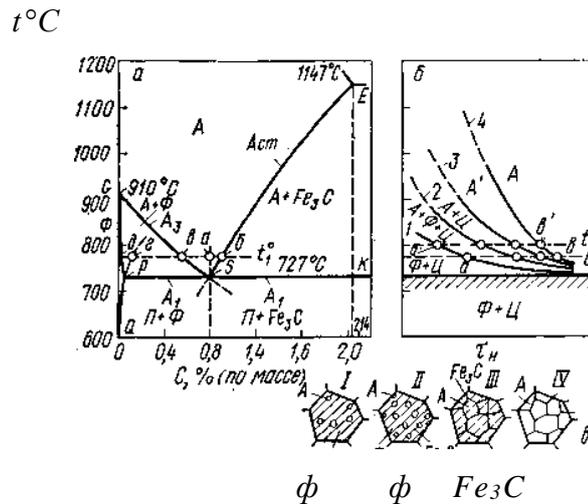
Твердые растворы замещения образуют металлы с небольшим различием атомных радиусов (<15%). Им свойственно незначительное искажение кристаллической решетки. Любой ее узел может быть занят атомом компонента примеси. Атомы примеси располагаются в решетке статистически равномерно.

Если атомы примеси располагаются случайным образом – неупорядоченные твердые растворы.

Если атомы примеси располагаются в закономерном порядке, то такие растворы называются упорядоченные твердые растворы.

Все растворы обозначают буквами α , β , γ . Структура твердого раствора под микроскопом выглядит как структура чистого металла или химического соединения.

Строение сплава определяет его свойства. Зависимость между строением сплава, его составом и температурой описывается диаграммой состояния (диаграмма равновесия).



Диаграммы строятся экспериментально по критическим точкам, полученным на кривых охлаждения сплавов данной системы.

II. ТЕОРИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ [2]

1. Фазовые превращения в сплавах железа при нагреве

Для многих видов термической обработки сталь нагревают до температур, соответствующих существованию аустенита (процесс аустенитизации). Образование аустенита при нагреве является диффузионным процессом и подчиняется основным положениям теории кристаллизации.

Рассмотрим превращения феррито-цементитной смеси (перлита) в аустенит на примере эвтектоидной (0,8 % C) стали. При нагреве до температуры A_{C1} происходит растворение в феррите некоторого количества цементита в соответствии с линией предельной растворимости PQ (рис. 6). При повышении температуры выше A_{C1} (например до t_1) концентрация углерода в отдельных участках феррита возрастает (точка z на рис.б). Такие участки феррита неустойчивы и претерпевают превращение в аустенит, стабильный при данной температуре и зерна аустенита приобретают равноосную форму. После исчезновения феррита и цементита, и, естественно, границ между ними, где преимущественно зарождался аустенит, наблюдается только рост зерен аустенита без возникновения новых зародышей.

Рис 6. Превращение в стали с феррито-цементитной структурой при нагреве.

a — изменение фазового состава при нагреве; $б$ — изотермическое образование аустенита: 1 — начало образования аустенита; 2 — конец превращения перлита в аустенит; 3 — полное растворение карбидов; 4 — гомогенизация аустенита; $в$ — схема структурных изменений при нагреве: /—IV — последовательные стадии превращения перлита в аустенит; A — аустенит гомогенный, A^1 — негомогенный

Образовавшийся аустенит неоднороден по содержанию углерода. В участках, прилегающих к частицам цементита, концентрация углерода в аустените выше (точка *b* на рис. 6 *a*), чем в участках, прилегающих к ферриту (точка *b* на рис. 6 *a*). Под влиянием этого градиента концентрации происходит диффузия атомов углерода в аустените в направлении от границы с цементитом к участкам, граничащим с ферритом. В результате растворения цементита в аустените происходит его стабилизация. Следовательно, рост участков аустенита происходит вследствие полиморфного $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения и диффузии углерода.

Рост участков аустенита в результате этого превращения протекает быстрее, чем растворение цементита. Поэтому после превращения феррита в аустенит в структуре стали сохраняется еще некоторое количество цементита (рис. 6, *в*, III) и для его растворения в аустените продолжительность изотермической выдержки должна быть увеличена. Образовавшийся в результате описанных превращений аустенит неоднороден по составу, и для его гомогенизации требуется дополнительное время (рис. 6, *б*).

Для описания перехода феррито-цементитной структуры в аустенит часто пользуются диаграммами изотермического образования аустенита, дающими представление о превращениях при разных температурах. Для построения диаграммы небольшие образцы из исследуемой стали быстро нагревают до заданной температуры выше точки A_1 и выдерживают при этой температуре.

В процессе изотермической выдержки фиксируют начало и конец отдельных стадий превращения перлита в аустенит. Если полученные экспериментальные точки нанести на график в координатах температура — время и соединить их плавными кривыми, то получится диаграмма, подобная схематически показанной на рис. 6, *б*.

Как следует из диаграммы изотермического образования аустенита в эвтектоидной стали, при повышении температуры превращение перлита в аустенит резко ускоряется. Это объясняется, с одной стороны, ускорением диффузионных процессов, а с другой — увеличением градиента концентрации в аустените.

Скорость превращения феррито-цементитной структуры в аустенит, кроме температуры нагрева, зависит от ее исходного состояния. Чем тоньше феррито-цементитная структура, тем больше возникает зародышей аустенита и быстрее протекает процесс аустенитизации. Предварительная сфероидизация цементита, особенно с образованием крупных его глобулей, замедляет процесс образования аустенита.

При нагреве доэвтектоидной или заэвтектоидной стали процесс аустенитизации осложняется превращением структурно свободного феррита в аустенит или растворением избыточного цементита. При нагреве доэвтектоидной стали зародыши аустенита могут

возникать и на границах ферритных зерен. В этом случае диффузия углерода по межфазной границе приводит к стремлению цементита раствориться в феррите, что будет приводить к превращению феррита в аустенит.

Чем больше в стали углерода, тем быстрее протекает аустенитизация, что объясняется увеличением количества цементита, а следовательно, и ростом суммарной поверхности раздела феррита и цементита.

Введение в сталь хрома, молибдена, вольфрама, ванадия и других карбидообразующих элементов задерживает аустенитизацию из-за образования легированного цементита или трудно растворимых в аустените карбидов легирующих элементов. Соответственно больше требуется времени и для гомогенизации аустенита. Легирующие элементы неравномерно распределены между ферритом и карбидами, а следовательно, и в аустените содержание легирующих элементов по объему будет не одинаково.

Процесс гомогенизации аустенита по содержанию легирующих элементов требует большего времени, так как диффузионная подвижность легирующих элементов в решетке γ -фазы значительно меньше, чем углерода.

При непрерывном нагреве превращение перлита в аустенит протекает в некотором интервале температур. На рис. 7 приведена термокинетическая диаграмма, которая дает представление о температурах превращения перлита в аустенит при различных скоростях нагрева.

Скорость нагрева, °C/c

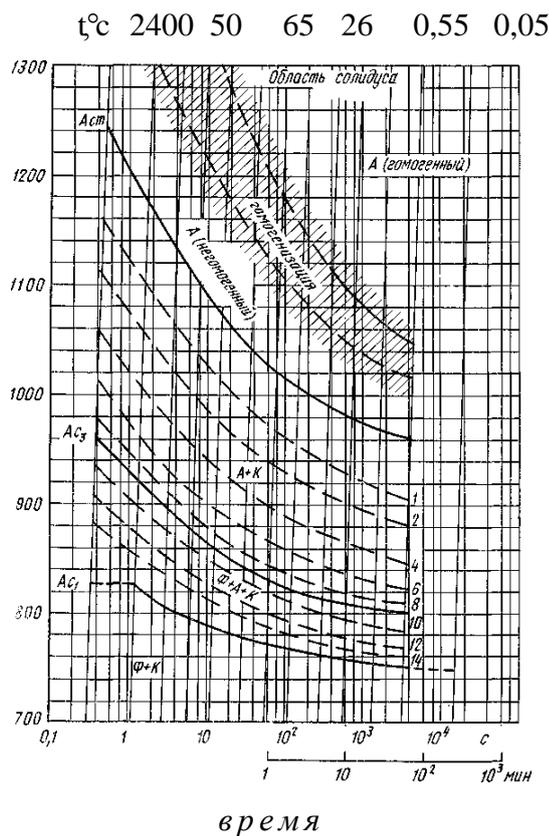


Рис.7. Термокинетическая диаграмма превращения аустенито-феррито-карбидной структуры в аустенит в стали содержащей 1 % С и 1 % Cr

A_{c1} - начало $\alpha \rightarrow \gamma$ - превращения

A_{c3} - конец $\alpha \rightarrow \gamma$ - превращения

A_{cm} - конец растворения карбидов

Цифры у кривых указывают количество не растворившихся в аустените карбидов (%) при данном нагреве.

Начало превращения феррито-карбидной структуры в аустенитную на термокинетической диаграмме (рис. 7) соответствует температурам чуть выше A_{c1} конец полиморфного $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения — температурам линии A_{c3} и полное растворение карбидов — температурам, образующим линию A_{cm} . Чем выше скорость нагрева, тем при более высокой температуре происходит превращение **феррито - цементитной структуры (перлита)** в аустенитную. Интервал температур, в котором протекает превращение перлита в аустенит, тем больше, чем выше скорость нагрева, поэтому при скоростном нагреве (например, токами высокой частоты) температура нагрева для аустенитизации стали должна быть выше, чем при сравнительно медленном печном нагреве.

1.1. Рост зерна аустенита при нагреве

Зародыши аустенита при нагреве выше A_1 образуются на границах раздела феррит—

карбид. При таком нагреве число зародышей всегда достаточно велико и начальное зерно аустенита мелкое.

При дальнейшем повышении температуры или увеличении длительности выдержки при данной температуре происходит рост зерна аустенита, термодинамически оправданный стремлением системы к уменьшению свободной энергии вследствие сокращения поверхности зерен.

Размер зерна, образовавшегося при нагреве до данной температуры, естественно, не изменяется при последующем охлаждении. Способность зерна аустенита к росту неодинакова даже у сталей одного марочного состава, вследствие влияния условий выплавки. Различают два предельных типа сталей по склонности к росту зерна: **наследственно мелкозернистые и наследственно крупнозернистые.**

В наследственно мелкозернистой стали при нагреве до 950 — 1000 °С зерно увеличивается незначительно, однако при более высоком нагреве наступает бурный рост зерна (рис. 8). В наследственно крупнозернистой стали, наоборот, сильный рост зерна наблюдается даже при незначительном перегреве выше A_1 (температуры окончания аустенитизации) (рис.8, 1). Различная склонность к росту зерна определяется условиями раскисления стали и ее составом.

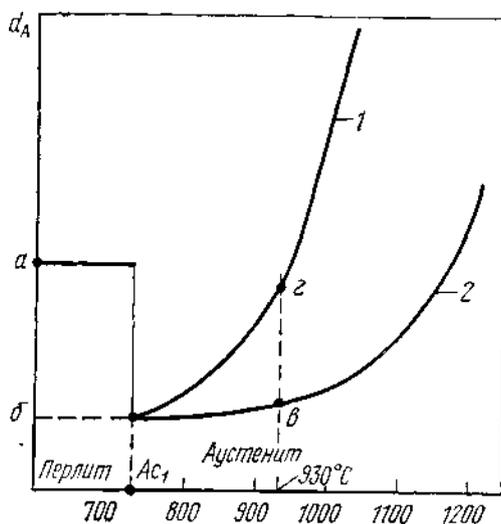


Рис.8 Влияние температуры нагрева на величину зерна аустенита d_A наследственно крупнозернистой 1 и мелкозернистой 2 эвтектоидной стали (0,8% С)

Стали, раскисленные алюминием, наследственно мелкозернистые, так как в них

образуются дисперсные частицы AlN , тормозящие рост зерна аустенита. Растворение этих частиц влечет за собой быстрый рост зерна. В двухфазных областях (например, в заэвтектоидных сталях) в интервале температур $A_{c1} — A_{cm}$ (см. рис. 6, *a*) рост зерна аустенита сдерживается нерастворившимися карбидными частицами. Такое же сдерживающее влияние на рост зерна в доэвтектоидных сталях в интервале температур $A_{c1}—A_{c3}$ (рис.6, *a*) оказывают участки феррита.

Легирующие элементы, особенно карбидообразующие (наиболее сильно действуют Ti , V , Zr , Nb , W и Mo) задерживают рост зерна аустенита, так как образуют труднорастворимые в аустените карбиды, которые служат барьером.

Более сильно влияют такие карбидообразующие элементы, как титан и ванадий.

Любое легирование, обуславливающее торможение диффузионных процессов будет сдерживать рост зерна, который контролируется диффузией. Термины — наследственно крупнозернистая и наследственно мелкозернистая сталь не обозначают того, что данная сталь имеет всегда крупное или всегда мелкое зерно. Наследственное зерно, полученное в стандартных условиях технологической пробы (рис. 8), указывает лишь на то, что при нагреве до определенных температур наследственно крупнозернистая сталь приобретает относительно более крупное зерно при более низкой температуре, чем сталь мелкозернистая.

Размер действительного зерна аустенита обусловлен температурой нагрева, продолжительностью выдержки при ней и склонностью данной стали к росту зерна при нагреве.

1.2 Перегрев и пережог

Продолжительный нагрев стали при температурах, значительно превышающих A_3 или A_{cm} , приводит к образованию действительно крупного зерна. У перегретой стали излом камневидный. Поверхность разрушения излома характеризуется бугорчатым грубозернистым строением (зерна без металлического блеска, как бы оплавленные).

В перегретой стали нередко четко проявляется то, что феррит образуется по сдвиговому механизму превращения. Рост видманштеттовых кристаллов (рис. 9, *a*) феррита происходит при высоких температурах в условиях диффузионного отвода углерода.

Перегрев может быть исправлен отжигом.

Еще более высокий нагрев, чем при перегреве и к тому же в окислительной атмосфере, вызывает пережог стали; он сопровождается образованием по границам зерен окислов железа (рис. 9, *б*). При пережоге излом стали камневидный. Пережог — неисправимый дефект стали.

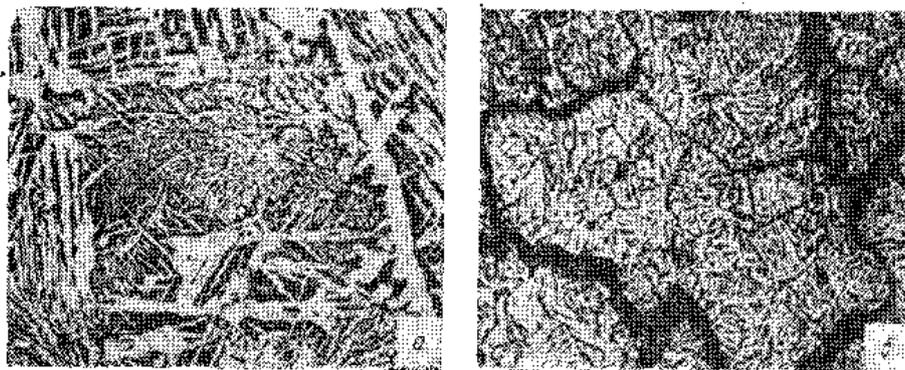


Рис. 9. Микроструктура перегретой (а) и пережженной (б) доэвтектоидной стали, х 80

1.3 Влияние величины зерна на свойства стали

Величина зерна стали не оказывает существенного влияния на стандартный комплекс механических свойств, получаемых при испытании на статическое растяжение ($\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , ψ) и твердость, но с ростом зерна резко снижается ударная вязкость, уменьшается работа распространения трещины и повышается порог хладноломкости. Чем крупнее зерно, тем более сталь склонна к закалочным трещинам и деформациям. Все это следует учитывать при выборе режимов термической обработки. Разнозернистость сильно снижает конструктивную прочность, вызывая охрупчивание в зонах, прилегающих к концентраторам напряжений.

1.4 Выявление и определение величины зерна.

Размер зерна аустенита определяют методами цементации, окисления, травления границ зерен, а также по ферритной или цементитной сетке.

По методу цементации образец доэвтектоидной стали насыщают углеродом при 930 °С в течение 8 ч. При этом содержание углерода в аустените, находящемся в поверхностной зоне, достигает заэвтектоидной концентрации. При последующем медленном охлаждении по границам зерна аустенита выделяется вторичный цементит, образующий сплошную сетку, по которой после охлаждения определяют величину бывшего зерна аустенита (рис. 10 а). При использовании других методов выявления зерна конструкционных и инструментальных сталей температуру нагрева принимают равной температуре закалки или на 20—30 °С выше этой температуры. Время выдержки при таком нагреве 3 ч.

В случае применения метода окисления металлографический шлиф

нагревают в защитной атмосфере и после окончания выдержки в печь подают воздух. Границы бывших зерен аустенита выявляются сеткой окислов (рис. 10, б).

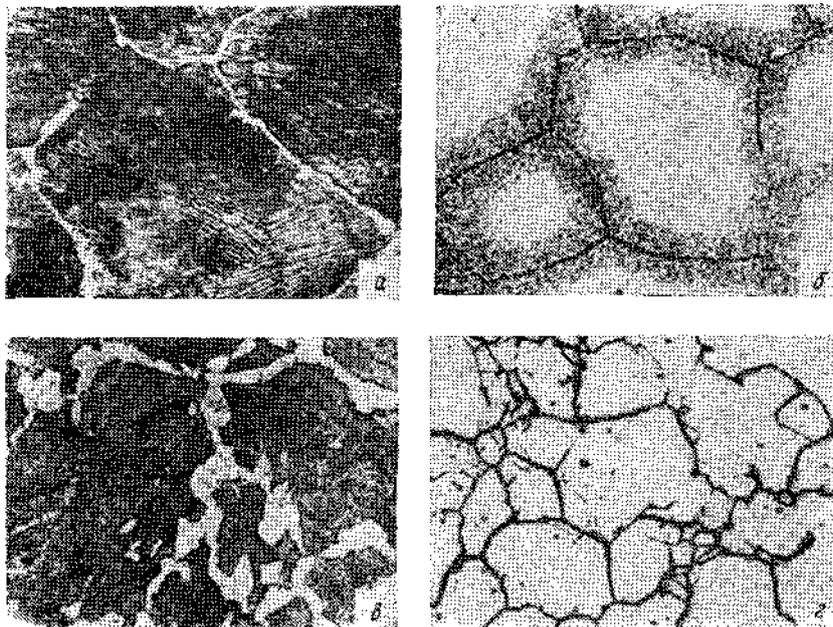


Рис. 10. Зерно аустенита (X 100), выявленное:

а — цементацией; *б* — окислением; *в* — по ферритной сетке; *г* — при непосредственном наблюдении при высоких температурах (нагрев в вакуумной камере)

Метод, основанный на образовании сетки феррита, применяют для доэвтектоидных, а методы образования сетки цементита — для заэвтектоидных сталей. Образцы нагревают до заданной температуры и охлаждают со скоростью, обеспечивающей образование сетки феррита или цементита (рис. 10, в).

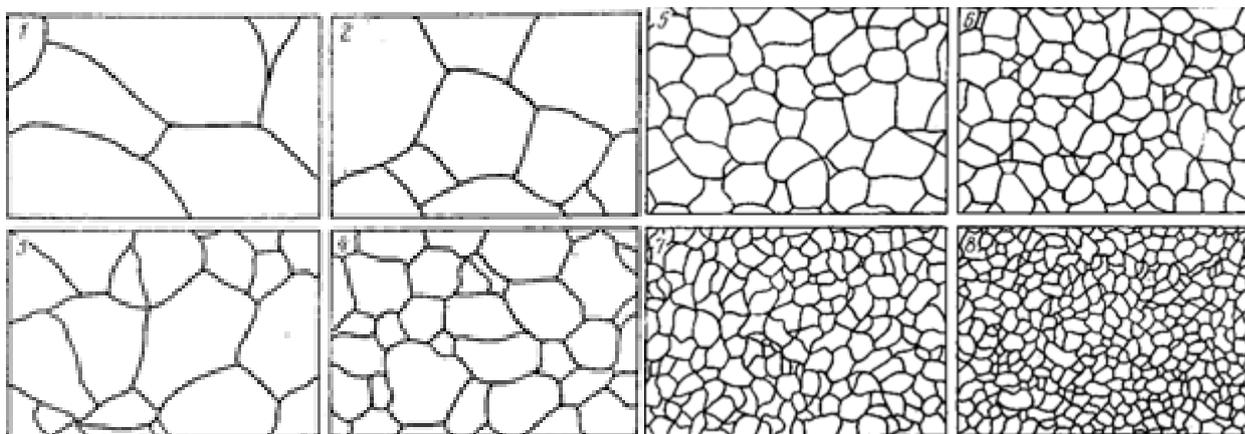


Рис. 11. Шкала зернистости стали. Цифрами указан балл зернистости, х 100

Зерно аустенита можно определить на специальных микроскопах с нагревательной

вакуумной камерой непосредственно при высоких температурах (рис.10, з). Величину зерна определяют под микроскопом при увеличении в 100 раз. Зерна, видимые на шлифе, сравнивают с эталонными шкалами, приведенными на рис. 11.

Величину зерна оценивают баллами. Между баллом зерна, его средним диаметром и количеством зерен, помещающихся на 1 мм² шлифа, существует прямая зависимость (рис. 7). Приблизительно можно считать, что стали с зерном № 1—5 относят к группе крупнозернистых, а с зерном № 6—15 к мелкозернистым.

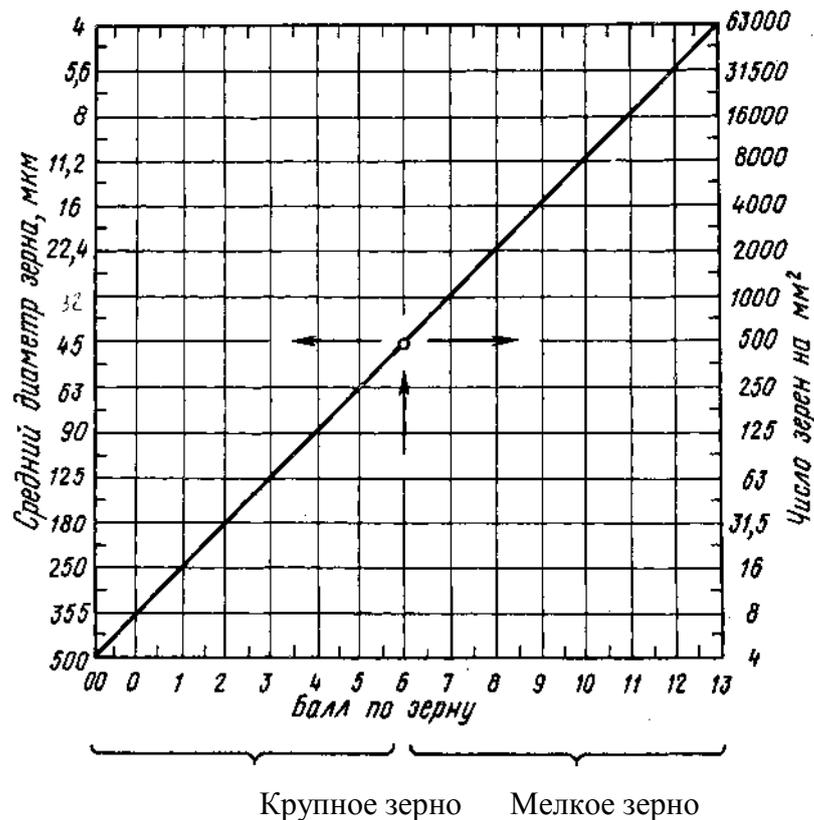


Рис. 12 Номограмма для определения размера зерна

2. Фазовые превращения при охлаждении (диаграмма изотермического превращения аустенита)

Если сталь со структурой аустенита, полученной в результате нагрева до температуры выше $A_{с3}$ (для доэвтектоидной стали) или выше $A_{с1}$ (для заэвтектоидной стали), переохладить до температуры ниже A_1 , то аустенит оказывается в метастабильном состоянии и претерпевает превращение.

