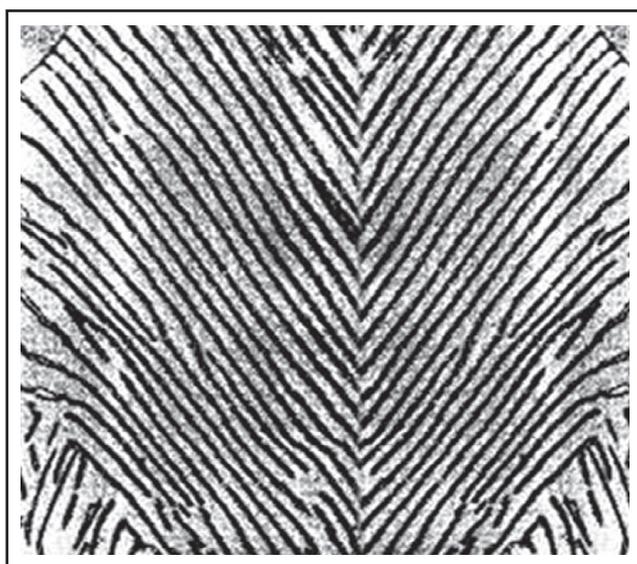


МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ЛЕКЦИИ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ



ОРЕНБУРГ - 2009

Оренбургский государственный аграрный университет

Кафедра ремонта машин

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лекции для самоподготовки

Оренбург – 2009

СОСТАВИТЕЛИ:

Н. А. Жариков

Н. А. Маловский

Р. Р. Хайбуллин

Редакция и оформление:

Н. А. Жариков

Компьютерная верстка:

Р. Р. Хайбуллин

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ: Лекции для самоподготовки

Издание 2-е исправленное и дополненное

Лекции предназначены студентам инженерных специальностей.

© Н. А. Жариков, Н. А. Маловский, Р. Р. Хайбуллин, 2006-2008

© Кафедра ремонта машин, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1	Введение. Атомно-кристаллическое строение вещества. Кристаллизация	3
Лекция 2	Пластическая деформация и рекристаллизация металлов. Основы теории сплавов.	9
Лекция 3	Железо и его сплавы	19
Лекция 4	Производство чугуна и стали. Производство цветных металлов.	24
Лекция 5	Углеродистые стали и чугуны.	30
Лекция 6	Теория термической обработки стали.	35
Лекция 7	Технология термической обработки стали. Термомеханическая и химико-термическая обработка	39
Лекция 8	Легированные стали. Порошковые твердые сплавы.	47
Лекция 9	Цветные металлы и сплавы. Электротехнические материалы	52
Лекция 10	Порошковые, композиционные и неметаллические материалы	60
Литература	69

Лекция 1. Введение. Атомно-кристаллическое строение вещества. Кристаллизация

1. Краткая историческая справка.
2. Аморфные и кристаллические тела. Структурный анализ.
3. Металлы: общая характеристика, классификация и свойства.
4. Атомно-кристаллическое строение металлов.
5. Кристаллизация.

Литература

1. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986.
2. Материаловедение и технология металлов. / под ред. Г.П. Фетисова. - М.: Высшая школа, 2001.
3. Материаловедение. / под ред. Ю.М. Соломенцева. - М.: Высшая школа, 2005.

1.1. Краткая историческая справка

Материаловедение – наука, изучающая строение и свойства конструкционных материалов, а также влияние на них химического состава, температуры и других факторов.

Материаловедение и технология конструкционных материалов относятся к числу важнейших учебных дисциплин для инженерных специальностей. Это связано прежде всего с тем, что проектирование и эксплуатация рациональных, конкурентоспособных изделий, организация их производства, обслуживания и ремонта невозможны без должного технологического обеспечения и достаточного уровня знаний в области материаловедения. Наконец, материаловедение и технология конструкционных материалов служат базой для изучения многих специальных дисциплин, например, сопротивление материалов, детали машин, тракторы и автомобили, сельскохозяйственные машины и др.