Для описания кинетики превращения переохлажденного аустенита пользуются экспериментально построенными диаграммами время—температура—степень распада или

диаграммами изотермического превращения аустенита, т. е. превращения, протекающего при постоянной температуре.

Для изучения изотермического превращения аустенита небольшие образцы стали нагревают до температур, соответствующих существованию стабильного аустенита (т.е. выше критической точки), а затем быстро охлаждают (переохлаждают) до температуры ниже A_1 (например, до 700, 600, 500, 400, 300 °С и т.д.), и выдерживают при этих температурах различное время, в том числе и до полного распада аустенита. Степень его распада можно определять разными методами: микроскопическим, магнитным, дилатометрическим и др.

Результаты исследования описываются кинетической кривой, по которой можно оценить количество распавшегося аустенита в зависимости от времени, прошедшего с момента начала распада. Как видно из рис. 13 а, в течение некоторого промежутка времени (H_1, H_2, H_3) распад аустенита экспериментально не фиксируется. Этот период называют инкубационным.

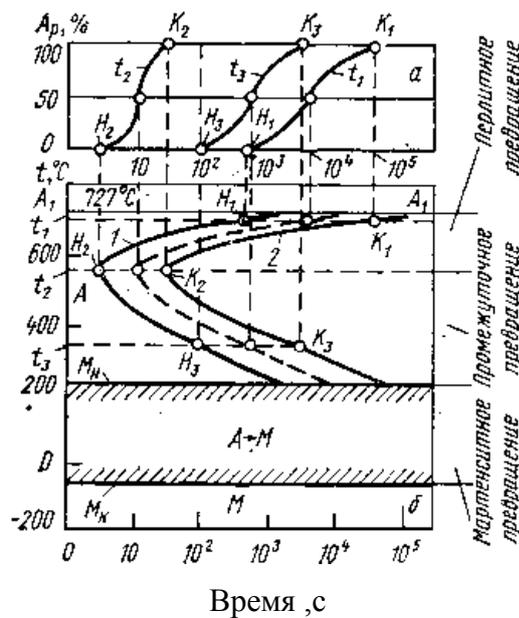


Рис. 13. Схема построения диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита для эвтектоидной стали: а — кинетические кривые; б — диаграммы изотермического превращения аустенита

По истечении этого периода аустенит начинает распадаться с образованием более стабильных структур. В области повышенных температур он протекает с образованием структуры, состоящей из феррита и цементита. Скорость распада сначала быстро увеличивается, а затем постепенно замедляется. Через различные промежутки времени (K_1, K_2, K_3) процесс распада постепенно затухает и, наконец, полностью заканчивается или приостанавливается.

Построение таких кривых в изотермических условиях при разных температурах (t_1, t_2, t_3 и т. д.) позволяет получить диаграмму изотермического превращения аустенита (рис. 13, б). Для этого нужны отрезки времени, соответствующие началу (H_1, H_2, H_3) и концу распада аустенита (K_1, K_2, K_3 и т. д.), или для какой-то заранее принятой степени превращения, для каждой из исследуемых температур (t_1, t_2, t_3), перенести на график, на котором по оси абсцисс откладывают время (Шкалу времени принимают логарифмической, так как время распада может колебаться в широких пределах — от долей секунды до десятков минут и даже часов), а по оси ординат — температура, и одноименные точки соединить плавными кривыми. На диаграмме изотермического превращения аустенита (рис. 13, б) кривая 1 характеризует начало распада аустенита, а кривая 2 показывает время, необходимое для полного распада аустенита.

При переохлаждении аустенита до температуры, равной или ниже мартенситной точки (M_n), соответствующей температуре начала превращения переохлажденного аустенита в мартенсит (рис. 13, б), диффузионные процессы полностью подавляются и образование структуры, состоящей из феррита и цементита, становится невозможным. В этом случае протекает бездиффузионное превращение аустенита в структуру закаленной стали, называемую *мартенситом*.

В зависимости от степени переохлаждения аустенита различают три температурные области или ступени превращения (рис. 13, б): перлитную; область промежуточного превращения (промежуточное между перлитным и мартенситным превращением) и мартенситную,

Перлитная область (рис. 13, б) в углеродистых сталях распространяется на интервал температур от точки A_1 до изгиба изотермической диаграммы (~ 550 °С). При этих температурах происходит диффузионный распад аустенита с образованием структуры из феррита и цементита — перлита.

Промежуточное превращение протекает при температурах от изгиба кривой (~ 550 °С) до точки M_n (рис. 13, б). Это превращение обладает рядом особенностей, присущих как перлитному (диффузионному), так и мартенситному (бездиффузионному) превращению. В результате превращения переохлажденного аустенита образуется структура, получившая название бейнита (Поэтому промежуточное превращение нередко называют бейнитным превращением).

Ниже температуры, соответствующей точке M_n , переохлажденный аустенит бездиффузионно превращается в мартенсит (рис. 13, б).

2.1 Перлитное превращение

Перлитное превращение переохлажденного аустенита носит кристаллизационный характер и начинается по диффузионному механизму. Это следует из того, что аустенит, например, углеродистой стали (рис. 14), практически однородный по концентрации углерода, распадается с образованием феррита (почти чистое железо) и цементита, содержащего 6,67 % С, т. е. состоит из фаз, имеющих резко различную концентрацию углерода. Ведущей, в первую очередь возникающей, фазой при этом является карбид (цементит). Как правило его зародыши образуются на границах зерен аустенита.

В результате роста частиц этого карбида прилегающий к нему объем аустенита обедняется углеродом, снижает свою устойчивость и испытывает полиморфное $\gamma \rightarrow \alpha$ - превращение, которое как всякая перестройка решетки в решетку идет сдвиговым путем. При этом кристаллики феррита зарождаются на межфазных границах с цементитом, где этот процесс облегчен.

Дальнейший рост ферритных пластинок ведет к обогащению окружающего аустенита углеродом, что затрудняет дальнейшее развитие $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. В обогащенном таким образом углеродом аустените зарождаются новые и растут ранее возникшие пластинки цементита. В результате образования и роста частиц карбидов вновь создаются условия для возникновения новых и роста имеющихся кристалликов (пластинок) феррита. В результате происходит колониальный (совместный) рост кристалликов феррита, и цементита, образующих перлитную колонию (рис. 14). Размер перлитных колоний («перлитное зерно») и перлитных субколоний тем меньше, чем мельче зерно исходного аустенита и больше степень его переохлаждения.

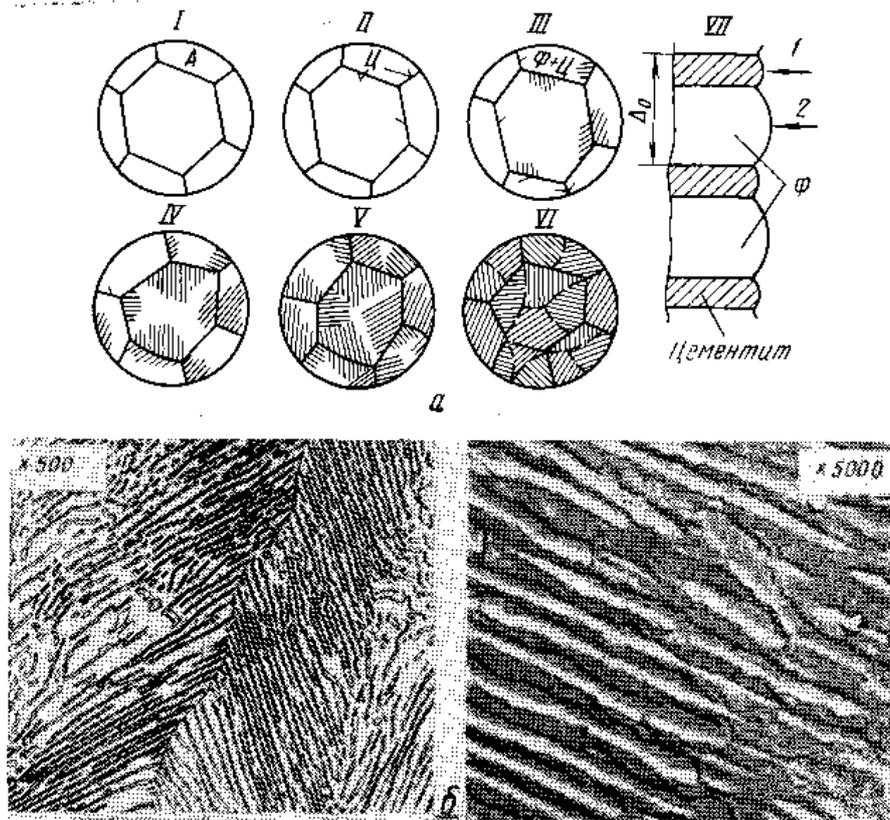


рис. 14. Схемы образования (а) и микроструктуры пластинчатого перлита при разном увеличении (б):

I — аустенит; II — образование зародыша цементита на границе зерна аустенита; III — образование пластины феррита; IV — VI — рост и образование новых пластин цементита и феррита (перлита); VII — перераспределение углерода при образовании перлита; 1 — высокая концентрация углерода — цементит (6,67 % C), 2 — низкая концентрация углерода — феррит (0,02 % C); Δ_0 — межпластиночное расстояния

Продукты перлитного превращения имеют пластинчатое строение (рис. 14). Чем больше переохлаждение, тем тоньше получающаяся феррито-цементитная структура, т. е. меньше величина межпластинчатого расстояния (Δ_0) (рис. 14, а), равного усредненной сумме толщин двух пластинок феррита и цементита (рис. 15), соответственно выше и твердость. Пластинчатые структуры эвтектоидного типа часто определяют как перлит, сорбит и троостит или соответственно грубо-, средне- и тонкодифференцированный перлит.

Структура	Перлит	Сорбит	Троостит
Δ_0 , мкм . . . ,	0,6—1,0	0,25—0,3	0,1—0,15
НВ.....	180—250	250—350	350—450
	(1800—2500 МПа)	(2500—3500 МПа)	(3500—4500 МПа)

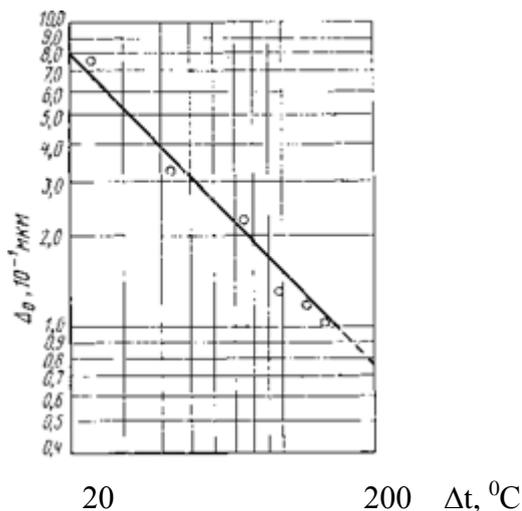


Рис. 15. Влияние степени переохлаждения Δt на межпластиночные расстояния Δ_0 в перлите

Однако надо учитывать, что разделение феррито-цементитной структуры на перлит, сорбит и троостит условно и между этими структурами нет четкой границы.

Перлит, сорбит и троостит, образующиеся при распаде переохлажденного аустенита, являются феррито-цементитными структурами, имеющими пластинчатое строение, и различающимися лишь степенью дисперсности.

Однако в отличие от перлита (эвтектоида) сорбит и троостит, называемые квазиэвтектоидными, не являются равновесными структурами и в сталях, не соответствующих эвтектоидному составу, содержат углерода больше или меньше 0,8 %.

Механические свойства стали со структурами перлита, сорбита и троостита.

Твердость и прочность стали с указанными структурами прямо пропорциональна площади поверхности раздела между ферритом и цементитом. Поэтому с увеличением степени дисперсности феррито-цементитной структуры (уменьшением Δ_0), т. е. с понижением температуры его распада, твердость, временное сопротивление, пределы текучести и выносливости возрастают.

Относительное удлинение и относительное сужение наивысшие у сорбита. При переходе к трооститу (более низкой температуре превращения) пластичность (δ и ψ) уменьшается.

Увеличение содержания углерода в аустените доэвтектоидной концентрации повышает его устойчивость (кривые изотермической диаграммы сдвигаются вправо) (рис. 16).

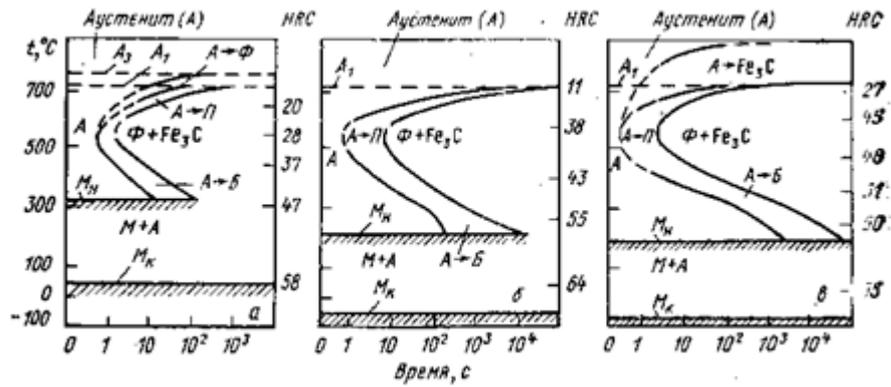


Рис. 16. Диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита:
a — доэвтектоидная сталь, (0,45 % C); *б* — эвтектоидная сталь (0,8 % C);
в — заэвтектоидная сталь (1,2 % C)

2.2. Мартенситное превращение в стали

Природа мартенсита. Мартенсит является частично упорядоченным пересыщенным твердым раствором внедрения углерода в α -железе. Мартенсит имеет тетрагональную решетку (рис. 17, *a*), в которой один период c больше другого— a . При увеличении содержания углерода высота тетрагональной призмы c увеличивается, а размеры ее основания a уменьшаются (рис. 17, *б*).

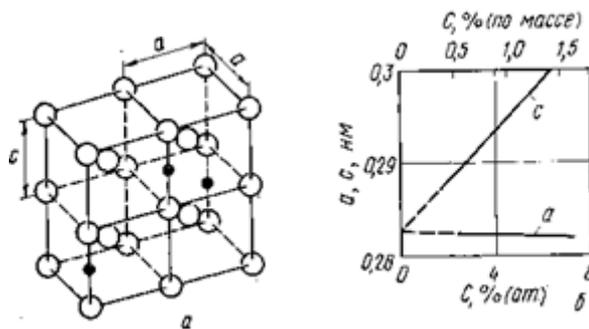


Рис. 17. Кристаллическая решетка мартенсита (*a*) и зависимость периодов решетки мартенсита a и c от содержания углерода (*б*)

Механизм мартенситного превращения. Мартенситное превращение происходит только в том случае, если быстрым охлаждением аустенит переохлажден до низких температур, когда диффузионные процессы становятся невозможными. При мартенситном превращении не

происходит перераспределения компонентов между аустенитом и мартенситом, поэтому его можно рассматривать, как фазовое превращение в однокомпонентной системе.

Образование мартенсита становится возможным лишь тогда, когда его свободная энергия будет меньше свободной энергии аустенита. Это имеет место при переохлаждении аустенита до температуры ниже T_0 (рис. 18, а). Свободная энергия мартенсита выше, чем феррито-цементитной структуры. В условиях большого переохлаждения (ниже T_0) феррито-цементитная структура образоваться не может, и аустенит превращается в мартенсит, что приводит систему к относительному минимуму свободной энергии.

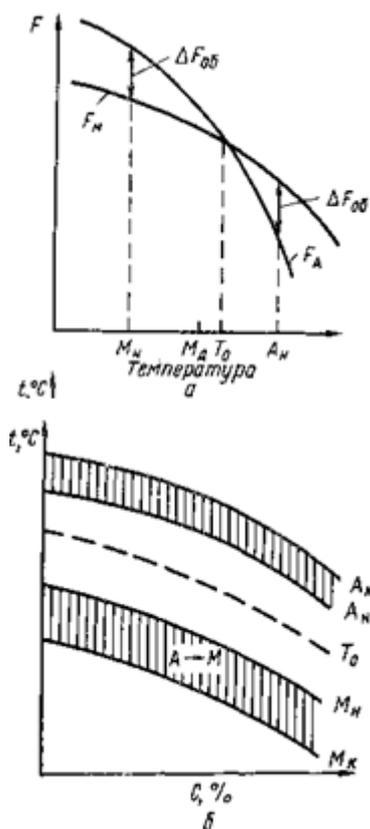


Рис. 18 Зависимость свободных энергий аустенита F_A и мартенсита F_M от температуры (а) и точек T_0 , M_n и M_k от состава аустенита (б).

Для начала мартенситного превращения требуется большое переохлаждение аустенита (точка M_n на рис. 18). Превращение аустенита в мартенсит и обратное превращение мартенсита в аустенит протекает в интервале температур ($M_n — M_k$ и $A_n — A_k$), который зависит от состава аустенита (рис. 18, б). Деформация аустенита при температуре между M_n и M_d (лежащей несколько ниже T_0) также вызывает мартенситное превращение (рис. 18, а) образуется мартенсит деформации.

Сдвиговый механизм мартенситного превращения отличается закономерным кооперативным направленным смещением атомов в процессе перестройки решетки. Это

приводит к макроскопическому сдвигу, внешним проявлением которого является появление игольчатого микрорельефа на поверхности металлического шлифа (рис. 19, а). В процессе превращения кристаллы мартенсита сопряжены с аустенитом по определенным кристаллографическим плоскостям, и между растущими мартенситными кристаллами и аустенитной матрицей образуется когерентная граница.

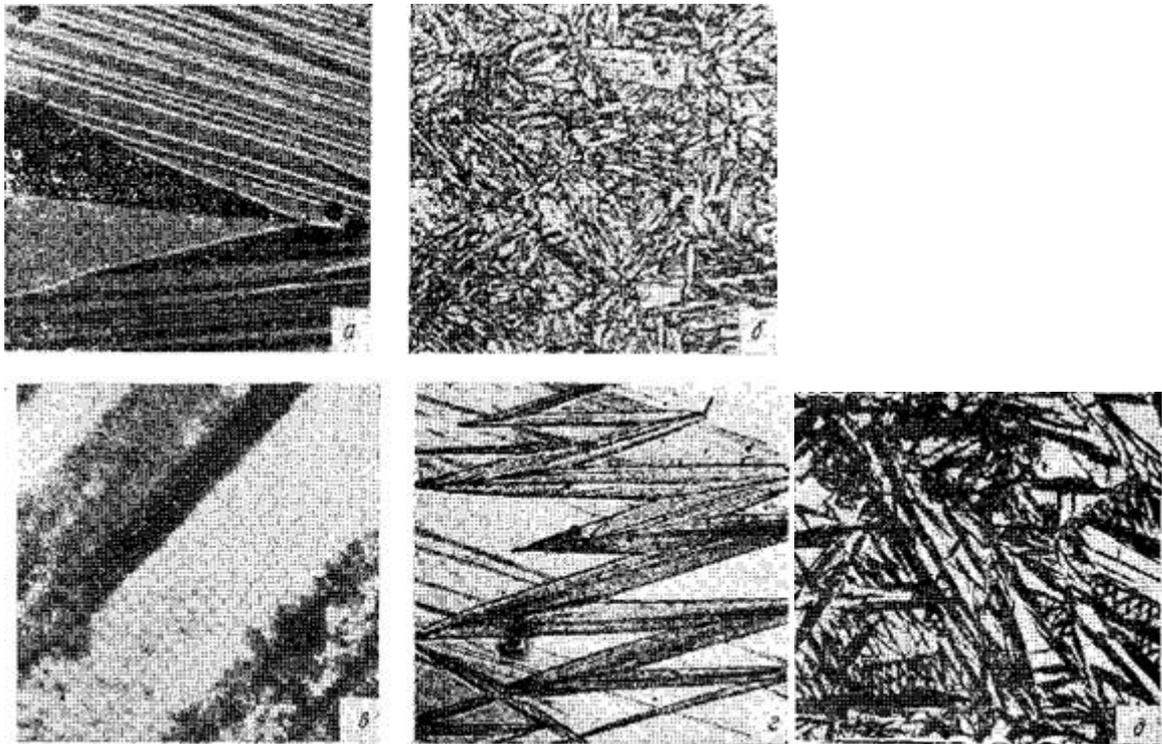


Рис. 19 Микроструктура мартенсита: а - мартенситный рельеф; б - низкоуглеродистый пакетный мартенсит, х 800; в - пакетный мартенсит, х 3000; г - пластинчатый мартенсит (фермообразное расположение пластин мартенсита х500); д – высокоуглеродистый пластинчатый мартенсит и остаточный аустенит, х500

Превращение аустенита в мартенсит происходит при непрерывном понижении температуры. Развитие превращения при этом протекает в результате образования новых кристаллов мартенсита. Кристаллы мартенсита ориентационно связаны с решеткой аустенита,

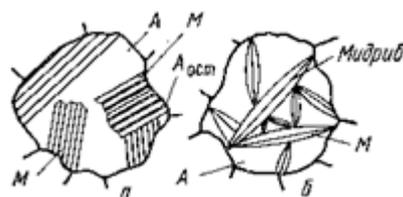


рис. 20. Схема пакетного (а) и пластинчатого (б) мартенсита

поэтому скорость их роста в разных кристаллографических направлениях неодинакова. Вследствие этого кристаллы мартенсита имеют форму пластин, которые закономерно ориентированы в исходном аустените. Различают два основных морфологических типа мартенситных кристаллов: пакетный (или реечный) и пластинчатый (двойникованный). Пакетный мартенсит образуется в углеродистых и легированных конструкционных сталях (содержащих не более 0,5 % С), у которых точка М лежит при сравнительно высоких температурах (рис. 20). Кристаллы пакетного мартенсита имеют форму тонких (0,1—0,2 мкм) пластин (реек). Пластинчатый (двойникованный) мартенсит образуется в высокоуглеродистых сталях (более 0,8 % С), имеющих низкие температуры мартенситных точек (рис. 18). Кристаллы низкотемпературного пластинчатого мартенсита имеют линзовидную форму, соседние кристаллы не параллельны и образуют сложные пространственные группировки (рис. 19, г и д и рис 20 б). В плоскости шлифа они могут иметь вид игл (рис. 19, д). Кристаллы пластинчатого мартенсита состоят в средней своей части из большого числа микродвойников, образующих среднюю зону повышенной травимости, называемую мидрибом (рис. 19,г и 20, б). Толщина этих двойников может достигать ~ 10 нм. Размеры кристаллов любой морфологии мартенсита во многом определяются величиной зерна исходного аустенита (или субзерна при наличии субструктуры). Кристаллы мартенсита (особенно те, которые образуются вблизи M_n) тем крупнее, чем больше зерно аустенита.

Кинетика мартенситного превращения. Мартенситное превращение обычно начинается сразу при температуре M_n и протекает не в изотермических условиях, а при непрерывном охлаждении в интервале температур.

Чтобы мартенситное превращение развивалось, необходимо непрерывно охлаждать сталь ниже температуры M_n . Если охлаждение прекратить, то мартенситное превращение практически также останавливается. Эта особенность мартенситного превращения резко отличает его от перлитного, которое полностью протекает в изотермических условиях при температуре ниже точки A_1 . Количество образовавшегося мартенсита в зависимости от температуры, до которой охлажден образец, может быть выражено так называемой мартенситной кривой. Чем ниже температура в интервале $M_n—M_k$, тем больше образуется мартенсита. При этом количество мартенсита возрастает в результате образования все новых и новых кристаллов, а не вследствие роста уже возникших кристаллов и уже имеющих некогерентную границу. По достижении определенной для каждой стали температуры превращение аустенита в мартенсит прекращается. Эту температуру окончания мартенситного превращения обозначают M_k . Положение точек M_n и M_k не зависит от скорости охлаждения и обусловлено химическим составом аустенита. Чем больше в аустените углерода, тем ниже температура точек M_n и M_k . Все легирующие элементы,

за исключением кобальта и алюминия, понижают точки M_n и M_k . Мартенситное превращение не протекает до конца (см. рис. 18). Поэтому в закаленной стали, особенно в стали имеющей точку M_k ниже $20\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 19), присутствует остаточный аустенит. Его количество тем больше, чем ниже температура точек M_n и M_k , т. е. чем выше содержание в аустените углерода и легирующих элементов. В стали с $0,6\text{—}1,0\text{ }\%$ С количество остаточного аустенита не превышает $10\text{ }\%$, а в стали с $1,3\text{—}1,5\text{ }\%$ С — оно достигает $30\text{—}50\text{ }\%$ (объемн.).

При больших количествах остаточного аустенита ($20\text{—}30\text{ }\%$) его можно наблюдать в микроструктуре закаленной стали в виде светлых полей между иглами мартенсита (см. рис. 19, д).

Стабилизация аустенита. Если задержать на некоторое время охлаждение при температуре лежащей выше температуры окончания мартенситного превращения, то аустенит, сохранившийся непревращенным при охлаждении до этой температуры, становится более устойчивым. Подобная стабилизация аустенита выражается в том, что при последующем понижении температуры превращение аустенита в мартенсит протекает с трудом. Оно происходит при более низкой температуре (глубоком охлаждении) и менее интенсивно. Количество образующегося в итоге мартенсита оказывается меньше, чем при непрерывном охлаждении до M_k . Это явление стабилизации проявляется более сильно в интервале температур M_n и M_k и зависит от температуры, при которой задерживалось охлаждение. Температура, ниже которой проявляется этот эффект стабилизации, по предложению А. П. Гуляева, обозначается M_c . Явление стабилизации иногда объясняют релаксацией напряжений, которые стимулируют мартенситное превращение.

Свойства мартенсита. Характерной особенностью мартенсита является его высокая твердость и прочность. Твердость мартенсита возрастает с увеличением в нем содержания углерода (см. рис. 128, б); в стали с $0,6\text{—}0,7\text{ }\%$ С твердость мартенсита составляет HRC 65 (HV 9600 МПа), это в 6 раз больше твердости феррита.

Временное сопротивление низкоуглеродистого мартенсита ($0,015\text{ }\%$ С) составляет ~ 1000 , а при $0,6\text{—}0,8\text{ }\%$ С достигает $2000\text{—}2300$ МПа. Однако с повышением в мартенсите содержания углерода возрастает склонность его к хрупкому разрушению. Мартенсит с $> 0,35\text{—}0,4\text{ }\%$ С обладает низкой пластичностью и разрушается хрупко.

Мартенсит по сравнению с другими структурными составляющими стали и особенно с аустенитом имеет наибольший удельный объем: удельный объем аустенита

при содержании 0,2—1,4 % С составляет 0,12227—0,12528, а мартенсита 0,12708—0,13061 см³/г. Увеличение удельного объема при образовании мартенсита является одной из основных причин возникновения при закалке больших внутренних напряжений, вызывающих деформацию изделий или даже появление трещин.

Увеличение объема стали после закалки по сравнению с исходным тем больше, чем выше содержание углерода в мартенсите, и составляет 1,13—1,2 % при изменении содержания углерода от 0,4 до 0,8 %. В заэвтектоидных сталях происходит уменьшение объемных изменений вследствие увеличения количества остаточного аустенита.

Наибольшее увеличение объема наблюдается у эвтектоидной стали, поэтому она наиболее чувствительна к закалочным трещинам и деформациям.

2.3 Промежуточное (бейнитное) превращение

Природа бейнита. Бейнитное (промежуточное) превращение протекает в температурной области между перлитным и мартенситным превращениями (см. рис. 13). В результате промежуточного превращения образуется бейнит, представляющий собой структуру, состоящую из α -твердого раствора, претерпевшего мартенситное превращение и несколько пересыщенного углеродом, и частиц карбидов. Различают структуру верхнего и нижнего бейнита. Верхний бейнит, образующийся обычно в области температур ~500—350 °С, имеет «перистый» вид, в котором частицы карбидов выделяются не в виде пластинок, как в перлите, а в виде изолированных узких частиц (рис.21, а).

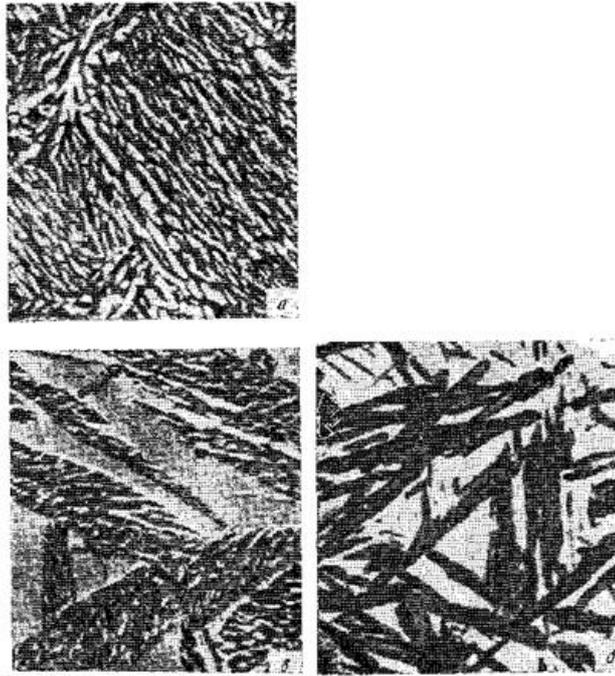


Рис. 21. Микроструктура бейнита: а — верхний бейнит. X 50000; б — нижний бейнит и остаточный аустенит. X 500; в — то же - X 10000

Нижний бейнит образуется при температурах от 350 °С до точки M_n и имеет игольчатое (пластинчатое) мартенситоподобное строение (рис. 21, б и в). Карбидные частицы в нижнем бейните располагаются в пластинках α -фазы (рис. 21, б).

Механизм промежуточного превращения. Бейнитное (промежуточное) превращение переохлажденного аустенита (рис. 22) сочетает в себе элементы перлитного и мартенситного превращений: диффузионное перераспределение углерода в аустените и между продуктами его распада и сдвиговое кооперативное мартенситное превращение $\gamma \rightarrow \alpha$.

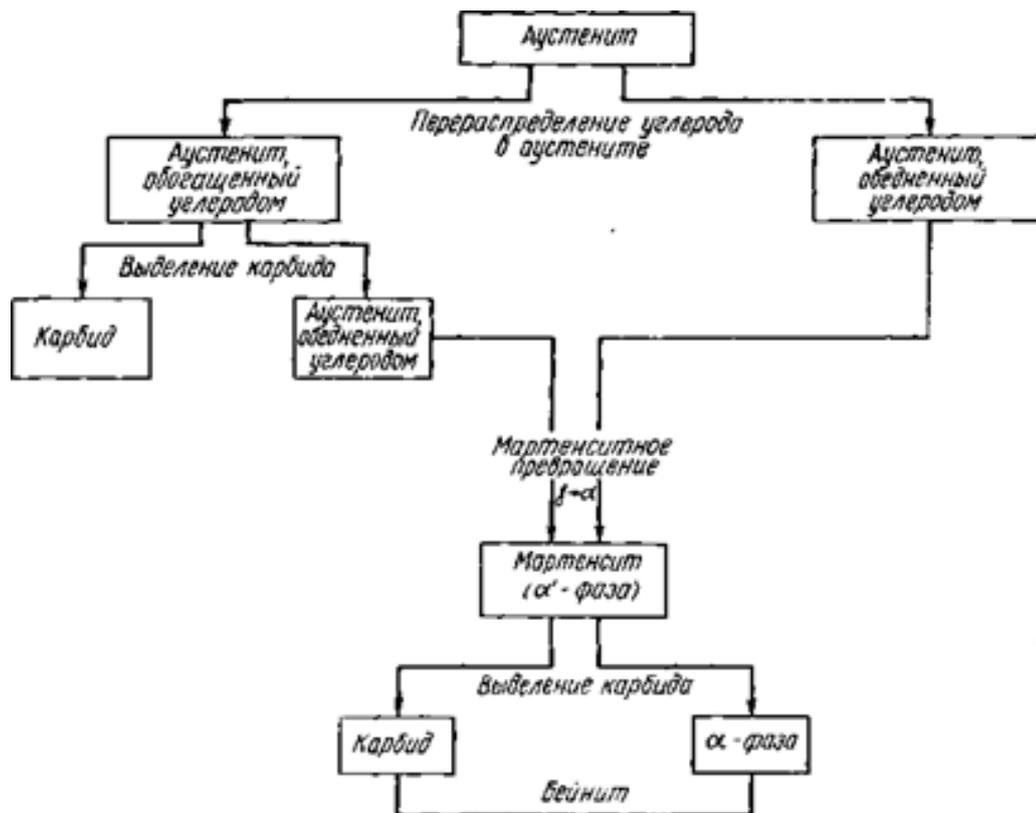


Рис. 22. Схема бейнитного превращения

В начале этого превращения происходит диффузионное перераспределение углерода в аустените (рис. 22), что приводит к образованию в нем объемов, обогащенных и обедненных углеродом. Участки аустенита с низким содержанием углерода, у которых точка M_n лежит в области температур промежуточного превращения, претерпевают $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение по мартенситному механизму. Образующийся малоуглеродистый мартенсит тут же отпускается при температурах промежуточной области с образованием бейнитной структуры. В объемах аустенита, обогащенных углеродом, если их пересыщение высокое, в процессе изотермической выдержки могут выделяться частицы карбидов (рис.22). Это, естественно, приведет к обеднению этих участков аустенита углеродом и к протеканию в них превращения по мартенситному механизму. Мартенситный механизм образования α -фазы и обуславливает ее игольчатую структуру и появление характерного рельефа на поверхности микрошлифов, особенно заметного при образовании нижнего бейнита.

Образующаяся при бейнитном превращении α -фаза, (мартенсит), пересыщена углеродом и притом тем сильнее, чем ниже температуры превращения. Поэтому сразу после $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения из пересыщенного α -раствора могут выделяться частицы

карбидов.

Структура верхнего бейнита более грубая, чему способствует также выделение карбидов главным образом из аустенита. При образовании нижнего бейнита, наоборот, обогащение аустенита углеродом обычно сравнительно невелико, а пересыщение α -фазы более значительно. Поэтому карбиды выделяются главным образом в кристаллах α -фазы, а сама структура нижнего бейнита более тонкая.

Как и мартенситное превращение, рассматриваемое промежуточное превращение не идет до конца. Нераспавшийся при изотермической выдержке аустенит при последующем охлаждении будет в той или иной степени претерпевать мартенситное превращение, а частично и сохраняться (остаточный аустенит).

Механические свойства стали с бейнитной структурой. Образование верхнего бейнита (распад при $\sim 550\text{—}450\text{ }^\circ\text{C}$) снижает пластичность стали по сравнению с получаемой для продуктов распада аустенита в нижней части перлитной области (см. рис. 11). При этом твердость и прочность не изменяются или несколько снижаются.

Пониженная пластичность верхнего бейнита связана с выделением сравнительно грубых карбидов по границам ферритных зерен.

Получающийся в результате распада аустенита в нижней области промежуточного превращения (см. рис. 13) бейнит обеспечивает высокий уровень механических свойств: прочности, пластичности и вязкости. По сравнению с продуктами распада аустенита в перлитной области (сорбит, троостит) нижний бейнит имеет более высокую твердость и прочность при высокой пластичности и вязкости.

Основанная на промежуточном превращении термическая обработка (изотермическая закалка) на нижний бейнит обеспечивает высокий комплекс механических свойств и, что особенно важно, высокую конструктивную прочность, поэтому ее широко используют в промышленности для упрочнения ответственных деталей машин.

3. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении

При переохлаждении аустенита до температуры A_1 его свободная энергия практически равна свободной энергии стабильных низкотемпературных фаз, поэтому его превращение в этих условиях не может протекать. При реальных скоростях охлаждения, когда аустенит переохлаждается до температур ниже A_1 он становится метастабильным и превращается в более стабильные структуры.

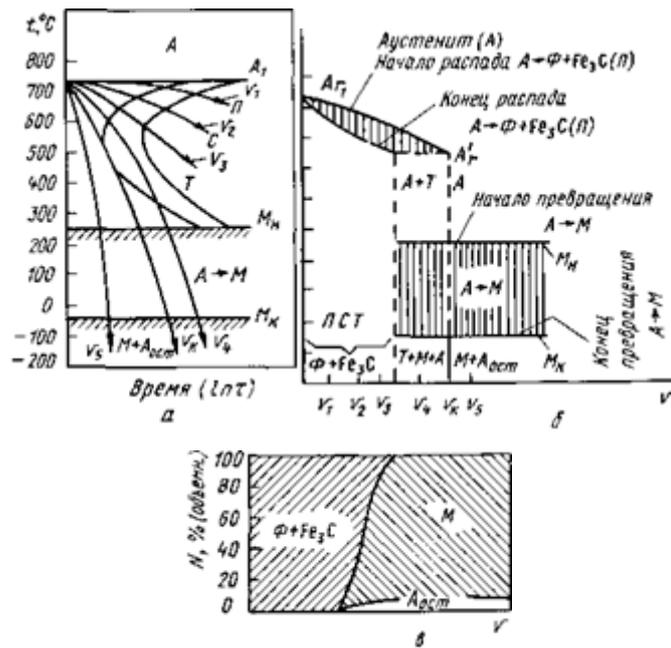


Рис. 23. Изотермическое превращение аустенита эвтектоидной стали: *а* — кинетика превращения; *б* — влияние скорости v охлаждения на температуру превращения аустенита; *в* — влияние скорости охлаждения на количество структурных составляющих стали

С увеличением скорости охлаждения возрастает степень переохлаждения аустенита относительно равновесной точки A_1 . Схематические диаграммы, показывающие влияние скорости охлаждения на температуру распада аустенита и на образование структурных составляющих после охлаждения углеродистой эвтектоидной стали, приведены на рис. 23.

Чем больше скорость охлаждения и ниже температура распада аустенита (рис. 23 а), тем дисперснее образующаяся феррито-цементитная структура. Следовательно, при небольшой скорости охлаждения v_1 образуется перлит (рис.23 а), при большей v_2 — сорбит и еще большей v_3 —троостит (рис.23, а и б). Бейнит при непрерывном охлаждении углеродистой стали обычно не образуется.

При высоких скоростях охлаждения v_4 (рис. 23, а и б) часть аустенита переохлаждается до точки M_H и превращается в мартенсит. Структура в этом случае состоит из троостита и мартенсита (рис. 24, б).

При очень большой скорости охлаждения перлитный распад аустенита становится вообще невозможным и тогда аустенит переохлаждается до точки M_H и превращается в мартенсит (кривая v_5 на рис. 23). Превращение аустенита в мартенсит не идет до конца, поэтому в закаленной стали наряду с мартенситом всегда присутствует в некотором количестве остаточный аустенит (рис. 24, в).

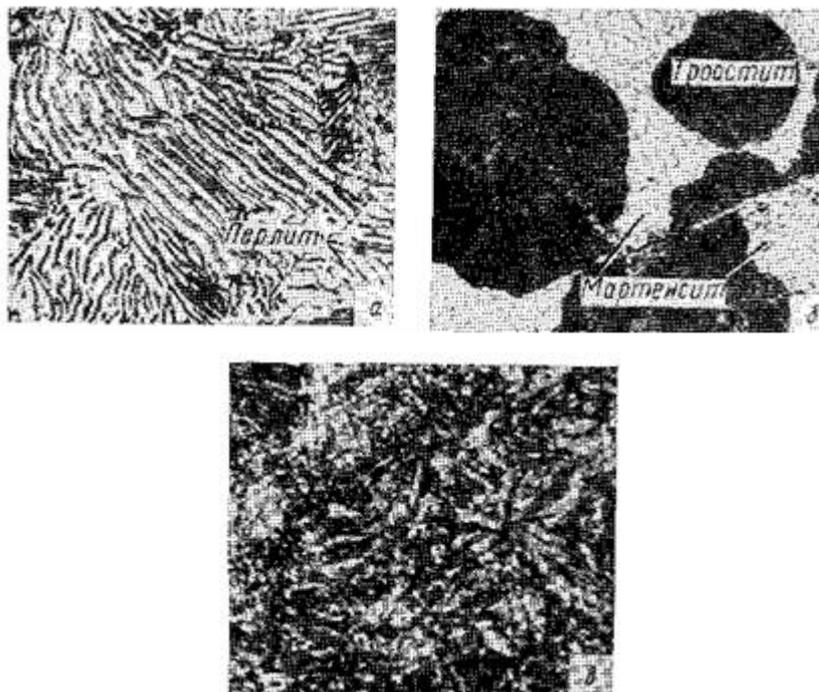


Рис. 24. Микроструктура стали после охлаждения с различной скоростью. X 500: *a* — перлит, охлаждение со скоростью v_1 (рис. 21, *a*); *б* — мартенсит + троостит (темный), охлаждение со скоростью v_4 ; *б* — мартенсит, охлаждение со скоростью v_5

Минимальную скорость охлаждения v_k (см. рис. 23), при которой весь аустенит переохлаждается до точки M_n и превращается в мартенсит, называют *критической скоростью закалки*.

Значение критической скорости закалки неодинаково для разных сталей и зависит от устойчивости аустенита, определяемой составом стали. Чем больше его устойчивость, тем меньше критическая скорость закалки. Углеродистые стали имеют высокую критическую скорость закалки (800—200 °C/c). Наименьшая критическая скорость закалки у эвтектоидной стали. Чем крупнее зерно аустенита и чем он однороднее (т. е. чем выше температура нагрева), тем больше устойчивость переохлажденного аустенита и меньше его критическая скорость закалки.

Легирующие элементы, повышая устойчивость аустенита, резко снижают критическую скорость закалки. Сильно снижают критическую скорость закалки марганец и никель и в меньшей степени вольфрам. Для многих легированных сталей критическая скорость закалки снижается до 20—30 °C/c и более. Кобальт является единственным легирующим элементом, понижающим устойчивость аустенита и повышающим критическую скорость закалки.

3.1 Термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита

Для разработки технологии термической обработки используют, кроме диаграмм изотермического распада аустенита, необходимых для различных изотермических методов обработки, *термокинетические диаграммы (рис.25)*.

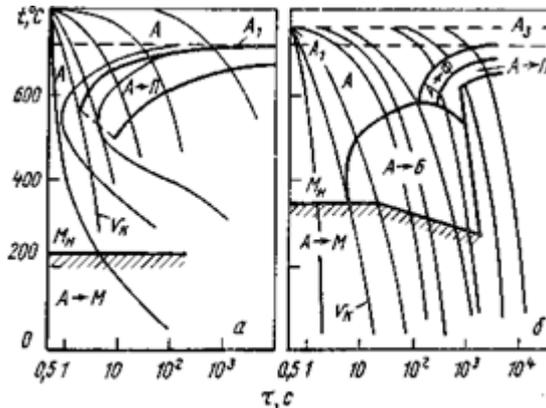


Рис. 25. Термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита: *а* — эвтектоидная сталь; *б* — доэвтектоидная легированная сталь с 0,39 % С; 1,0 % Сг; 0,15 % Мо. Тонкие линии на диаграмме для эвтектоидной стали соответствуют изотермическому превращению переохлажденного аустенита.

По этим диаграммам можно получить точные данные о температурных интервалах протекания фазовых превращений при непрерывном охлаждении и об образующихся при этом структурных составляющих.

Термокинетические диаграммы строят в координатах температура — время на основе анализа серии кривых охлаждения, на которых отмечают температуры начала и конца перлитного и промежуточного превращений и, соответственно, области этих превращений (рис. 25, *а*). Эти диаграммы показывают, что при малых скоростях охлаждения в углеродистой стали протекает только перлитный распад аустенита с образованием феррито-цементитной структуры различной степени дисперсности (перлит, сорбит, троостит). При высоких скоростях охлаждения (выше v_k) перлитный распад аустенита подавляется и аустенит претерпевает только мартенситное превращение. В легированной стали существует и область промежуточного превращения, в которой аустенит претерпевает распад с образованием бейнита (рис. 25, *б*). Повышение скорости охлаждения подавляет перлитное превращение и приводит к образованию бейнита. Промежуточное превращение не идет до конца и поэтому после охлаждения наряду с бейнитом всегда будет присутствовать мартенсит и остаточный

аустенит. Для получения мартенситной структуры охлаждение должно происходить со скоростью выше критической скорости, когда перлитное и бейнитное превращения становятся невозможными.

4. Превращение мартенсита и остаточного аустенита при нагреве (отпуск стали)

Термическую обработку, заключающуюся в нагреве закаленной стали до температуры ниже точки A_1 называют отпуском.

Типичная структура закаленной стали — мартенсит и остаточный аустенит, которые являются неравновесными фазами. Переход стали в более устойчивое состояние должен сопровождаться "распадом мартенсита и остаточного аустенита с образованием структуры, состоящей из феррито-карбидной смеси. Характер и скорость распада мартенсита и остаточного аустенита обусловлены температурой нагрева при отпуске.

Структуру, получающуюся в результате распада мартенсита при температурах ниже 350°C называют *отпущенным мартенситом*.

Чем выше температура отпуска, тем меньше содержание углерода в твердом растворе (мартенсите) (рис. 26). Каждой температуре нагрева соответствует определенное содержание углерода в мартенсите. С увеличением длительности нагрева при этих температурах сначала наблюдается интенсивное выделение углерода, а затем этот процесс замедляется и при больших выдержках практически прекращается.