Несмотря на то, что материаловедение сравнительно молодая наука (ее основы заложены только во второй половине XIX в.), она уже достигла высокого уровня развития. Большой вклад в нее внесли как отечественные, так и зарубежные ученые. Великий русский ученый М.В. Ломоносов развил атомно-молекулярное представление о строении вещества, опубликовал руководство по металлургии, впервые описал отличительные свойства металлов (металлический блеск и пластичность) и указал пути получения сплавов с требуемыми свойствами.

Открытая Д.И. Менделеевым периодическая система элементов, позволила объяснить закономерности изменения свойств металлов в зависимости от их атомно-кристаллического строения.

П.П. Аносов (1799-1851), считая структуру одним из важнейших факторов, определяющих качество стали, первым применил микроскоп для изучения её структуры, раскрыл секрет изготовления булатной стали. П.П. Аносов впервые также разработал и описал процесс газовой цементации стали.

Основоположником металловедения как науки является Д.К. Чернов (1839-1921). Он указал, что свойства стали определяются не только ее химическим составом, но и строением. Он установил, что при определенных темпера-

турах нагрева в стали протекают превращения, изменяющие ее строение, а значит, и свойства. Им разработаны основы термообработки.

1.2. Аморфные и кристаллические тела. Структурный анализ

Все существующие в природе твердые неорганические тела по своим свойствам делятся на два класса: кристаллические и аморфные.

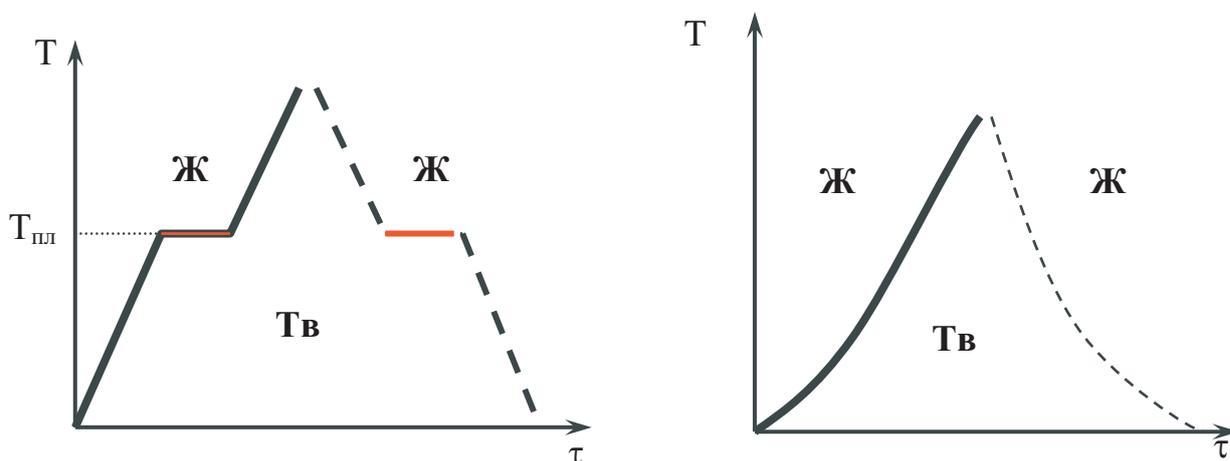


Рис. 1. Температурные кривые кристаллического и аморфного вещества

Кристаллические тела остаются твердыми, т.е. сохраняют свою форму, до вполне определенной температуры, при которой они переходят в жидкое состояние. При охлаждении процесс идет в обратном направлении. При этом температура плавления остается постоянной, а процесс плавления или кристаллизации происходит в течение некоторого времени при постоянном значении температуры, о чем свидетельствует горизонтальный участок представленных графиков (рис.1).

Аморфные тела («бесформенные») при нагреве размягчаются в большом температурном интервале. Они постепенно становятся вязкими, а затем переходят в жидкое состояние. Критические точки на графиках отсутствуют.