Распад мартенсита отпуске сопровождается уменьшением объема.

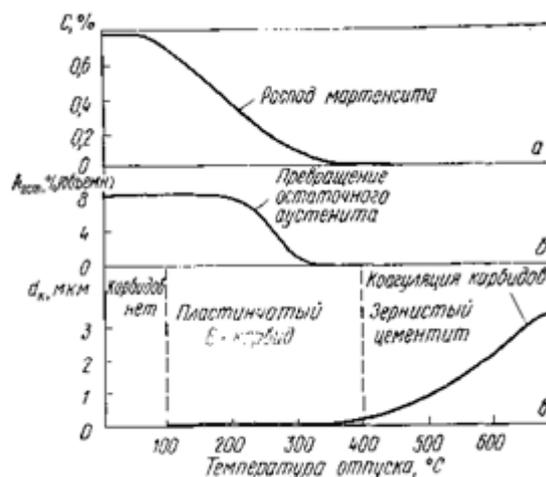


Рис. 26. Изменение строения и состава фаз при отпуске углеродистой стали (0,8 % C)

Легирующие элементы оказывают незначительное влияние на распад мартенсита только при $t < 150$ °С. При более высоких температурах введение в сталь Сг, Мо, W, V, Ti и Si сильно тормозит процессы распада мартенсита, образования и роста частиц карбидов. Это имеет большое практическое значение. Если в углеродистой и низколегированной стали состояние отпущенного мартенсита, обладающего высокой твердостью, сохраняется лишь до 300—350 °С, то в высоколегированной стали такое состояние сохраняется до 450—500 °С и выше.

При отпуске высокоуглеродистых и многих легированных среднеуглеродистых сталей, содержащих повышенное количество остаточного аустенита, при 200—300 °С происходит превращение остаточного аустенита с образованием обедненного по углероду мартенсита и частиц карбидов.

Большинство легирующих элементов не только увеличивает количество остаточного аустенита в закаленной стали из-за снижения температуры M_n , но и повышает температурный интервал его распада при отпуске. В некоторых высоколегированных сталях (например, быстрорежущих), содержащих 25—35 % (объемн.) остаточного аустенита, распад его протекает после отпуска при 550—600 °С.

Образующуюся после отпуска при 350—400 °С_структуру обычно называют *трооститом отпуска*.

Повышение температуры отпуска сверх 400—500 °С в углеродистых и многих низко- и среднелегированных сталях не вызывает изменения фазового состава. Однако с повышением температуры изменяется микроструктура. Структуру стали после высокого отпуска называют *сорбитом отпуска*.

Частицы карбидов в структуре троостита или сорбита отпуска в отличие от троостита и сорбита, полученных в результате распада переохлажденного аустенита, имеют зернистое, а не пластинчатое строение. Образование зернистых структур улучшает многие свойства стали, особенно пластичность и вязкость, а главное — сопротивление разрушению. При одинаковой твердости и временном сопротивлении сталь с зернистой структурой имеет более высокие значения предела текучести, относительного сужения и ударной вязкости, а также параметров вязкости разрушения.

Легирующие элементы Мо, W, V, Сг замедляют процесс коагуляции. Поэтому после отпуска при одинаковой температуре сталь, легированная этими элементами, сохраняет более высокую дисперсность карбидных частиц и соответственно большую прочность.

Распад мартенсита при отпуске влияет на все свойства стали. При низких температурах отпуска (до 200—250 °С) уменьшается склонность стали к хрупкому разрушению. В случае низкотемпературного отпуска твердость закаленной и отпущенной стали не зависит от содержания в ней легирующих элементов и определяется в основном содержанием углерода в α -растворе. Поэтому высокоуглеродистые стали, имеющие высокую твердость после закалки, сохраняют ее (более высокое содержание углерода в мартенсите) и после отпуска при температурах до 200—250 °С. Прочность и вязкость стали при низких температурах отпуска несколько возрастают вследствие уменьшения макро- и микронапряжений и изменения структурного состояния (выделения упрочняющих фаз—карбидов). С повышением температуры отпуска от 200—250 до 500—680 °С заметно снижается твердость, временное сопротивление, предел текучести и повышается относительное удлинение и сужение (рис. 27, б).

Все легированные стали, особенно содержащие карбидообразующие элементы, после отпуска при одинаковых сравниваемых температурах обладают более высокой твердостью, чем углеродистые стали (рис. 27, а), что связано с замедлением распада мартенсита, образованием и коагуляцией карбидов. В сталях, содержащих большое количество таких элементов, как хром, вольфрам или молибден, в результате отпуска при высоких температурах (500—600 °С) наблюдается даже повышение прочности и твердости, связанное с выделением в мартенсите частиц специальных карбидов, повышающих сопротивление пластической деформации (рис. 27, а).

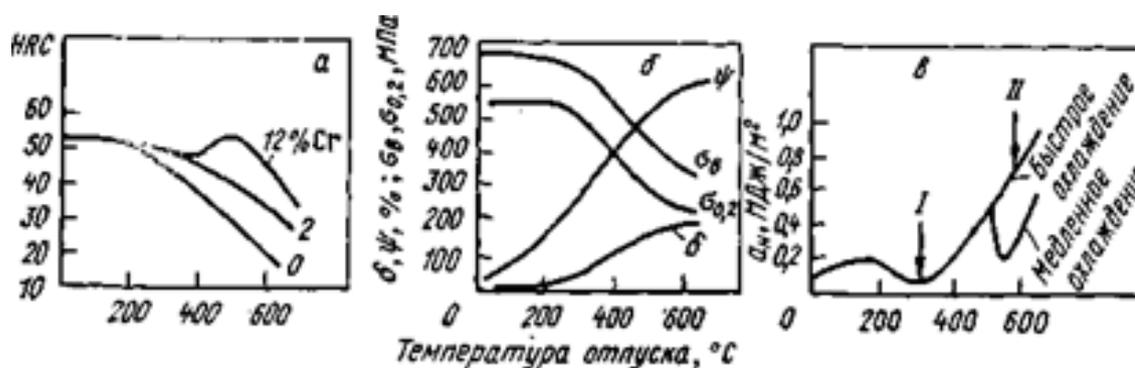


Рис. 27. Влияние температуры отпуска на твердость (а), механические свойства при растяжении (б) и ударную вязкость (в) легированной стали

5. Термическое и деформационное старение углеродистой стали

Под естественным старением понимают изменение свойств, протекающее во времени без заметного изменения микроструктуры. Эти процессы происходят главным образом в низкоуглеродистых сталях. Кроме того, существует искусственное старение, которое подразделяют на два вида: термическое и деформационное (механическое).

Термическое старение протекает в результате изменения растворимости углерода в α -железе в зависимости от температуры.

Термическое старение заметно протекает в низкоуглеродистых сталях. При более высоком содержании углерода вследствие зародышевого воздействия большого количества цементитных частиц, образовавшихся при перлитном превращении самостоятельного выделения третичного цементита (ϵ -карбида) не наблюдается.

Деформационное (механическое) старение. Этот процесс протекает после пластической деформации, если она была проведена при температурах ниже температуры рекристаллизации и особенно при 20⁰ С. Деформационное старение развивается в течение 15—16 суток при 20 °С и в течение нескольких минут при 200—350 °С.

Термическое и деформационное старение повышают прочность и твердость, но одновременно резко снижают ударную вязкость и повышают порог хладноломкости.

В сталях возможно термдеформационное старение, т. е. одновременное протекание термического и деформационного старения. Старение отрицательно сказывается на эксплуатационных и технологических свойствах многих сталей. Старение может протекать в строительных и мостовых сталях, подвергаемых пластической деформации при гибке, монтаже и сварке, и, усиливаясь охрупчиванием при низких температурах, может явиться причиной разрушения конструкции. Развитие деформационного старения резко ухудшает штампуемость листовой стали. Поэтому многие углеродистые стали подвергают обязательно испытаниям на склонность их к деформационному старению (ГОСТ 7268—67).

Склонность стали к старению снижается при модифицировании ее алюминиевым, титаном или ванадием.

III. ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ И СПЛАВОВ[3,4]

1. Назначение и виды термической обработки

Термической (тепловой) обработкой называются процессы, сущность которых заключается в нагреве и охлаждении изделий по определенным режимам, в результате чего

происходят изменения структуры, фазового состава, механических и физических свойств материала, без изменения химического состава.

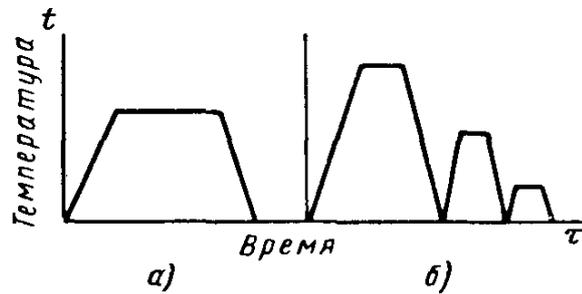


Рис. 28 Графики термической обработки

а) - простой, б) - сложной

Назначение термической обработки металлов – получение требуемой твердости, улучшение прочностных характеристик металлов и сплавов. Термическая обработка подразделяется на термическую, термомеханическую и химико-термическую.

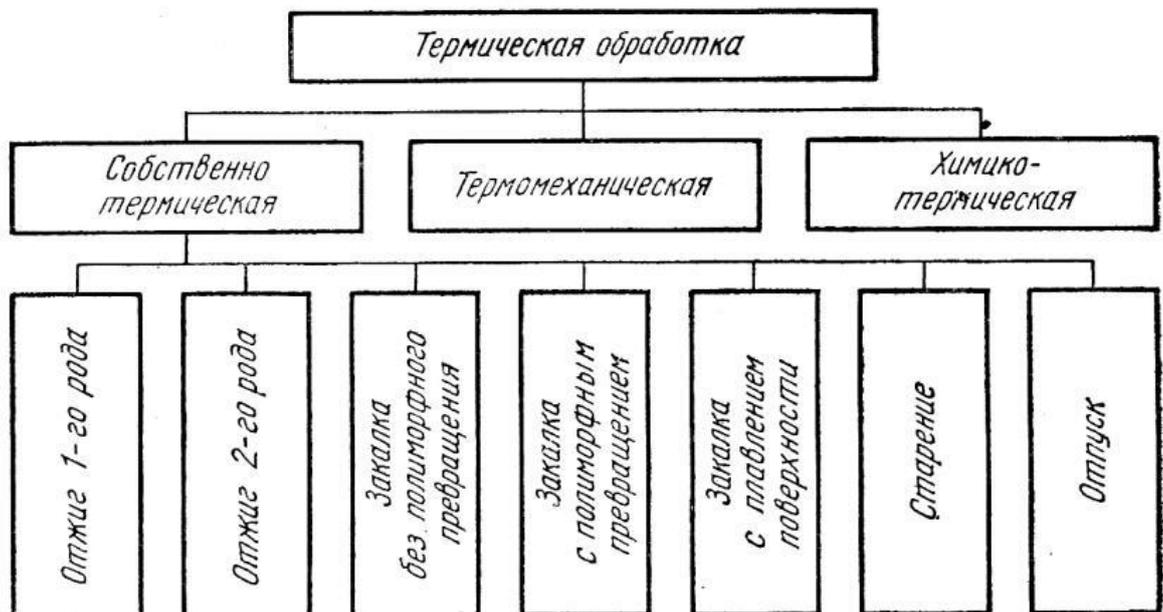


Рис. 29 Схема классификации основных видов термической обработки металлов и сплавов

Термическая обработка – только термическое воздействие, термомеханическая – сочетание термического воздействия и пластической деформации, химико-термическая – сочетание термического и химического воздействия. Термическая обработка, в зависимости от

структурного состояния, получаемого в результате ее применения, подразделяется на отжиг (первого и второго рода), закалку и отпуск.

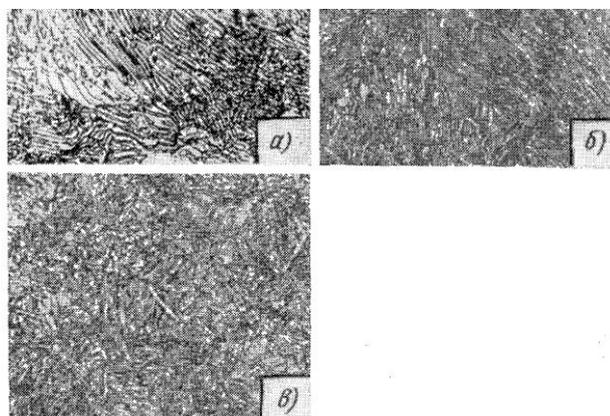


Рис. 30 Структуры эвтектоидной стали в зависимости от температуры распада аустенита: а- перлит, б- сорбит, в – тростит, X500

1.1 Отжиг

Отжиг – термическая обработка заключающаяся в нагреве металла до определенных температур, выдержка и последующего очень медленного охлаждения вместе с печью. Применяют для улучшения обработки металлов резанием, снижения твердости, получения зернистой структуры, а также для снятия напряжений, устраняет частично (или полностью) всякого рода неоднородности, которые были внесены в металл при предшествующих операциях (механическая обработка, обработка давлением, литье, сварка), улучшает структуру стали.

Отжиг первого рода. Это отжиг при котором не происходит фазовых превращений, а если они имеют место, то не оказывают влияния на конечные результаты, предусмотренные его целевым назначением. Различают следующие разновидности отжига первого рода: гомогенизационный и рекристаллизационный.

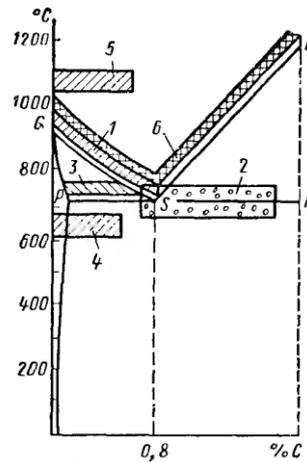


Рис. 31 Температура нагрева стали для отжига и нормализации:

1- полный отжиг, 2- отжиг на зернистый перлит, 3- неполный отжиг, 4- рекристаллизационный отжиг, 5- диффузионный отжиг, 6- нормализация.

Гомогенизационный – это отжиг с длительной выдержкой при температуре выше 950°C (обычно $1100\text{--}1200^{\circ}\text{C}$) с целью выравнивания химического состава.

Рекристаллизационный – это отжиг наклепанной стали при температуре, превышающей температуру начала рекристаллизации, с целью устранения наклепа и получение определенной величины зерна.

Отжиг второго рода. Это отжиг, при котором фазовые превращения определяют его целевое назначение. Различают следующие виды: полный, неполный, диффузионный, изотермический, светлый, нормализованный (нормализация), сфероидизирующий (на зернистый перлит).

Полный отжиг производят путем нагрева стали на $30\text{--}50^{\circ}\text{C}$ выше критической точки, выдержкой при этой температуре и медленным охлаждением до $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$ со скоростью 200°C в час углеродистых сталей, 100°C в час для низколегированных сталей и 50°C в час для высоколегированных сталей. Структура стали после отжига равновесная, устойчивая.

Неполный отжиг производится путем нагрева стали до одной из температур, находящейся в интервале превращений, выдержкой и медленным охлаждением. Неполный отжиг применяют для снижения внутренних напряжений, понижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием

Диффузионный отжиг. Металл нагревают до температур 1100–1200⁰С, так как при этом более полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания химического состава.

Изотермический отжиг заключается в следующем: сталь нагревают, а затем быстро охлаждают (чаще переносом в другую печь) до температуры, находящейся ниже критической на 50–100⁰С. В основном применяется для легированных сталей. Экономически выгоден, так как длительность обычного отжига (13 – 15) ч, а изотермического отжига (4 – 6) ч

Сфероидизирующий отжиг (на зернистый перлит) заключается в нагреве стали выше критической температуры на 20 – 30 °С, выдержке при этой температуре и медленном охлаждении.

Светлый отжиг осуществляется по режимам полного или неполного отжига с применением защитных атмосфер ил в печах с частичным вакуумом. Применяется с целью защиты поверхности металла от окисления и обезуглероживания.

Нормализация – заключается в нагреве металла до температуры на (30–50) ⁰С выше критической точки и последующего охлаждения на воздухе. Назначение нормализации различно в зависимости от состава стали. Вместо отжига низкоуглеродистые стали подвергают нормализации. Для среднеуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо закалки и высокого отпуска. Высокоуглеродистые стали подвергают нормализации с целью устранения цементитной сетки. Нормализацию с последующим высоким отпуском применяют вместо отжига для исправления структуры легированных сталей. Нормализация по сравнению с отжигом – более экономичная операция, так как не требует охлаждения вместе с печью.

1.2 Закалка

Закалка – это нагрев до оптимальной температуры, выдержка и последующее быстрое охлаждение с целью получения неравновесной структуры.

В результате закалки повышается прочность и твердость и понижается пластичность стали. Основные параметры при закалке – температура нагрева и скорость охлаждения. Критической скоростью закалки называется скорость охлаждения, обеспечивающая получение структуры – мартенсит или мартенсит и остаточный аустенит. В зависимости от формы детали, марки стали и требуемого комплекса свойств применяют различные способы закалки.

Закалка в одном охладителе. Деталь нагревают до температуры закалки и охлаждают в одном охладителе (вода, масло).

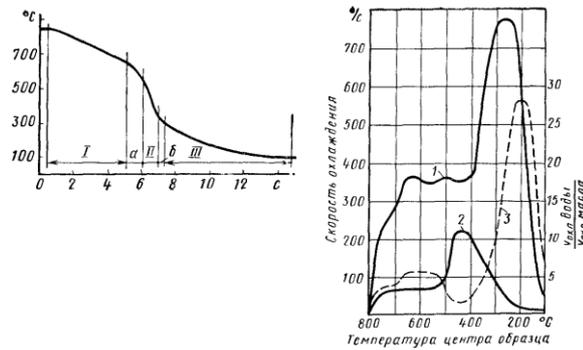


Рис. 32. а - стадии охлаждения в воде, б – охлаждающие способности: 1- воды при 20⁰С; 2 - масла при 50⁰С; 3- отношение скоростей охлаждения в воде и масле

Закалка в двух средах (прерывистая закалка) – это закалка при которой деталь охлаждают последовательно в двух средах: первая среда – охлаждающая жидкость (вода), вторая – воздух или масло.

Ступенчатая закалка. Нагретую до температуры закалки деталь охлаждают в расплавленных солях, после выдержки в течении времени необходимого для выравнивания температуры по всему сечению, деталь охлаждают на воздухе, что способствует снижению закалочных напряжений.

Изотермическая закалка так же, как и ступенчатая, производится в двух охлаждающих средах. Температура горячей среды (соляные, селитровые или щелочные ванны) различна: она зависит от химического состава стали, но всегда на 20–100 °С выше точки мартенситного превращения для данной стали. Окончательное охлаждение до комнатной температуры производится на воздухе. Изотермическая закалка широко применяется для деталей из высоколегированных сталей. После изотермической закалки сталь приобретает высокие прочностные свойства, то есть сочетание высокой вязкости с прочностью.

Закалка с самоотпуском имеет широкое применение в инструментальном производстве. Процесс состоит в том, что детали выдерживаются в охлаждающей среде не до полного охлаждения, а в определенный момент извлекаются из нее с целью сохранения в сердцевине детали некоторого количества тепла, за счет которого производится последующий отпуск.

1.3 Отпуск

Отпуск стали является завершающей операцией термической обработки, формирующей структуру, а следовательно, и свойства стали. Отпуск заключается в нагреве стали до различных температур (в зависимости от вида отпуска, но всегда ниже критической точки), выдержке при этой температуре и охлаждении с разными скоростями. Назначение отпуска –

снять внутренние напряжения, возникающие в процессе закалки, и получить необходимую структуру.

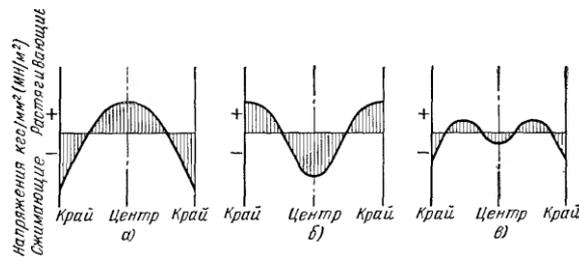


Рис.33 Остаточные напряжения после сквозной закалки (схема):
а- термические, б – структурные, в- суммарные

В зависимости от температуры нагрева закаленной детали различают три вида отпуска: высокий, средний и низкий.

Высокий отпуск производится при температурах нагрева выше 350–600 °С, но ниже критической точки; такой отпуск применяется для конструкционных сталей.

Средний отпуск производится при температурах нагрева 350 – 500 °С; такой отпуск широко применяется для пружинной и рессорной сталей.

Низкий отпуск производится при температурах 150–250 °С. Твердость детали после закалки почти не изменяется; низкий отпуск применяется для углеродистых и легированных инструментальных сталей, для которых необходимы высокая твердость и износостойкость. Контроль отпуска осуществляется по цветам побежалости, появляющимся на поверхности детали.

1.4 Старение

Старение – это процесс изменения свойств сплавов без заметного изменения микроструктуры. Известны два вида старения: термическое и деформационное.

Термическое старение протекает в результате изменения растворимости углерода в железе в зависимости от температуры.

Если изменение твердости, пластичности и прочности протекает при комнатной температуре, то такое старение называется естественным. Если же процесс протекает при повышенной температуре, то старение называется искусственным.

Деформационное (механическое) старение протекает после холодной пластической деформации.

1.5 Обработка холодом

Новый вид термической обработки, для повышения твердости стали путем перевода остаточного аустенита закаленной стали в мартенсит. Это выполняется при охлаждении стали до температуры нижней мартенситной точки.

1.6 Методы поверхностного упрочнения

Поверхностной закалкой называют процесс термической обработки, представляющий собой нагрев поверхностного слоя стали до температуры выше критической и последующее охлаждение с целью получения в поверхностном слое структуры мартенсита.

Различают следующие виды: индукционная закалка; закалка в электролите, закалка при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ), закалка с газопламенным нагревом.

Индукционная закалка основана на физическом явлении, сущность которого заключается в том, что электрический ток высокой частоты, проходя по проводнику, создает вокруг него электромагнитное поле. На поверхности детали, помещенной в этом поле, индуцируются вихревые токи, вызывая нагрев металла до высоких температур. Это обеспечивает возможность протекания фазовых превращений.

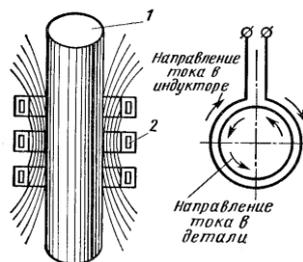


Рис. 34 Схема индукционного нагрева: 1 – деталь; 2- индуктор.

В зависимости от способа нагрева индукционная закалка подразделяется на три вида: одновременный нагрев и закалка всей поверхности (используется для мелких деталей); последовательный нагрев и закалка отдельных участков (используется для коленчатых валов и подобных им деталей); непрерывно-последовательный нагрев и закалка перемещением (используется для длинных деталей).

1.6.1 Газопламенная закалка.

Процесс газопламенной закалки заключается в быстром нагреве поверхности детали ацетилено-кислородным, газокислородным или кислородно-керосиновым пламенем до температуры закалки с последующим охлаждением водой или эмульсией.

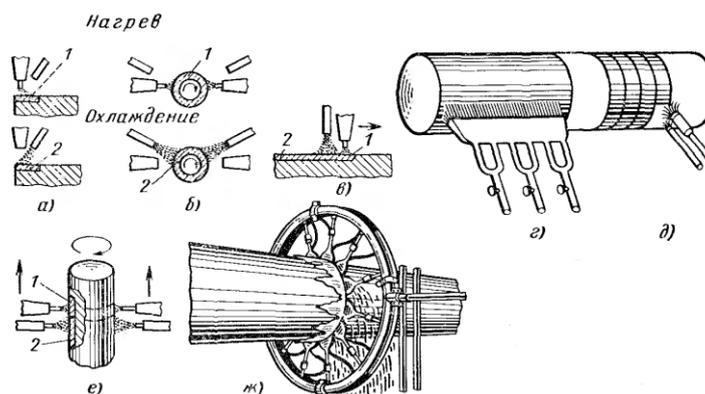


Рис. 35 Схемы способов поверхностной закалки при нагреве пламенем:
1- зона нагрева, 2- зона охлаждения

1.6.2 Закалка в электролите.

Процесс закалки в электролите заключается в следующем: в ванну с электролитом (5–10% раствор кальцинированной соли) опускают закаливаемую деталь и пропускают ток напряжением 220–250 В. В результате чего происходит нагрев детали до высоких температур. Охлаждение детали производят или в том же электролите (после выключения тока) или в специальном закалочном баке.

1.6.3 Термомеханическая обработка

Термомеханическая обработка (Т.М.О.) – новый метод упрочнения металлов и сплавов при сохранении достаточной пластичности, совмещающий пластическую деформацию и упрочняющую термическую обработку (закалку и отпуск). Различают три основных способа термомеханической обработки.

Низкотемпературная термомеханическая обработка (Н.Т.М.О) основана на ступенчатой закалке, то есть пластическая деформация стали осуществляется при температурах относительной устойчивости аустенита с последующей закалкой и отпуском.

Высокотемпературная термомеханическая обработка (В.Т.М.О) при этом пластическую деформацию проводят при температурах устойчивости аустенита с последующей закалкой и отпуском.

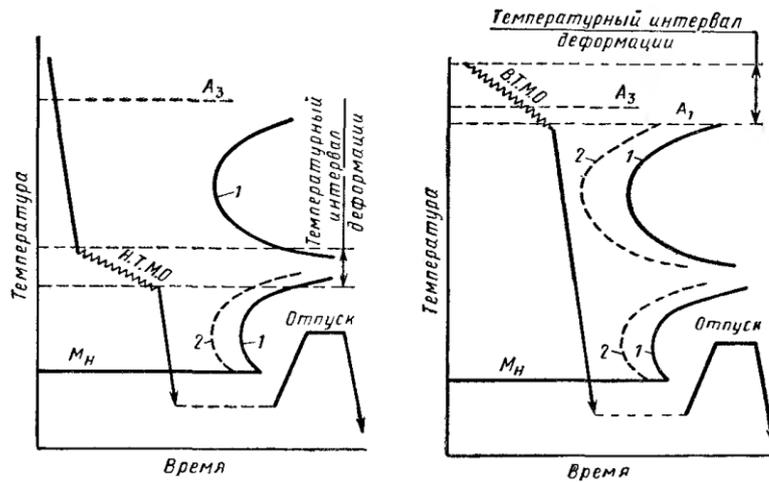


Рис. 36 Технологическая схема: 1 – Н.Т.М.О; 2 – В.Т.М.О; 1 - начало изотермического распада недеформированного аустенита, 2 - начало изотермического распада деформированного аустенита

Предварительная термомеханическая обработка (П.Т.М.О) деформация при этом может осуществляться при температурах Н.Т.М.О и В.Т.М.О или при температуре 20^0 С. Далее осуществляется обычная термическая обработка: закалка и отпуск.

1.6.4 Назначение и виды химико-термической обработки

Химико-термической обработкой называют процесс, представляющий собой сочетание термического и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали.

Цель химико-термической обработки: повышение поверхностной твердости, износостойкости, предела выносливости, коррозионной стойкости, жаростойкости (окалиностойкости), кислотоустойчивости.

Наибольшее применение в промышленности получили следующие виды химико-термической обработки: цементация; нитроцементация; азотирование; цианирование; диффузионная металлизация.

Цементация – это процесс поверхностного насыщения углеродом, произведенный с целью поверхностного упрочнения деталей.

В зависимости от применяемого карбюризатора цементация подразделяется на три вида: цементация твердым карбюризатором; газовая цементация (метан, пропан, природный газ).

Газовая цементация. Детали нагревают до $900-950^0$ С в специальных герметически закрытых печах, в которые непрерывным потоком подают цементующий углеродосодержащий газ [естественный (природный) или искусственный].

Процесс цементации в твердом карбюризаторе заключается в следующем. Детали, упакованные в ящик вместе с карбюризатором (смесь древесного угля с активизатором), нагревают до определенной температуры и в течении длительного времени выдерживают при этой температуре, затем охлаждают и подвергают термической обработке.

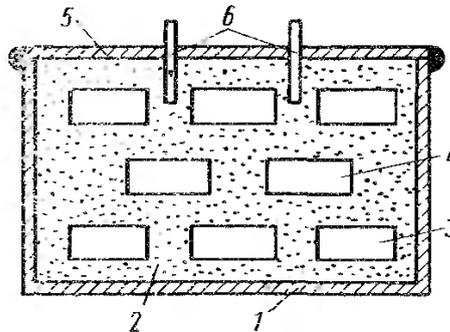


Рис. 37 Ящик для цементации с упакованными деталями.

Цементации любым из рассмотренных выше способов подвергаются детали из углеродистой и легированной стали с содержанием углерода не более 0,2%. Цементация легированных сталей, содержащих карбидообразующие элементы Cr, W, V, дает особо хорошие результаты: у них, кроме повышения поверхностной твердости и износостойкости, увеличивается также предел усталости.

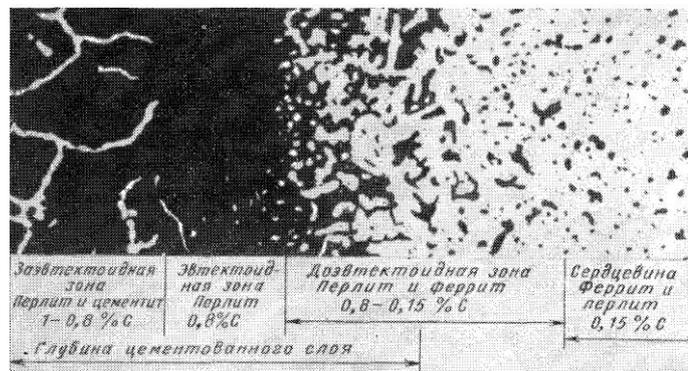


Рис. 38 Схема микроструктуры цементованной стали

Азотирование – это процесс насыщения поверхностного слоя различных металлов и сплавов, стальных изделий или деталей азотом при нагреве в соответствующей среде.

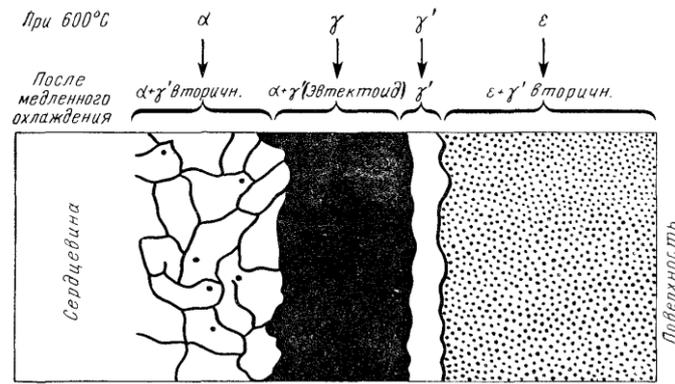


Рис. 39 Азотированный слой стали (схема микроструктуры)

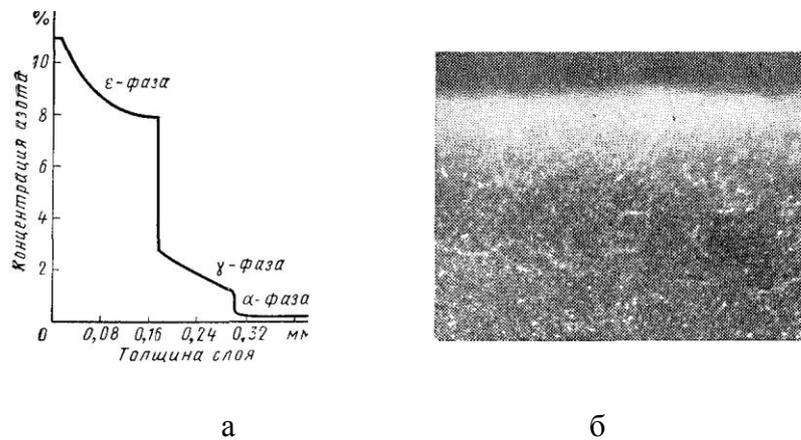


Рис. 40 а- изменение содержания азота по толщине азотированного слоя
б - Микроструктура азотированного слоя легированной стали, X500

Повышается твердость поверхности изделия, выносливость, износостойкость, коррозионная стойкость.

Цианирование – насыщение поверхностного слоя изделий одновременно углеродом и азотом.

В зависимости от используемой среды различают цианирование: в твердых средах; в жидких средах; в газовых средах.

В зависимости от температуры нагрева цианирование подразделяется на низкотемпературное и высокотемпературное.

Цианирование в жидких средах производят в ваннах с расплавленными солями.

Цианирование в газовых средах (нитроцементация).

Процесс одновременного насыщения поверхности детали углеродом и азотом. Для этого детали нагревают в среде, состоящей из цементующего газа и аммиака, то есть нитроцементация совмещает в себе процессы газовой цементации и азотирования.

1.6.5 Диффузионное насыщение металлами и металлоидами

Существуют и применяются в промышленности способы насыщения поверхности деталей различными металлами (алюминием, хромом и др.) и металлоидами (кремнием, бором и др.) Назначение такого насыщения – повышение окалиностойкости, коррозионностойкости, кислотостойкости, твердости и износостойкости деталей. В результате поверхностный слой приобретает особые свойства, что позволяет экономить легирующие элементы.

Алитирование – процесс насыщения поверхностного слоя стали алюминием для повышения жаростойкости (окалиностойкости) и сопротивления атмосферной коррозии. Алитирование проводят в порошкообразных смесях, в ваннах с расплавленным алюминием, в газовой среде и распыливанием жидкого алюминия.

Хромирование – процесс насыщения поверхностного слоя стали хромом для повышения коррозионной стойкости и жаростойкости, а при хромировании высокоуглеродистых сталей – для повышения твердости и износостойкости.

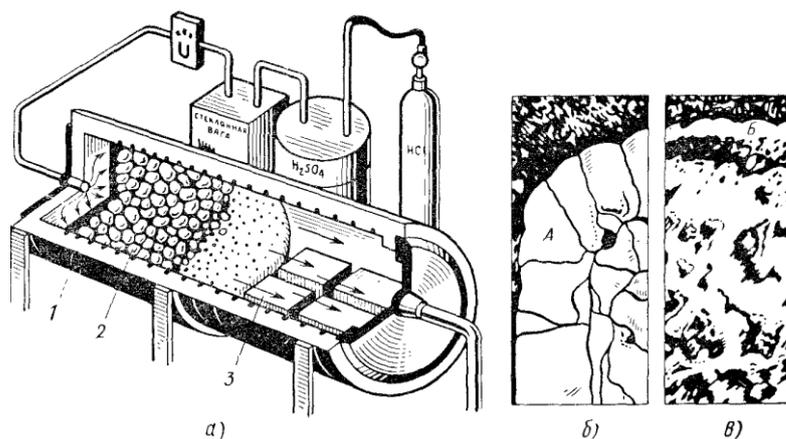


Рис.41 Установка для газового хромирования (а); микроструктуры хромированного слоя низко (б)- и среднеуглеродистой (в) сталей:

1- печь, 2- феррохром, 3- детали,
А- твердый раствор хрома в α - железе, Б- карбид хрома $Cr_{23}C_6$

Силицирование – процесс насыщения поверхностного слоя детали кремнием для повышения коррозионной стойкости и кислотостойкости. Силицированию подвергают детали из низко- и среднеуглеродистых сталей, а также из ковкого и высокопрочного чугунов.

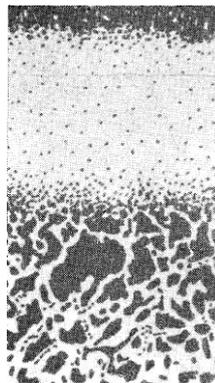


Рис. 42 Микроструктура силицированного слоя детали

Борирование – процесс насыщения поверхностного слоя детали бором. Назначение борирования – повысить твердость, сопротивление абразивному износу и коррозии в агрессивных средах, теплостойкость и жаростойкость стальных деталей. Существует два метода борирования: жидкостное электролизное и газовое борирование.

Сульфидирование – процесс насыщения поверхностного слоя стальных деталей серой для улучшения противозадирных свойств и повышения износостойкости деталей.

Сульфоцианирование – процесс поверхностного насыщения стальных деталей серой, углеродом и азотом. Совместное влияние серы и азота в поверхностном слое металла обеспечивает более высокие противозадирные свойства и износостойкость по сравнению насыщением только серой.

2. Термическая обработка чугуна

Термическую обработку чугунов проводят с целью снятия внутренних напряжений, возникающих при литье и вызывающих с течением времени изменения размеров и формы отливки, снижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием, повышения механических свойств. Чугун подвергают отжигу, нормализации, закалке и отпуску, а также некоторым видам химико-термической обработки (азотированию, алитированию, хромированию).

Отжиг для снятия внутренних напряжений. Этому отжигу подвергают чугуны при следующих температурах: серый чугун с пластинчатым графитом 500 – 570 °С; высокопрочный чугун с шаровидным графитом 550 – 650°С; низколегированный чугун 570 – 600°С; высоколегированный чугун 620 – 650°С. При этом отжиге фазовых превращении не происходит, а снимаются внутренне напряжения, повышается вязкость, исключается коробление и образование трещин в процессе эксплуатации.

Смягчающий отжиг (отжиг графитизирующий низкотемпературный). Проводят для улучшения обрабатываемости резанием и повышения пластичности. Его осуществляют продолжительной выдержкой при $680 - 700^{\circ}\text{C}$ или медленным охлаждением отливок при $760 - 700^{\circ}\text{C}$. Для деталей сложной конфигурации охлаждение медленное, а для деталей простой формы – ускоренное.

Отжиг графитизирующий, в результате которого из белого чугуна получают ковкий чугун.

Нормализацию применяют для увеличения связанного углерода, повышения твердости, прочности и износостойкости серого, ковкого и высокопрочного чугунов. При нормализации чугуна (отливки) нагревают выше температур интервала превращения $850 - 950^{\circ}\text{C}$ и после выдержки, охлаждают на воздухе.

Закалке подвергают серый, ковкий и высокопрочный чугун для повышения твердости, прочности и износостойкости. По способу выполнения закалка чугуна может быть объемной непрерывной, изотермической и поверхностной.

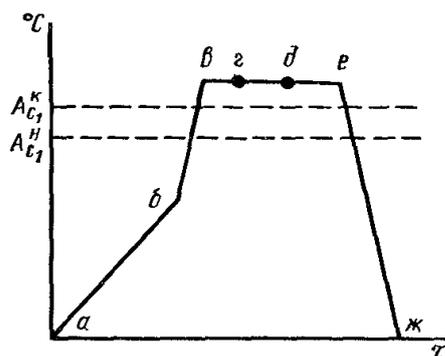


Рис. 43 Схема закалки серого чугуна:

аб- медленный нагрев; бв- ускоренный нагрев для исключения графитизации эвтектоида; вг- выдержка для прогрева сечения; гд- выдержка для насыщения аустенита углеродом в феррито-перлитных чугунах; де- выдержка для насыщения аустенита углеродом в ферритных чугунах; еж – охлаждение

При объемной непрерывной закалке чугун нагревают до температуры $850 - 950^{\circ}\text{C}$. Затем выдерживают для прогрева и полного растворения углерода. Охлаждение осуществляют в воде или масле. После закалки проводят отпуск при температуре $200 - 600^{\circ}\text{C}$. В результате повышается твердость, прочность и износостойкость чугуна.

При изотермической закалке чугуны нагревают так же, как и при объемной непрерывной закалке, выдерживают от 10 до 90 минут и охлаждают в расплавленной соли при $200 - 400^{\circ}\text{C}$, и после выдержки охлаждают на воздухе.

Поверхностная закалка с нагревом поверхностного слоя кислородно – ацетиленовым пламенем, токами высокой частоты или в электролите. Температура нагрева 900 – 1000⁰С. Охлаждение в воде, масле или масляной эмульсии.

Старение применяют для стабилизации размеров литых чугунных деталей, предотвращения коробления и снятия внутренних напряжений. Обычно старение проводят после грубой механической обработки. Различают два вида старения: естественное и искусственное.

Естественное старение осуществляется на открытом воздухе или в помещении. Изделия после литья выдерживаются в течении 6 – 15 месяцев.

Искусственное старение осуществляется при повышенных температурах; длительность – несколько часов. При искусственном старении отливки чугуна загружают в печь, нагретую до 100 – 200⁰С, нагревают до температуры 550 – 570⁰С со скоростью 30 – 60⁰С в час, выдерживают 3 – 5 часов и охлаждают вместе с печью со скоростью 20 – 40⁰С в час до температуры 150 – 200⁰С, а затем охлаждают на воздухе.

2.1 Химико-термическая обработка чугуна

Для повышения поверхностной твердости и износостойкости серые чугуны подвергают азотированию. Чаще азотируют серые перлитные чугуны, легированные хромом, молибденом, алюминием. Температура азотирования 550 – 580⁰С, время выдержки 30 – 70 часов. Кроме азотирования, повышения поверхностной твердости и износостойкости легированного серого перлитного чугуна можно достигнуть газовым и жидкостным цианированием при температуре 570⁰С. Для повышения жаростойкости чугунные отливки можно подвергать алитированию, а для получения высокой коррозионной стойкости в кислотах – силицированию.

3. Термическая обработка сплавов цветных металлов

Алюминиевые сплавы

Алюминиевые сплавы подвергаются трем видам термической обработки: отжигу, закалке и старению.

Основными видами отжига являются: диффузионный, рекристаллизационный и отжиг термически упрочненных сплавов.

Гомогенизацию применяют для выравнивания химической микронеоднородности зерен твердого раствора. Для выполнения гомогенизации алюминиевые сплавы нагревают до 450 – 520⁰С и выдерживают при этих температурах от 4 до 40 часов; после выдержки – охлаждение вместе с печью или на воздухе. В результате этого структура становится более однородной и повышается пластичность.

Рекристаллизационный отжиг для алюминия и сплавов на его основе применяют гораздо шире, чем для стали. Это объясняется тем, что такие металлы, как алюминий и медь, а так же многие сплавы на их основе, не упрочняются закалкой и повышение механических свойств может быть достигнуто только холодной обработкой давлением, а промежуточной операцией при такой обработке является рекристаллизационный отжиг. Температура рекристаллизационного отжига алюминиевых сплавов 300 – 500⁰С выдержка 0,5 – 2 часа.

Отжиг термически упрочненных сплавов применяют для полного снятия упрочнения, он проводится при температурах 350 – 450⁰С с выдержкой 1 – 2 часа и последующим достаточно медленным охлаждением.

После закалки прочность сплава несколько повышается, а пластичность не изменяется. После закалки алюминиевые сплавы подвергают старению, при котором происходит распад пересыщенного твердого раствора.

Деформируемые алюминиевые сплавы

В закаленном состоянии дуралюмины пластичны и легко деформируются. После закалки и естественного или искусственного старения прочность дуралюмина резко повышается.

Литейные алюминиевые сплавы

Для литейных алюминиевых сплавов используют различные виды термической обработки в зависимости от химического состава. Для упрочнения литейные алюминиевые сплавы подвергают закалке с получением пересыщенного твердого раствора и искусственному старению, а также только закалке без старения с получением в закаленном состоянии устойчивого твердого раствора.

Магниевого сплавы

Магниевого сплавы, так же как и алюминиевые, подвергают отжигу, закалке и старению. Для выравнивания химической микронеоднородности зерен твердого раствора путем диффузии слитки магниевых сплавов подвергают гомогенизации при температурах 350 – 400⁰С с выдержкой 18 – 24 часа. Полуфабрикаты деформируемых магниевых сплавов подвергают рекристаллизационному отжигу при температуре \approx 350⁰С, а также при более низких температурах 150 – 250⁰С отжигу для снятия остаточных напряжений.

Магниевого сплавы подвергают закалке, или закалке и искусственному старению. При температуре 20⁰С в закаленных магниевых сплавах никаких изменений не происходит, то есть они не подвержены естественному старению.

Медь и медные сплавы

Термическая обработка меди. Деформирование меди сопровождается повышением ее прочности и понижением пластичности. Для повышения пластичности медь подвергают рекристаллизационному отжигу при $500 - 600^{\circ}\text{C}$, в результате которого пластичность резко повышается, а прочность снижается.

Термическая обработка латуней.

Они подвергаются только рекристаллизационному отжигу при $600 - 700^{\circ}\text{C}$ (для снятия наклепа). Охлаждают латуни при отжиге на воздухе или для ускорения охлаждения и лучшего отделения окалины в воде. Для латунных деталей, имеющих после деформации остаточные напряжения, в условиях влажной атмосферы характерно явление самопроизвольного растрескивания. Чтобы этого избежать латунные детали подвергают низкотемпературному отжигу при $200 - 300^{\circ}\text{C}$, в результате чего остаточные напряжения снимаются, а наклеп остается. Низкотемпературному отжигу особенно необходимо подвергать алюминиевые латуни, которые склонны к самопроизвольному растрескиванию.

Термическая обработка бронз.

Для выравнивания химического состава бронзы подвергают гомогенизации при $700 - 750^{\circ}\text{C}$ с последующим быстрым охлаждением. Для снятия внутренних напряжений отливки отжигают при 550°C . Для восстановления пластичности между операциями холодной обработки давлением подвергают рекристаллизационному отжигу при $600 - 700^{\circ}\text{C}$.

Алюминиевые бронзы с содержанием алюминия от 8 до 11%, испытывающие при нагреве и охлаждении фазовую перекристаллизацию, могут подвергаться закалке. В результате закалки повышается прочность и твердость, но снижается пластичность. После закалки следует отпуск при $400 - 650^{\circ}\text{C}$ в зависимости от требуемых свойств. Также подвергают гомогенизации, а деформируемые полуфабрикаты – рекристаллизационному отжигу при $650 - 800^{\circ}\text{C}$.