Кристаллическое состояние твердого тела более стабильно, чем аморфное. Кристаллические тела характеризуются упорядоченным расположением элементарных частиц в пространстве, т.е. вблизи атома A (рис.2) и вдали от него. Поэтому говорят о наличии в кристалле дальнего порядка упаковки. Для аморфных тел вблизи атома A также наблюдается порядок. С удалением от атома A порядок все больше нарушается. Поэтому можно говорить о наличии лишь ближнего порядка. В аморфных телах существует неупорядоченное расположение элементарных частиц.

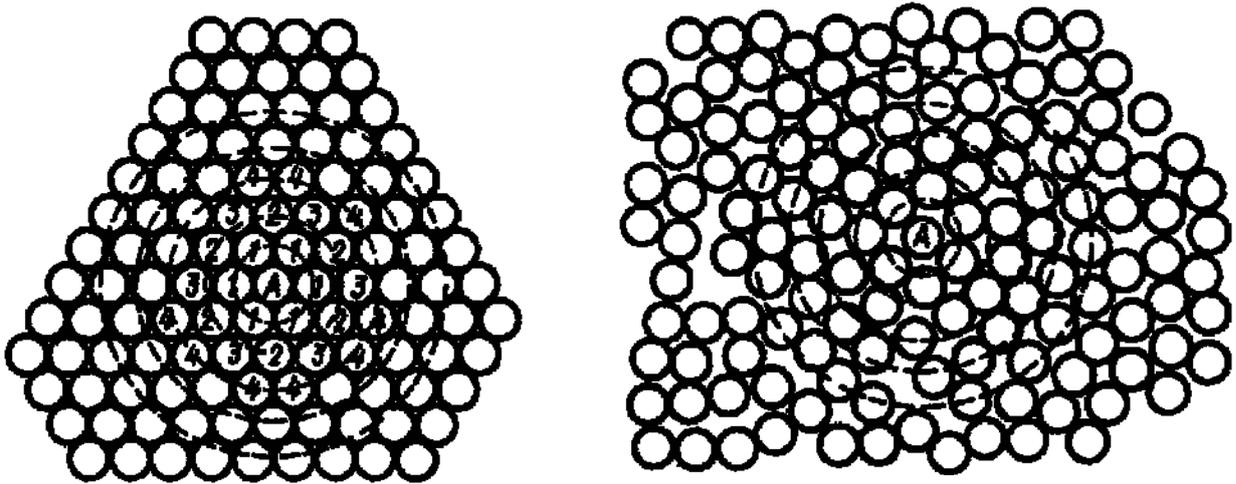


Рис.2. Дальний и ближний порядок расположения атомов

Свойства кристалла зависят от электронного строения атомов и характера их взаимодействия, от пространственного расположения элементарных частиц, химического состава, размера и формы кристаллов. Все эти детали строения кристаллов описывает понятие – структура.

Структура (в пер. с лат. *structura* – строение, расположение, порядок) – совокупность устойчивых связей, обеспечивающих целостность материала и тождественность самому себе. Другими словами структура – это внутреннее строение материала. В зависимости от размеров структурных составляющих и применяемых методов их выявления используют такие понятия как тонкая структура (субструктура), микро- и макроструктура.

Макроструктура – строение, выявляемое невооруженным глазом или при небольших увеличениях с помощью лупы (X до 30). Исследование макроструктуры, несмотря на простоту, является очень ценным методом изучения материалов.

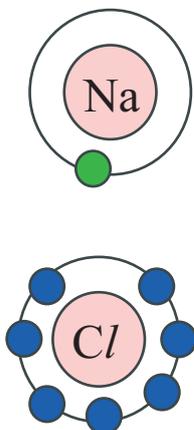
Микроструктура – характеризует мелкие структурные составляющие, наблюдение которых возможно с помощью оптических микроскопов с увеличением от 60 до 1500-2000 раз.