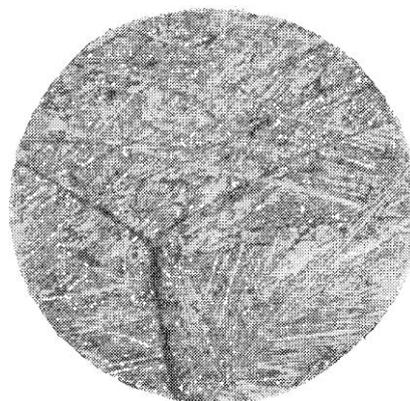


Рис. 44 Микроструктура закаленной алюминиевой бронзы с явно выраженным мартенситным строением, X200

Бериллиевую бронзу закаливают в воде от температуры 760 – 780 °С; при это избыточная фаза выделиться не успеваает, и после закалки сплав состоит из пересыщенного твердого раствора и обладает небольшой твердостью и прочностью и большой пластичностью. После закалки проводится отпуск (старение) при 300 – 350°С выдержкой 2 часа.

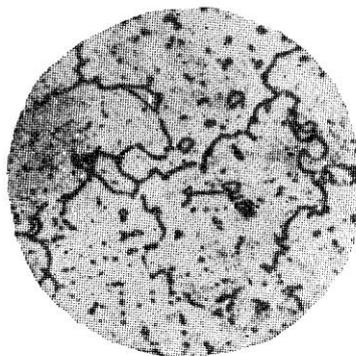


Рис. 44 . Микроструктура бериллиевой бронзы Бр.Б2 после закалки от 800° С и отпуска при 350°С

Для повышения устойчивости пересыщенного твердого раствора и облегчения закалки бериллиевые бронзы дополнительно легируют никелем.

Титановые сплавы

Титановые сплавы подвергают рекристаллизационному отжигу и отжигу с фазовой перекристаллизацией, а также упрочнению термической обработкой – закалкой и старением. Для повышения износостойкости и задиростойкости титановые сплавы подвергают азотированию, цементации или окислению.

Рекристаллизационный отжиг применяют для титана и сплавов для снятия наклепа после холодной обработки давлением. Температура рекристаллизационного отжига 520 – 850°С в зависимости от химического состава сплава и вида полуфабриката.

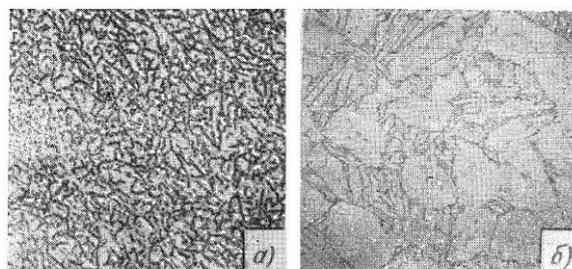


Рис. 45 . Микроструктура сплава VT3-1:
а – после отжига; × 300; б – после двойного отжига; × 2000

Отжиг с фазовой перекристаллизацией применяют с целью снижения твердости, повышения пластичности, измельчения зерна, устранения структурной неоднородности.

Применяют простой, изотермический и двойной отжиг; температура нагрева при отжиге 750 – 950⁰С в зависимости от сплава.

При изотермическом отжиге после выдержки при температуре отжига детали охлаждают до 500 – 650⁰С (в зависимости от сплава) в той же печи или переносят в другую печь и выдерживают определенное время, и охлаждают на воздухе. При изотермическом отжиге сокращается продолжительность отжига, а пластичность получается более высокой.

При двойном отжиге детали нагревают до температуры отжига, выдерживают и охлаждают на воздухе. Затем повторно нагревают до 500 – 650⁰С, выдерживают и охлаждают на воздухе. Двойной отжиг по сравнению с изотермическим повышает предел прочности при незначительном снижении пластичности и сокращает длительность обработки.



Рис. 46 . Микроструктура быстроохлажденного титанового сплава: игольчатая мартенситная фаза α' ; $\times 500$

Из всех видов химико-термической обработки титановых сплавов наибольшее распространение получило азотирование, осуществляемое в среде азота или в смеси азота и аргона при температурах 850 – 950 ⁰С в течении 10 – 50 часов. Детали из титановых сплавов после азотирования обладают хорошими антифрикционными свойствами.

IV. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ [4,5]

1. Оборудование термической обработки

Для нагрева металлических деталей при всех видах термической и химико-термической обработки основным оборудованием являются нагревательные нефтяные, газовые и электрические печи, ванны и агрегаты. Все оборудование термических цехов разделяется на основное, дополнительное и вспомогательное.

К основному относится оборудование, применяемое для непосредственного выполнения технологических процессов термической обработки, которые связаны с нагревом и охлаждением металла: печи, ванны, установки пламенной закалки, установки ТВЧ, закалочные баки и т. д.

Дополнительное оборудование включает оборудование, используемое для операций, которые идут за закалкой и отпуском: моечные машины и промывные баки, правильные установки, дробебетные аппараты и т. д.

Вспомогательное оборудование состоит из установок для приготовления твердого и жидкого карбюризаторов, газовых атмосфер, подъемно-транспортных машин, воздуходувок и т. д.

Наиболее совершенным оборудованием термических цехов являются автоматизированные и механизированные агрегаты, представляющие собой комплекс оборудования, который предназначен для выполнения технологических операций термической и химико-термической обработки, включая контроль и управление этими процессами.

Термические печи, применяемые в настоящее время в машиностроительной промышленности, классифицируются по трем основным признакам: по технологическому, конструктивным особенностям и по источнику нагрева.

По технологическому признаку печи делятся в зависимости от операций, для которых они предназначены в термическом цехе: отжигательные, закалочные, цементационные, для азотирования и отпускные.

В зависимости от конструктивных особенностей печи подразделяются на камерные, периодические и непрерывного действия, а в зависимости от применяемой тепловой энергии— на нефтяные, газовые и электрические.

Газовые нагревательные печи отличаются от нефтяных только способом подачи в печь топлива. В качестве топлива в данном случае применяют газ, подаваемый в печь инжекционными горелками.

К газовым нагревательным печам относятся камерные с неподвижным подом и выдвижным подом, с вращающейся ретортой, муфельные непрерывного действия и т. д.

Общий вид современной универсальной газовой камерной печи с неподвижным подом показан на рис. 47. В такой печи закалывают детали для автомобилей, тракторов и металлорежущих станков, шарикоподшипниковые кольца и т. д. Фронтальный вид газовой камерной печи показан на рис.47 б.

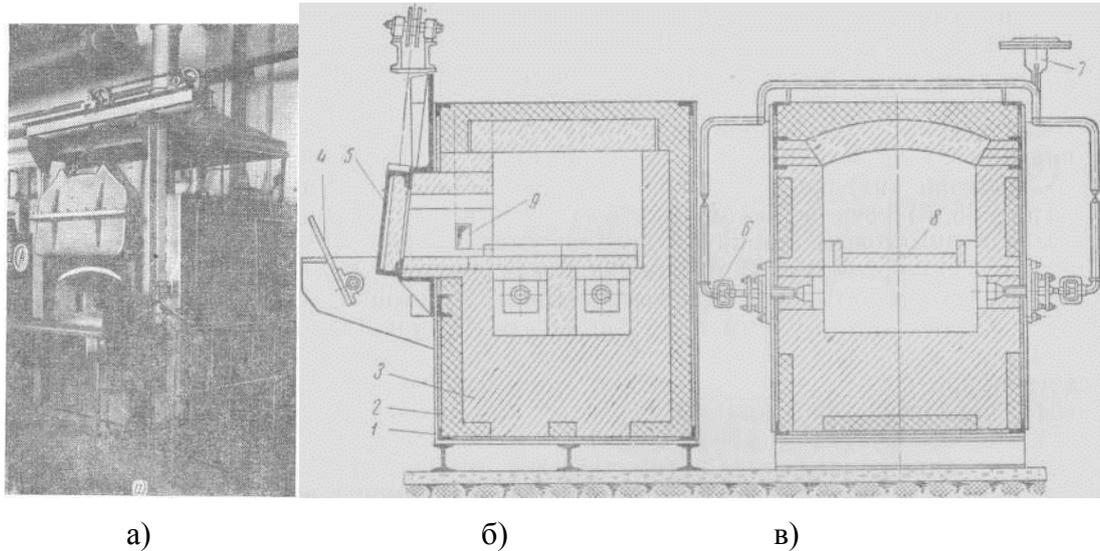


Рис. 47 . Камерная печь

a — общий вид; *б* — схема: 1 — каркас печи, 2 — листовой асбест, 3 — огнеупорные горелки, 7 — мембранный клапан, 8 — под, 9 — дымоход; *в* — вид с торца.

Камерные газовые печи с шаровым подом. В термических отделениях инструментальных и штампово-механических цехов для термической обработки измерительного и режущего инструмента из углеродистых и легированных сталей, а также ковочных и листоштамповочных штампов и приспособлений применяют газовые печи с шаровым подом (рис.48). Печь работает на природном газе, сгорающем в рабочей камере.

На под печи уложены четыре желобковые направляющие 4, в которых находятся шары 5, изготовленные из жароупорной стали. Шары и рельсы в рабочей камере печи значительно облегчают продвижение поддонов с деталями при загрузке и разгрузке печи. На загрузочном столе 2 поддоны устанавливают на шары и вручную при помощи стального крючка направляют в рабочую камеру печи. Печь снабжена инъекционными горелками 7. Детали в печи нагреваются за счет теплового излучения стенок и свода печи.

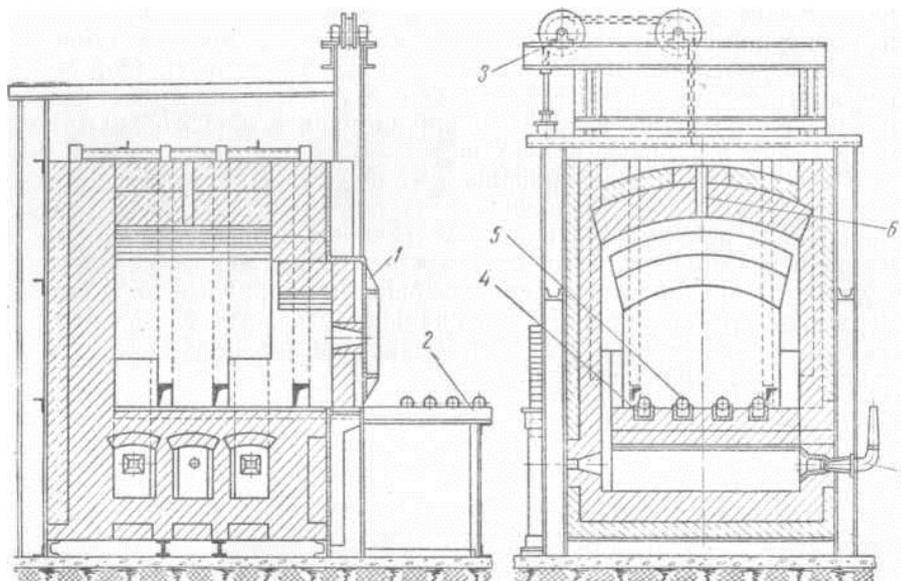
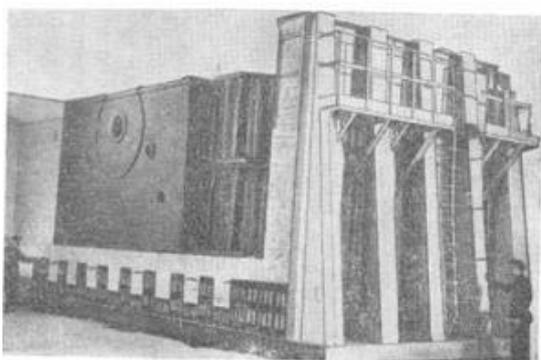


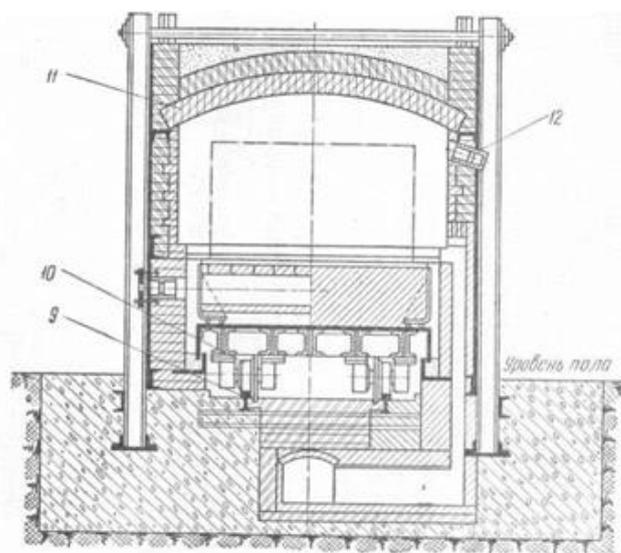
Рис. 48. Камерная газовая печь с шаровым подом

Камерные газовые печи с выдвижным подом. Общий вид отжигательной печи с выдвижным подом показан на рис. 49, а. На поде видна сварная конструкция мощного листоштамповочного пресса после отжига.

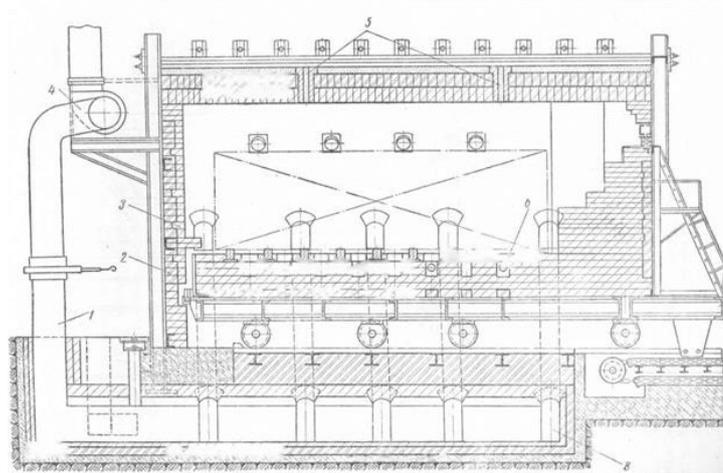
Выдвижной под печи изготовлен в виде тележки на колесах, футерованной изоляционным и огнеупорным шамотным кирпичом. Такое устройство пода позволяет загружать и выгружать детали вне рабочего пространства печи при помощи мостового крана. Отжигательные печи с выдвижным подом применяют для отжига крупногабаритных и тяжелых станин, стального литья, проката, искусственного старения чугунных отливок и высокого отпуска.



а)



б)



в)

Рис.49 Камерная газовая печь с выдвижным подом: а — общий вид, б — продольный разрез, в — вид с торца

Печи с выдвижным подом могут иметь не только мазутное и газовое отопление, но и электрическое.

Техническая характеристика газовой камерной печи с выдвижным подом

Максимальная температура, °С . . . 650—850

Площадь выдвижного пода, м² 27,6

Высота от уровня пода до свода, м 4,5

Вес садки металла, т 30

Механизированные печи с вращающейся ретортой. Такие печи (рис. 50) применяются для газовой цементации и закалки небольших деталей несложной формы и не требующих большой глубины цементованного слоя.

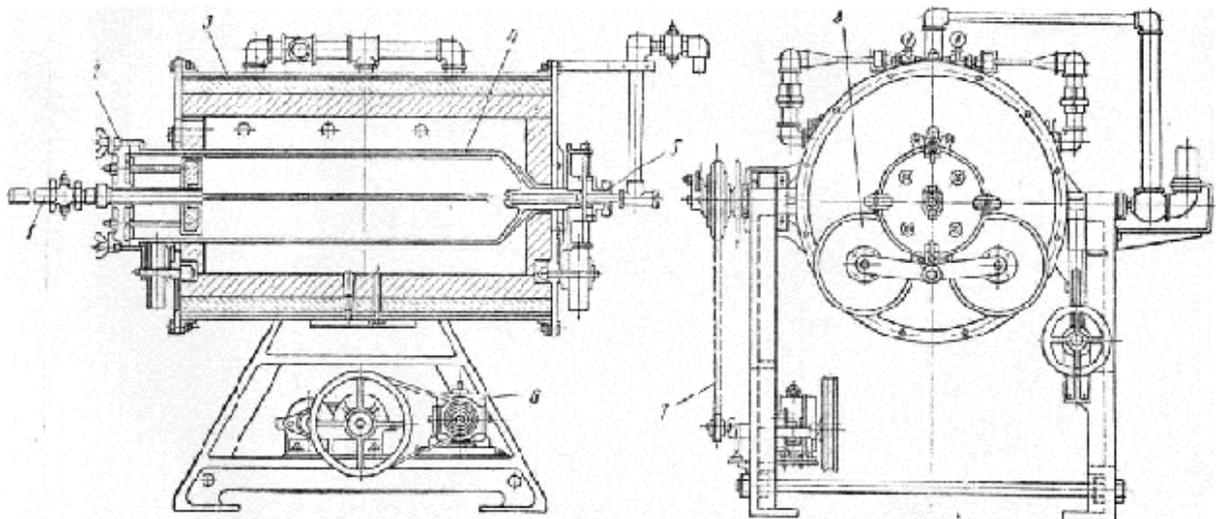


Рис.50 Печь для цементации с вращающейся ретортой

Печь представляет собой футерованный металлический цилиндр 3, установленный на цапфы в горизонтальном положении. Внутри цилиндра находится жароупорная литая реторта 4, являющаяся рабочей камерой печи. Реторта вращается на опорных роликах 8 при помощи червячной и цепной передач 7 от электрического двигателя 6 мощностью 0,85 кет. Опорные ролики укреплены на торцовых плитах печи металлического каркаса.

В процессе цементации реторта, нагруженная деталями, непрерывно вращается, благодаря чему детали обтекаются науглероживающим газом или газовой смесью. Для того чтобы при вращении реторты детали не скапливались в одном месте, внутри реторты имеются небольшие продольные ребра. С загрузочной стороны реторта герметично закрывается крышкой 2 с футерованным экраном. Цементующий газ подается в печь через трубку 5, расположенную в задней стенке реторты. Отработанный газ выводится по трубке 1 через крышку реторты, где поджигается.

Муфельные газовые печи непрерывного действия. В поточно-массовом производстве, когда необходимо получить большое количество деталей с одинаковой глубиной цементованного слоя, применяют муфельные газовые печи непрерывного действия (рис. 51) с периодической загрузкой деталей на поддоны (рис. 52).

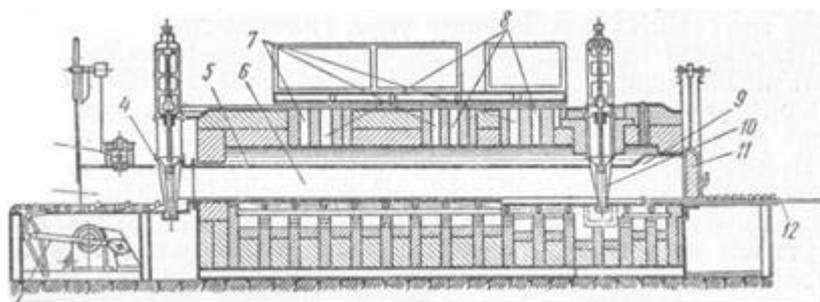


Рис. 51. Муфельная газовая печь непрерывного действия

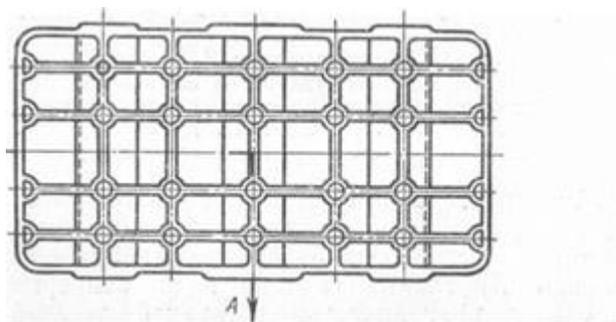


Рис. 52. Жароупорный поддон

Поддоны с деталями передвигаются по рельсам при помощи механического толкателя 1, укрепленного на загрузочном конце печи, который снабжен закалочным баком с механизированным столом для непосредственной закалки с предварительным подстуживанием

деталей после цементации. С входной стороны печи установлена загрузочная камера 2, изготовленная из листовой стали без футеровки. Внутри камеры находятся две газовые горелки 3, при горении которых поглощается кислород воздуха и уменьшается сила вспышки газов, выходящих из цементационной рабочей камеры 6 при открывании заслонки 4 муфеля.

На каждый поддон загружаются детали весом от 100 до 120 кг. Количество загружаемых деталей и порядок их укладки зависят от формы деталей и их веса.

Разгрузочная камера 9 (камера подстуживания) имеет две самостоятельные горелки и заслонку 11. От цементационной камеры она отделяется герметической заслонкой 10 с гидравлическим затвором. Наличие такой камеры позволяет подстуживать 146 детали с температуры цементации (930° С) до температуры закалки (820—840°С).

Как только поддон с деталями достигнет закалочной камеры, его вытаскивают из камеры при помощи железных крючков 12, устанавливают на механизированный стол, после чего вместе со столом погружают в закалочный бак с маслом. Стол с деталями опускают пневматическим подъемником. Муфельная печь обычно отапливается городским природным газом при помощи 28 горелок, расположенных в шахматном порядке в два ряда с обеих сторон муфеля. Печь может работать и на мазуте.

Одним из основных недостатков муфельных печей является наличие в них дорогостоящих жароупорных литых муфелей, эксплуатационная стойкость которых невысока - не более 10—12 месяцев.

Топливо для нагревательных печей состоит из двух частей — горючей (углерод и водород) и негорючей или балласта (азот, зола, сера и влага). Основными показателями топлива являются теплотворная способность и температура воспламенения.

В качестве жидкого топлива для нагрева термических печей используют мазут, состоящий из 86% углерода, 12,8% водорода и 1,2% балласта. Теплотворная способность мазута 9500—10 500 ккал/м³.

Мазут подается в топочное пространство печей при помощи распыливающих форсунок низкого давления. Процесс сжигания мазута включает распыливание, тепловое разложение, смешение полученных продуктов с воздухом, зажигание смеси и ее горение.

В целях пожарной безопасности резервуары с мазутом размещают вне цеха, мазут поступает к термическим печам по трубопроводу. Давление мазута в трубопроводе и форсунках должно быть 1,5—2,5 ат. На трубопроводах, подающих мазут к нескольким печам, устанавливают промежуточные вентили, при помощи которых в случае аварии или пожара можно быстро выключить отдельные участки трубопровода и прекратить подачу мазута в печь.

Мазутопровод окрашивают в коричневый цвет с черными полосками, воздухопровод — в синий и газопровод — в желтый.

Лучшим видом топлива для термических печей является газообразное. Оно удобно в транспортировке, улучшает санитарно-гигиенические условия труда рабочих термических цехов и позволяет создавать надежную автоматику для регулирования температуры в печах.

Газообразное топливо разделяется на естественное и искусственное. К естественному виду топлива относятся природные газы, обычно выделяемые из мест залегания нефти, угля или торфа, а к искусственному виду — коксовый, доменный, светильный и генераторный газы, получаемые при переработке каменных углей или древесины. Характеристика газов приведена в табл. 26. Газы могут гореть только при добавлении к ним определенного количества воздуха. Наименьшее количество воздуха, при котором возможно горение, называют нижним пределом горючести, а наибольшее — высшим пределом горючести. Например, для метана нижним пределом горючести является 5%, а верхним — 15% воздуха.

Для сжигания жидкого и газообразного топлива в термических печах применяются форсунки и горелки. Форсунки представляют собой приборы для распыления жидкого топлива, необходимого для его более полного сгорания.

Природные и искусственные газы бесцветны и не имеют запаха. Чтобы лучше распознавать присутствие газа в помещениях при утечке, газу придают резкий запах искусственным путем (одоризация). Для этого на распределительной станции в поток городского газа впрыскивают сильно пахнущее вещество — этилмеркаптан.

Газ легко воспламеняется даже от искры. Газовое пламя следует гасить немедленным выключением подачи газа к месту горения. Небольшое газовое пламя можно погасить сырой мятой глиной. Тушить пламя водой или песком не следует, так как газ легко проходит через эти материалы и продолжает гореть на их поверхности. В процессе работы на тепловых агрегатах термист должен быть очень внимательным и начинать работу только в исправной одежде, головном уборе, рукавицах и в очках.

Электрические нагревательные печи по конструктивным особенностям и степени механизации подразделяются на камерные, шахтные, барабанные, карусельные, толкательные с пульсирующим подом и конвейерные печи, закалочные и цементационные агрегаты непрерывного действия, а также на установки, используемые при нагреве ТВЧ.

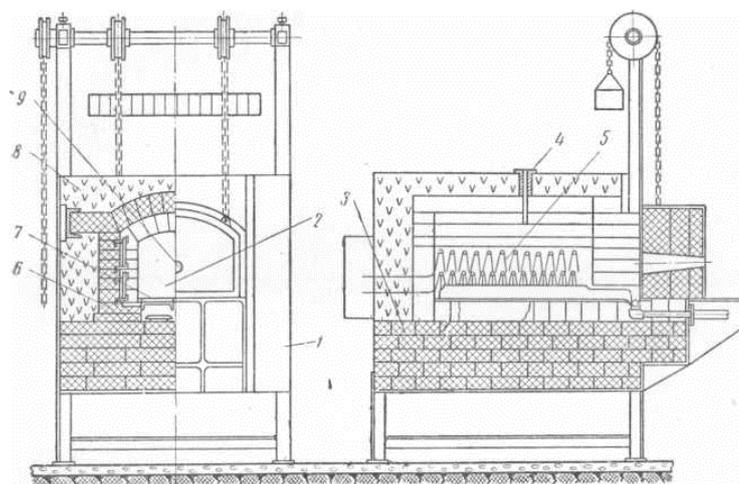


Рис. 53. Камерная электрическая печь Н-15

Камерные электрические печи [6,7]. У таких печей в отличие от пламенных нефтяных и газовых рабочее пространство не имеет дымохода и вентиляции. В качестве источника тепла применяют электрическую энергию. Рабочая камера нагревается при помощи нагревательных элементов, изготовляемых из высокоомных хромоникелевых сплавов или карборунда.

Электрические печи надежно заземляются путем приварки заземляющей пластинки к ножке печи. Для включения, выключения и регулирования температуры печи служит щит управления. Температура печей контролируется автоматическим прибором— электронным потенциометром ЭПД-17. Электрические печи в зависимости от мощности и размеров выпускают пяти типов серии Н.

Камерная электрическая печь Н-15 (рис. 53) предназначена для термической обработки стальных деталей из конструкционных сталей и рассчитана на длительную работу при температуре до 950° С. Печь представляет собой металлический каркас 1 прямоугольной формы. Рабочая камера 2 выложена огнеупорным шамотным кирпичом 3. Для уменьшения тепловых потерь и защиты термиста от теплового излучения у наружных стен и над сводом печи имеются теплоизоляционная засыпка 8 и слой изоляционного кирпича 6. Нагревательные элементы 5 изготовлены в виде проволоки сечением 4,5 мм и расположены в боковых стенках и на поду печи. Для предохранения нагревательных элементов от повреждений и замыканий служит подовая шамотная плита 7. Сверху, в своде печи находится термопара 4. Для наблюдений за нагревом деталей в заслонке имеется смотровое окошко 9. Заслонка поднимается при помощи механизма от педали. Для безопасной работы на электропечах при загрузке и разгрузке заслонка имеет электроблокировку. Если заслонку открыть, то ток автоматически отключается.

Для закалки инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали, применяют электрические печи с двумя вертикально расположенными камерами (рис. 54, а). Печь представляет собой корпус с регулирующим трансформатором, встроенным в огнеупорную стойку, и снабжена контрольным щитком с автоматическим регулятором температуры. Размеры верхней и нижней рабочей камеры одинаковы. Нижняя камера имеет максимальную температуру (950°C) и служит для подогрева инструмента. Верхняя камера предназначена для окончательного нагрева под закалку на температуру 1350°C . Нижняя камера нагревается нагревательными элементами, изготовленными из обычных хромоникелевых сплавов, которые расположены в двух боковых стенках и на поде. На поде нагревательные элементы перекрываются огнеупорными плитами.

Нагревательными элементами в верхней камере служат карборундовые или селитовые стержни, установленные горизонтально на своде печи. Такое расположение стержней обеспечивает свободную радиацию (излучение) тепла в рабочее пространство печи и ускоряет нагрев металла. В процессе работы карборундовые стержни окисляются, в результате чего повышается их удельное электросопротивление. Для сохранения первоначальной мощности стержней печь снабжена ступенчатым трансформатором,

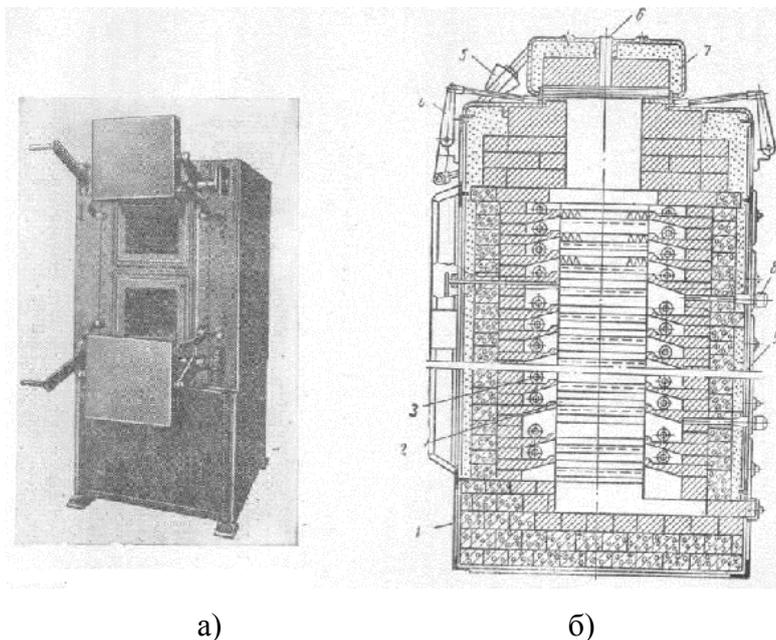


Рис.54 а) общий вид двухкамерной электрической печи; б) шахтная электропечь Ш-35

По мере увеличения сопротивления стержней повышают напряжение на клеммах трансформатора. Температура в камерах регулируется и контролируется автоматическими приборами.

Печь имеет две опрокидывающиеся открывающиеся вручную дверцы, которые противовесно сбалансированы прижимами. Камеры могут работать независимо друг от друга, поэтому печь используют для термической обработки быстрорежущих, конструкционных углеродистых и низколегированных инструментальных сталей, а также для пайки резцов.

Шахтные электрические печи. Нагревательные электрические печи с вертикальным расположением камеры нагрева называют шахтными. По тепловому режиму и методам загрузки они подобны камерным печам. Загрузка и разгрузка таких печей механизирована, что позволяет использовать их при различных видах термической обработки. Шахтные печи обозначают буквой Ш и цифрами, указывающими на мощность печи.

Закалочная шахтная печь Ш-35 (рис. 54,б) предназначена для нормализации и улучшения коленчатых валов, осей, винтов, шпинделей и других деталей, имеющих большую длину. Печь представляет собой каркас 1, изготовленный из листовой стали и огнеупорной кладки, которая выполнена из шамотного кирпича. Рабочая камера 2 имеет прямоугольное сечение. Нагревательные элементы 3 расположены в боковых стенках печи по секциям. Для более удобной и быстрой смены нагревательных элементов при ремонте в печи имеются специальные проемы, которые закрываются кирпичом и крышкой 9. Печь закрывается футерованной крышкой 7 из двух половин, раздвигаемых при помощи рычажного механизма 4. Для обеспечения плотного закрытия крышка снабжена противовесами 5.

Температура в печи должна быть не более 950°C . Она измеряется в двух или трех зонах при помощи термопар 8, расположенных во всех зонах.

Детали в печи нагревают в вертикальном, подвешенном состоянии, что значительно уменьшает их деформацию. Для подвешивания деталей в крышке печи имеется отверстие 6. Печь монтируют в углублении кирпичного или бетонного фундамента с таким расчетом, чтобы выступающая над полом часть не превышала 500—600 мм.

Закалочные баки. Охлаждающие среды, например вода, водяные растворы солей и щелочей, минеральные масла, находятся в резервуарах, называемых закалочными баками.

В термических цехах применяют механизированные и немеханизированные закалочные баки.

Механизированные баки выпускают с индивидуальным охлаждением закалочной жидкости при помощи змеевиков и с централизованной подачей от станции. На рис. 55, а показан общий вид, а на 55, б — схема конвейерного закалочного бака ЗБ-900К. Жидкость в баке охлаждается при помощи трубчатых охладителей 7, а перемешивается в зоне закалки при помощи пропеллера 2, приводимого в движение от электродвигателя 1. Конвейерная лента 3 в зоне закалки сначала движется горизонтально, затем под углом $30\text{—}40^{\circ}$. Лента приводится в

движение от электродвигателя 4, через редуктор 6 и храповой механизм 5. Из закалочной печи нагретые детали поступают на ленту конвейера бака и, медленно поднимаясь по ней, равномерно охлаждаются. Размеры бака с конвейером следующие: ширина 1280 мм, длина 4960 мм, высота 3020 мм. Емкость бака 5 м³.

Механизированные закалочные баки обычно монтируются в линии с конвейерными закалочными печами.

К немеханизированным относятся баки, которые не имеют специальных устройств. Они изготавливаются из листовой стали и могут иметь самые различные размеры и емкости — до нескольких десятков литров кубических метров. Иногда применяют сдвоенные баки — для воды и масла. Баки большой высоты углубляют в землю с таким расчетом, чтобы высота над уровнем пола равнялась 900—1000 мм.

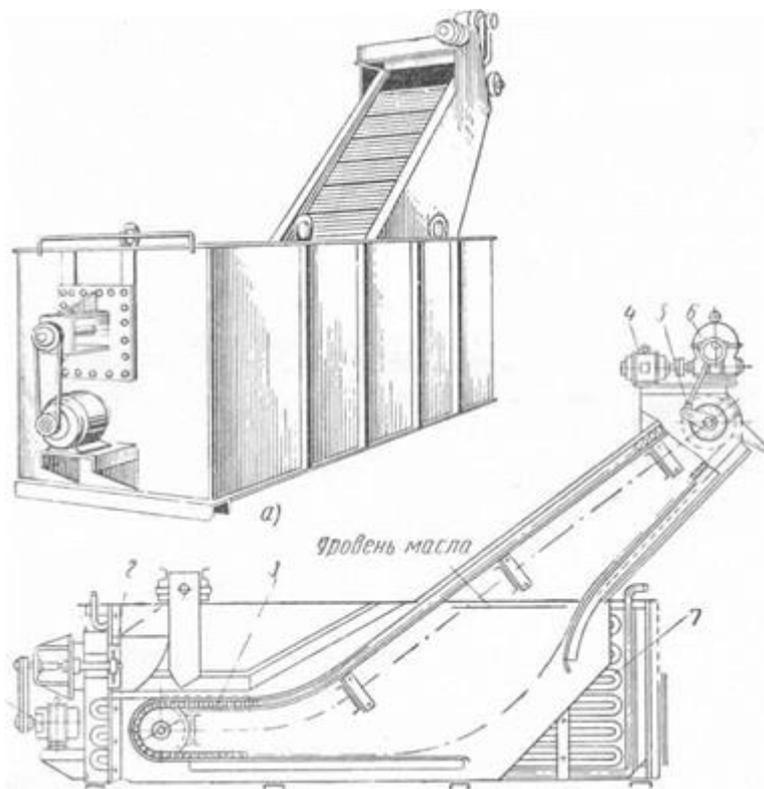


Рис. 55. Конвейерный закалочный бак ЗБ-900К:

а — общий вид, б — схема

Закалочные баки бывают без охлаждения закалочной среды и с охлаждением. Охлаждающие среды охлаждаются тремя способами: при помощи опущенных в бак змеевиков, по которым циркулирует холодная вода, механическим перемещением лопастных винтов и централизованной подачей из охлаждающей установки. Например, закалочное масло поступает к баку по трубопроводу из центральной маслоохладительной станции, а нагретое во время закалки масло через сливное отверстие в верхней части бака отводится на охлаждение.

Моечные машины. Для очистки от солей, закалочного масла, сажи и копоти детали после закалки промывают в горячем водном растворе щелочи, содержащем 3—10% кальцинированной или каустической соды. Температура раствора поддерживается равной 80—90°C.

Детали перед отпуском промывают или в промывочных баках, или в моечных машинах.

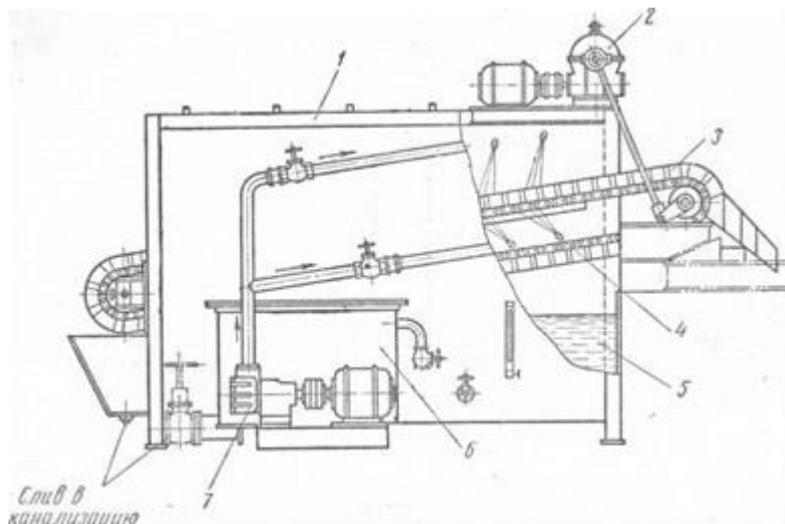


Рис. 56 Конвейерная моечная машина ММ-400К

Промывочные баки без циркуляции раствора по конструкции подобны закалочным немеханизированным бакам. К баку подводятся вода и пар. Детали загружаются в промывочный бак в железных корзинах. Промывка обычно продолжается в течение 5—15 мин., после чего детали просушиваются.

Для промывки деталей в массовом производстве используют конвейерные моечные машины непрерывного действия. Конвейерная моечная машина ММ-400К (рис. 56) представляет собой металлический водонепроницаемый каркас 1, внутри которого непрерывно движется конвейер 3 из штампованных звеньев. Звенья имеют отверстия для стока водного раствора. В нижней части машины помещен сборный железный бак 5 емкостью 1,3 м³. Снаружи машины установлен бачок 6 с фильтром и насос 7, приводимый в движение от электродвигателя.

Детали поступают непосредственно на движущуюся конвейерную ленту, проходя по которой они подвергаются воздействию сильной струи горячего содового раствора, которая подается под давлением от насоса через специальные сопла 4, установленные в шахматном порядке сверху и снизу движущейся конвейерной ленты.

Моечные машины можно применять как самостоятельное оборудование для промывки, но чаще всего их устанавливают в закалочных агрегатах между закалочным баком и отпускной печью.

Конвейерные отпускные электрические печи. Для отпуска закаленных деталей на низкую и высокую температуру применяют конвейерные печи с электрическим обогревом.

Печи для низкого отпуска. Основным видом печей для низкого отпуска являются печи КО-55. Подобно конвейерным закалочным печам, отпускная печь представляет собой, металлический каркас. Рабочее пространство печи выложено шамотным кирпичом. Между каркасом и рабочей камерой проложен термоизоляционный слой — шлаковата. Нагреватели расположены по боковым стенкам и под подом в виде спирали из нихромовой проволоки диаметром 3,5—4,5 мм. Ленты с деталями движутся через ведущий барабан, который, в отличие от закалочных печей, расположен с загрузочной стороны печи.

Для циркуляции горячего воздуха и создания равномерной температуры нагрева в рабочем пространстве печь имеет четыре вентилятора, по одному в каждой зоне.

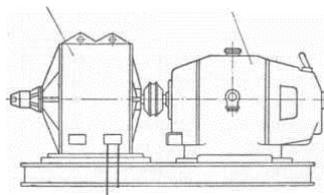
Печи для высокого отпуска. Такие печи отличаются от конвейерных печей для низкого отпуска размерами рабочего пространства, мощностью, температурой нагрева и отсутствием вентиляторов. В термических цехах шарикоподшипниковых заводов применяют конвейерные печи К-45, К-65, К-75 и др.

Закалочные агрегаты непрерывного действия. Такие агрегаты широко применяют на заводах массового и крупносерийного производства. Агрегаты обычно состоят из закалочной печи, закалочного конвейерного бака, моечной машины и отпускной конвейерной печи. При обработке особо точных деталей в агрегат, кроме того, встраивают холодильную камеру с температурой ниже нуля. Агрегаты значительно повышают производительность труда и облегчают условия работы термистов.

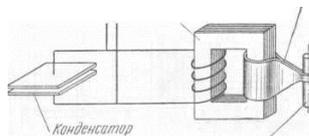
Установки для индукционного нагрева ТВЧ. Такие установки (рис. 57) состоят из генератора высокой частоты, преобразующего промышленный ток частотой 50 гц в ток высокой частоты; асинхронного двигателя, высокочастотного трансформатора, конденсатора, медного индуктора и устройства для автоматического управления циклом обработки. В качестве генераторов высокой частоты при индукционном нагреве применяют машинные и ламповые генераторы. Машинные генераторы дают ток частотой 500—10 000 гц и служат для закалки валов, осей, штоков, шеек коленчатых валов и т. д.

Генератор Высокой частоты

Электродвигатель



Трансформатор индуктор



Закаливаемое изделие

Рис. 57. Установка для высокочастотной закалки

Ламповые генераторы вырабатывают ток частотой 100 000—5 000 000 гц и выше и используются для закалки небольших по размерам деталей и инструмента на глубину 0,8—1,8 мм. Одним из основных элементов установки является индуктор, изготовленный из медных трубок круглого или прямоугольного сечения. Индуктор имеет форму, соответствующую конфигурации нагреваемой детали. Охлаждается индуктор во время работы проточной водой. Некоторые виды индукторов изображены на рис. 58. Для закалки ТВЧ применяют различные приспособления и станки.

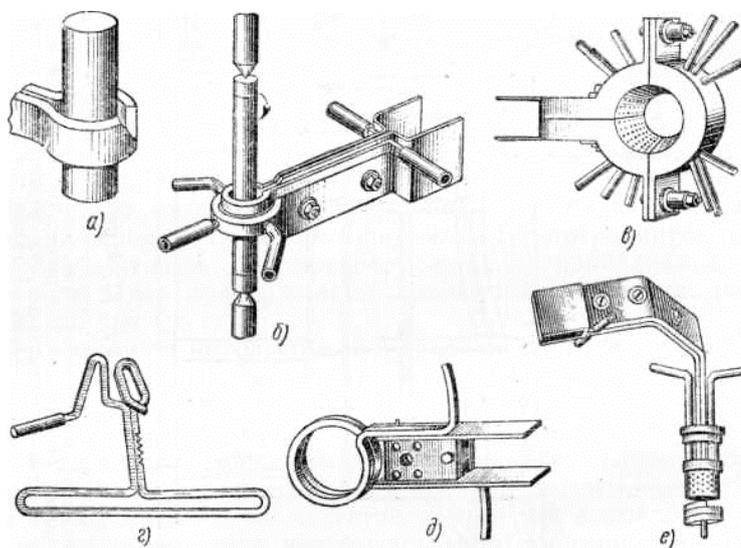


Рис. 58. Индукторы для нагрева ТВЧ:

а — одновитковый, б — цилиндрический, в — разъемный, г — плоский, двухвитковый, е — с душирующим устройством

Соляные ванны. Такие ванны (печи) применяют в термических цехах для нагрева деталей при закалке, отпуске, нормализации, цианировании и жидкостной цементации. В качестве рабочей среды используют расплавленные соли, щелочи и минеральные масла.

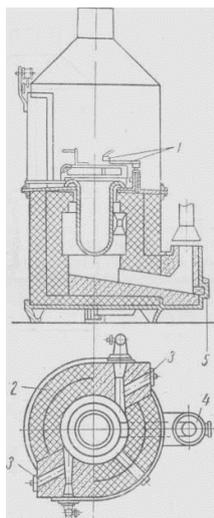


Рис. 59. Ванна с газовым обогревом

Детали в соляных ваннах нагреваются значительно быстрее, чем в электрических или газовых, так как тепло от жидкости к металлу передается интенсивнее, чем от газообразной среды. При нагреве в соляных ваннах детали окисляются слабо, без следов окалины. Соляные ванны изготавливают различных конструкций; с нефтяным, газовым обогревом и электрические.

Ванна с газовым обогревом (рис. 59) представляет собой металлический кожух, внутри которого находится слой изоляционного доломитового кирпича 2.

Камера горения выложена шамотным кирпичом. В кладке имеется жароупорный тигель 1. Форсунки или горелки 3 расположены тангенциально, и продукты горения отсасываются через дымоходный канал 4. Для стока расплавленных солей в случае прогара муфеля в ванне имеется специальное отверстие 5. Над ванной установлен металлический колпак, подключенный к вытяжной вентиляции. Для измерения температуры в тигель с расплавленной солью, отлитый из жароупорного сплава X25H20C2, опускается термомпара. Электрические соляные ванны обычно изготавливают не тигельными с внешним обогревом, а электродными с внутренним нагревом.

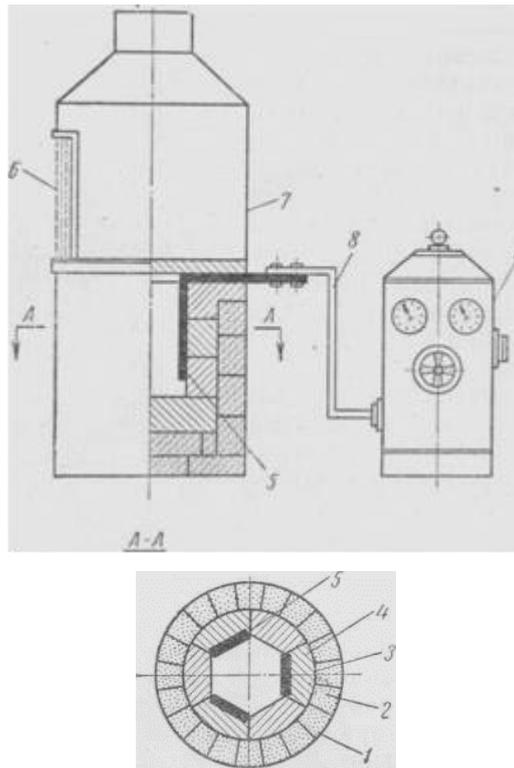


Рис. 60. Трехэлектродная соляная ванна С-35

Электродные ванны выпускают двух типов: трехфазные с тремя электродами и однофазные — с одной или несколькими парами электродов.

Трехэлектродная ванна С-35 (рис. 60) предназначена для закалки инструмента из быстрорежущей стали. Каркас ванны 1 изготовлен из листовой стали с термоизоляционной кирпичной кладкой 2, внутри которой находится стальной цилиндрический предохранительный кожух 3, выложенный шамотным кирпичом 4. Рабочее пространство ванны имеет вид шестигранной призмы, по бокам которой симметрично расположены три железных электрода 5. Длина электродов должна быть на 30—40 мм меньше высоты рабочего пространства ванны с тем, чтобы через окалину, осаждающуюся на дне ванны, не возникало короткого замыкания.

Более совершенным типом электрических ванн являются однофазные с опущенными в соль электродами. Они обладают повышенным к. п. д. Соли в таких ваннах нагреваются при помощи электродов, опущенных в расплавленную соль. Ток большой силы, протекающий по электродам, образует магнитное поле, вызывающее энергичную циркуляцию расплавленной соли.

Масляные отпускные ванны. Масляные ванны, так же как и соляные, используют для низкого отпуска и искусственного старения сталей.

Масляная отпускная ванна с электрическим обогревом (рис. 61) имеет квадратную форму.

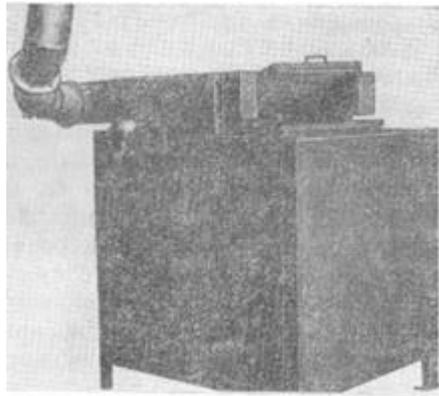


Рис. 61. Общий вид масляной отпускной ванны

В рабочем пространстве ванны установлен металлический тигель. Пространство между каркасом и тиглем обычно заполняют термоизоляционным материалом — стекловатой, а тигель — минеральным маслом марки Вapор. Закрывается ванна крышкой. Масло нагревается при помощи нихромовых нагревателей, а масляные пары удаляют из ванны бортовым отсосом. С течением времени масло стареет и температура вспышки его понижается, поэтому масло необходимо периодически менять.

2. Вспомогательное оборудование

В термических цехах для выполнения различных операций при цементации, закалке, отпуске и т. д. широко применяют подъемно-транспортные приспособления: ручные и электрические тали, монорельсы, кран-балки, рольганги и т. д.

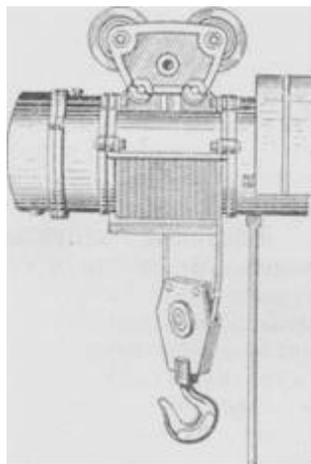


Рис. 61. Электротельфер

Ручные тали являются простейшими механизмами для подъема грузов весом 0,5—3 т на высоту до 10 м. Подъем осуществляется при помощи тяговой цепи, которая огибает звездочку, приводимую во вращение от тягового колеса через червячную передачу. Тали имеют автоматические тормоза, препятствующие опусканию поднятого груза.

Электрические тали — это грузоподъемные приспособления, представляющие собой механическую таль с электрическим приводом. Груз поднимается при помощи стального каната, навитого на барабан. Грузоподъемность электрической тали 0,25—5 т. Электроталь управляется кнопочным контактором.

Электроталь, подвешенную к монорельсовой тележке, которая перемещается вручную или от электродвигателя, называют электротельфером (рис. 61).

Монорельс представляет собой подвесную дорогу с одним рельсом, по которому передвигается самоходная тележка или тележка с ручной тягой.

Кран-балка — это мостовой кран с ручным или электрическим приводом. Грузоподъемность кран-балки до 5 т. Груз поднимается при помощи тельфера, передвигающегося по нижним полкам балки, обычно двутавровой. Управление тельфером и передвижение кран-балки производится подвесным кнопочным механизмом.

Для загрузки и разгрузки шахтных печей и соляных ванн применяют поворотные консольные краны, монорельс с электротельфером и т. д.

Рольгангами (роликовыми конвейерами) называют устройства, по которым перемещаются поддоны у цементационных и закалочных печей непрерывного действия и штучные грузы. Рольганги представляют собой вращающиеся ролики, установленные по пути передвижения грузов. Груз на рольгангах перемещается под действием собственного веса (при наличии уклона) или приложенного к нему небольшого внешнего усилия.

Кроме рольгангов, в термических цехах для непрерывности цикла производства применяют цепные конвейеры, передвигающиеся по замкнутой трассе. Цепь имеет ходовые ролики, перемещающиеся по нижней полке двутавровой балки. К осям роликов прикреплены подвески с крючками, на которые подвешиваются корзины с деталями. Конвейер приводится в движение от электродвигателя и передаточного механизма с вариатором, предназначенным для изменения скорости движения.

Для внутри- и межцехового транспортирования деталей применяют ручные тележки и электрокары грузоподъемностью до 5 т. При использовании электрокар применяют специальную тару — железные ящики на ножках.

3. Приборы для измерения и регистрации температуры

Для измерения и регулирования температуры в нагревательных печах, установках и соляных ваннах применяют следующие контрольно-измерительные приборы: термометры, термопары, милливольтметры, потенциометры, пирометры, миллископы и т. д.

Термометры представляют собой простейшие приборы для измерения температуры в жидких и газовых средах от -50 до $+600^{\circ}\text{C}$. Наиболее распространены жидкостные термометры, основанные на наблюдении видимого изменения высоты столбика ртути или окрашенного спирта, находящихся в стеклянном шарике.

Термопары предназначены для измерения температуры выше 600°C . Термопара (рис. 62) представляет собой прибор, в котором имеется два разнородных проводника, спаянных с одного конца. В цепи из двух разнородных проводников при нагреве возникает термодвижущая сила (термо - э. д. с.), величина которой возрастает с увеличением температуры нагрева в месте спая проводников. Термо-э.д.с. может изменяться и от вида металла.

Свариваемый конец 1 термопары называют горячим спаем (рабочим концом), а несвариваемый конец — холодным спаем 2 (свободным концом). Результирующая термо-э. д. с. равна разности термо-э. д. с., возникающих в горячем и холодном спаях.

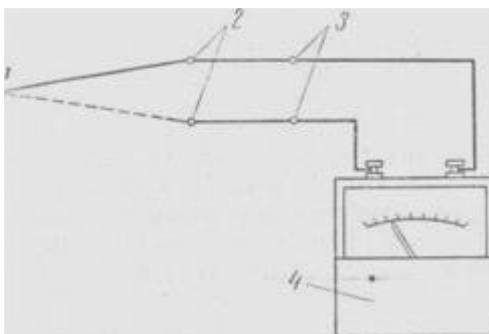


Рис. 62 Схема термопары

1—горячий спай. 2 — холодный спай, 3 — медные провода, 4 — милливольтметр

Поэтому если свободный конец термопары имеет постоянную температуру, например 18°C , то для любого типа термопары термо- э. д. с. будет зависеть от того, до какой температуры нагрет рабочий конец термопары.

Следовательно, о температуре печей, ванн и других устройств, к которым прикреплен рабочий конец термопары, судят по величине термо-э. д. с. Эта термо-э. д. с. определяется милливольтметром 4, присоединенным к свободному концу термопары.

Термопары (ГОСТ 3044—45)

Материалы для изготовления термопар	Обозначения градуировки	Температура, °С	
		предельная	применяемая
Железо —копель	Ж К	800	600
Хромель — копель	хк	800	600
Хромель — алюмель	ХА	1100	1000
Платина —	ПП	1600	1300

В термопарах ПП применяют проволоку диаметром 0,5— 0,6 мм, в остальных — диаметром 2—3 мм.

Проволоки в термопарах имеют длину 500—2000 мм и изолируются друг от друга фарфоровыми трубочками или бусами. Для защиты термопар от наружных механических повреждений их помещают в жароупорные чехлы.

Свободные концы проволок (до места постоянной температуры) удлиняют компенсационными проводами 3, изготавливаемыми из тех же материалов, что и термопары.

Для хромель-алюминиевых термопар применяют медно-константановые компенсационные провода, обладающие небольшим сопротивлением.

Для правильного измерения температуры в нагревательных печах термопару 2 устанавливают сбоку от нагреваемых деталей 1 (рис. 63, а) и сверху (рис. 63, б). Рабочий конец термопары должен отстоять от стенки печи на 250—300 мм и не должен подвергаться прямому воздействию пламени и электронагревателей.

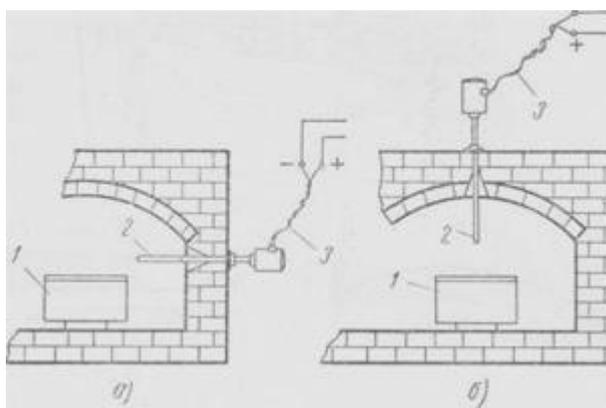


Рис. 63. Установка термопары в печи:

а — сбоку нагреваемых деталей, б — сверху; 1 — детали, 2 — термопара, 3 — провода

Милливольтметры разделяются на показывающие, или гальванометры, и самопишущие.

Показывающие милливольтметры (рис. 64) используют для измерения термо-э.д.с., возникаемой в термопаре. Они могут быть переносными и стационарными.

Показывающий милливольтметр состоит из постоянного магнита 1 с полюсными башмаками 2 из мягкой стали и сердечника 3, на который надета бескаркасная рамка 4, вращающаяся в кольцевом зазоре. Магнитные силовые линии в этом зазоре имеют радиальное направление.

Ток термопары подводится через спиральные пружины 5, которые создают противодействующий момент. Внутренний конец пружин припаян к рамке, а наружный—к коллектору 6, соединенному со стрелкой 7. Проходя через рамку, ток взаимодействует с магнитным потоком постоянного магнита и создает магнитное поле, которое стремится повернуть рамку против действия пружин таким образом, чтобы ее плоскость была перпендикулярна к магнитным линиям постоянного магнита. Чем выше температура рабочего конца термопары, тем больше термо-э.д.с. и тем на больший угол поворачивается рамка и прикрепленная к ней стрелка 7. Следовательно, угол отклонения рамки и стрелки милливольтметра прямо пропорционален термо-э.д.с. и обратно пропорционален сумме сопротивлений в цепи милливольтметра.

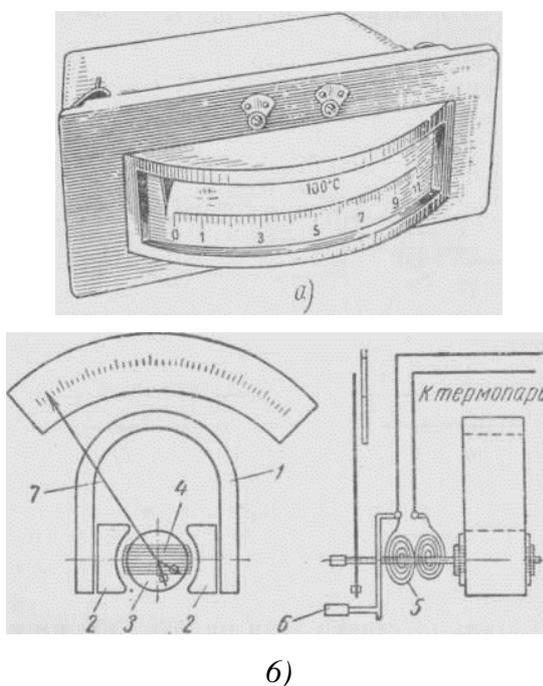


Рис. 64. Показывающий милливольтметр: *а* — общий вид, *б* — схема

Самотишущие милливольтметры применяют в тех случаях, когда нужно знать не только температуру в данный момент, но и весь режим нагрева за длительный период времени.

Самопишущие милливольтметры отличаются от обычных показывающих приборов тем, что их стрелка через определенные промежутки времени касается движущейся с постоянной скоростью рулонной бумаги. Между стрелкой и бумагой находится красящая лента. От периодических ударов дужки прибора по стрелке (через каждые 2 сек.) пишущий ролик оставляет на бумаге след от красящей ленты в виде ряда точек. Эти точки образуют температурную кривую. Температуры, измеряемые разными термопарами, записываются различными цветами. Передвижение бумаги и периодический удар стрелки осуществляются сильным часовым механизмом или моторчиком.

Потенциометры применяют для точных определений температуры (погрешность измерения не превышает $\pm 5^\circ \text{C}$). Сущность измерения температуры потенциометром состоит в том, что электродвижущая сила термопары уравнивается равной ей по величине, но противоположной по знаку электродвижущей силой от постороннего источника тока (сухого элемента).

В современных термических цехах для контроля и автоматического регулирования температуры используют электронные автоматические потенциометры ЭПД (рис. 65).

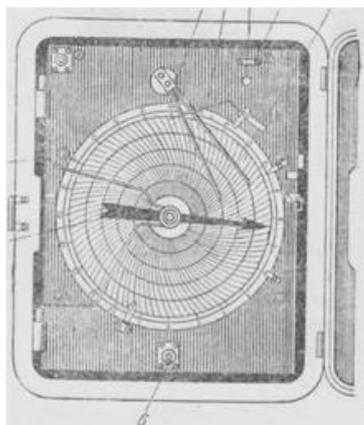


Рис. 65 Электронный автоматический потенциометр ЭПД

Температура в потенциометрах ЭПД записывается на дисковой диаграмме диаметром 300 мм, полный оборот которой происходит через 24 часа. Диаграмма находится на передней части откидного кронштейна. Вдоль диаграммы передвигается записывающая стрелка-перо 5, показывающая на диаграмме кривую хода температуры. Через отверстие в диаграмме проходит ось с показывающей стрелкой 7, закрепленной в стрелкодержателе 8. Для наблюдения за показаниями и записью крышка прибора имеет застекленное окно диаметром 330 мм.

Потенциометры ЭПД могут работать при температуре окружающего воздуха от 0 до $+50^\circ \text{C}$ и относительной влажности от 30 до 80%.

Пирометры предназначены для измерения высоких температур (до 1300°C) на определенном расстоянии от нагреваемого объекта. Они разделяются на оптические, радиационные, с фотоэлементом и т. д.

Оптические пирометры основаны на сравнении яркости нагретого тела с яркостью эталонного тела. Например, у пирометров с исчезающей нитью сравнивается интенсивность излучения нагретого тела с яркостью нити накаливания лампочки прибора.

Оптический пирометр с «исчезающей нитью» (рис. 66) представляет собой зрительную трубу 3, внутри которой имеется электрическая лампочка 2, питаемая от батареи 1. Ток, изменяемый реостатом 4, измеряется прибором, шкала которого разделена на градусы. Для измерения температуры трубу наводят на испытуемый объект, например на нагреваемую деталь в печи, таким образом, чтобы в окуляре было видно светлое пятно.

С увеличением силы тока светящаяся нить лампочки становится ярче, чем фон, полученный от нагретой детали (рис. 66, а), а с уменьшением тока — темнее, чем фон детали (рис. 66, в).

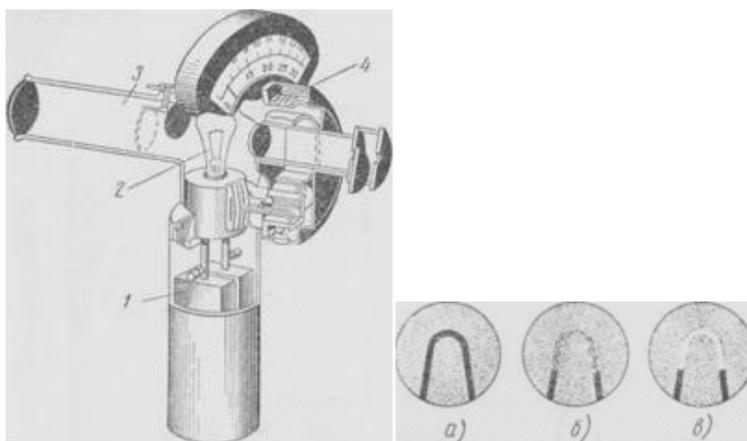


Рис. 66 Оптический пирометр

1 — батареи питания, 2 — электрическая лампочка, 3 — труба, 4 — реостат; а — нить накалена слабо, б — нить накалена соответственно температуре нагретого тела, в — нить накалена слишком сильно.

Регулируя реостатом ток в лампочке, можно сделать так, что изображение нити на фоне (рис. 66, б) станет незаметным. По отклонению стрелки оптического пирометра определяют температуру нагрева металла в печах.

Радиационные пирометры, или ардометры, концентрируют тепловое излучение наблюдаемого тела на термопаре, находящейся внутри пирометра.

Прибор (рис. 67) представляет собой трубу, в которой находятся объектив (линза) 1, диафрагма, термоэлемент 2, соединенный с гальванометром 3 и помещенный в стеклянный баллон в виде лампы, дымчатый фильтр и окуляр.

Радиационный пирометр наводится на раскаленное тело, лучистая энергия которого собирается линзой, сосредоточиваясь на горячем спае термопары термоэлемента. Возникающая при этом термо- э. д. с. измеряется гальванометром. Пирометр обладает небольшой инерцией и на изменение температуры в измеряемом пространстве печи или ванны реагирует быстро, т. е. практически не отстает от нее. Изменение температуры записывается автоматически.

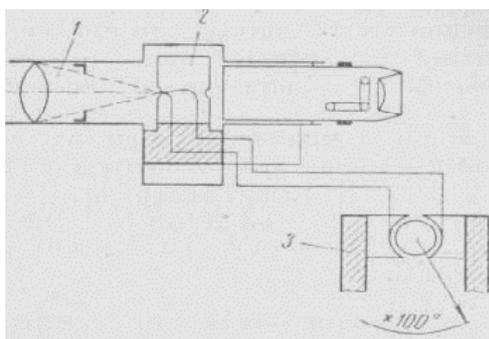


Рис. 67 Радиационный пирометр

Миллископы применяют для быстрого и точного измерения температуры нагрева движущегося тела. Наиболее широко они используются для контроля и автоматического регулирования температуры при пламенной поверхностной закалке и при нагреве т.в.ч.

Миллископ (рис. 68) — безинерционный прибор. Его можно сравнить с пирометром, имеющим нить накаливания. В пирометре излучение нагреваемого тела и нити накаливания лампочки сравниваются на глаз, а в миллископе — при помощи фотоэлемента, преобразующего световую энергию в электрическую.

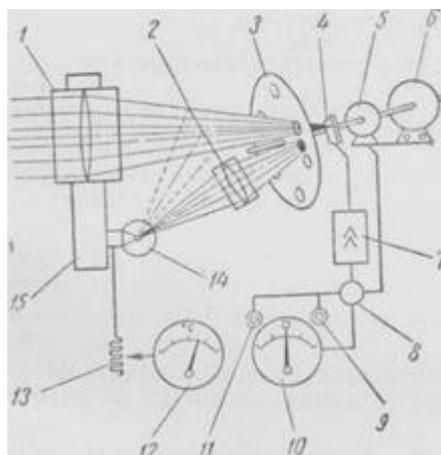


Рис. 68 Схема миллископа

1 — деталь для обработки, 2 — зеркало, диск, 4 — фотоэлемент, 5 — генератор, двигатель, 7 — усилитель, 8 — реле, 9 — красная лампа, 10 — нулевой циферблат, 11 —

зеленая лампа, 12 — температурный циферблат, 13—реостат, 14 — нить накаливания, 15 — водяной жакет

Сравнение в миллископе производится следующим образом. Перед фотоэлементом 4 помещают диск 3 с отверстиями, приводимый в движение электродвигателем 5. Положение диска и величина отверстий должны быть такими, чтобы на фотоэлементе (сернистый свинец) попеременно возникали изображения нагреваемого тела 1 и нити накаливания тарированной лампы 14.

При равенстве обоих излучений фотоэлемент освещается одинаково, следовательно, напряжения равны. Если излучения энергии тела и тарированной лампы не равны, фотоэлемент освещается то сильнее, то слабее и в приборе возникает переменный ток, который будет отклонять стрелку температурного циферблата 12 или вправо или влево, в зависимости от нагрева тела.

Головка миллископа при работе наводится на излучаемое тело и температура отсчитывается на шкале температурного циферблата. Нулевой циферблат 10 предназначен для настройки прибора. Расположенные в схеме лампы — зеленая 11 и красная 9 — загораются при отклонении от заданной температуры на $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термическая обработка является одной из основных, наиболее важных операций общего технологического цикла обработки, от правильного выполнения которой зависит качество (механические и физико-химические свойства) изготавливаемых деталей машин и механизмов, инструмента и другой продукции. Разработаны и рационализированы технологические процессы термической обработки серых и белых чугунов, сплавов цветных металлов.

Перспективным направлением совершенствования технологии термической обработки является установка агрегатов для термической обработки в механических цехах, создание автоматических линий с включением в них процессов термической обработки, а также и разработка методов, обеспечивающих повышение прочностных свойств деталей, их надежности и долговечности.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Перебоева. Технология термической обработки металлов. Курс лекций. Изд-во «Сибирский федеральный университет», Красноярск, 2007,-143с.
2. Термическая обработка в машиностроении. Справочник. Под ред. Лахтина Ю.М., Рахштадта А.Г. М.: - Металлургия, 1980 – 784 с.
3. А.И. Самохоцкий, Н.Г. Парфеновская «Технология термической обработки металлов» М. Машиностроение 1976 г.
4. Б.В. Захаров. В.Н. Берсенева «Прогрессивные технологические процессы и оборудование при термической обработке металлов» М. «Высшая школа» 1988 г.
5. Я. Йех Термическая обработка стали. Справочник. Металлургия, 1989. – 264 с.
6. В.М. Зуев «Термическая обработка металлов» М. Высшая школа 1986 г.
7. В.Б. Райцес Термическая обработка на металлургических заводах. М.: Металлургия, 1971. – 248 с