Микроанализ позволяет установить размеры и форму кристаллов, их распределение, форму инородных включений и микропустот, ориентацию кристаллов и т.п.

Тонкая структура – позволяет определить расположение элементарных частиц в материале и электронов в атоме.

Строение и свойства вещества на этом уровне определяются типом связей между элементарными частицами. Различают три основных типа связи: ионный, ковалентный и металлический.

Образование *ионной* связи происходит путем передачи атомом одного элемента валентного электрона атому другого элемента. Это приводит к образованию положительного и отрицательного ионов, которые притягиваются друг к другу электростатически.



Образование ионной связи удобно рассмотреть на примере соединения NaCl. Атом Na имеет один «лишний» валентный электрон. В то же время, атому Cl, имеющему семь валентных электронов, для образования устойчивой оболочки, «не хватает» одного электрона. Атом Na передает свой валентный электрон атому Cl, в результате образуется положительный ион Na^+ и отрицательный ион Cl^- , которые притягиваясь, создают ионную связь.

Рис.3. Ионная связь атомов

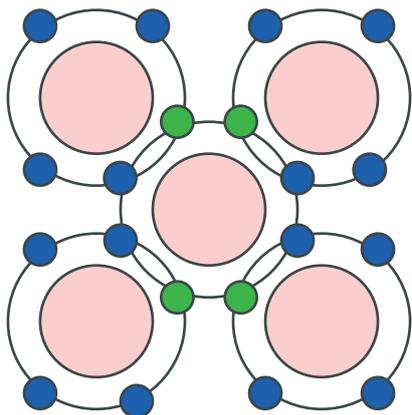


Рис.4. Ковалентная связь

Ионные кристаллы обычно хрупкие, довольно тугоплавкие, у них низкая тепло- и электропроводность.

Ковалентный тип связи осуществляется обобществлением (объединением) валентных электронов соседних атомов. Типичным телом с такой связью является алмаз, состоящий из атомов углерода с четырьмя валентными электронами. При сильном сближении атомов степень перекрытия электронных оболочек и частота обмена электронов местами увеличиваются настолько, что перестает существовать система из самостоятельных атомов. Причем электронное

облако как бы стягивает ядра, стремясь максимально приблизить их друг к другу.

При довольно высокой механической прочности связи все ковалентные кристаллы хрупкие, температура плавления, тепловые и электрические свойства колеблются у них в широком диапазоне.

Металлическая связь образуется следующим образом. На внешних оболочках

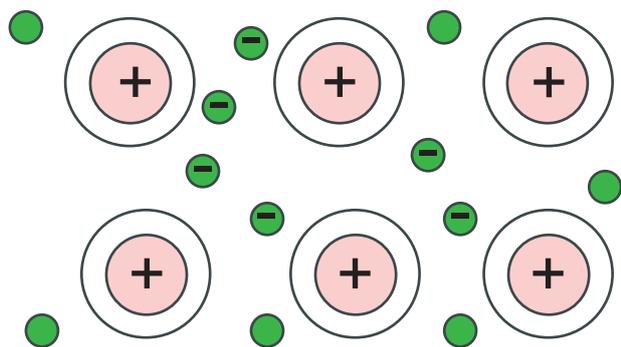


Рис. 5. Металлическая связь

атомов металлов находится меньше четырех валентных электронов, слабо связанных с атомным ядром. Поэтому при близком расположении атомов валентные электроны легко теряют связь с отдельными атомами и становятся общими, т.е. коллективизируются. При этом атомы превращаются в положительно заряженные ионы, а освобожденные электроны свободно перемещаются

между периодически расположенными ионами, не принадлежа (в отличие от ковалентной связи) ни отдельному атому, ни какой-либо их малой группе.

Металлическая связь является ненаправленной, благодаря чему при пластической деформации, связь между ионами не нарушается и разрушение не происходит. Ионы как бы плавают в облаке электронного газа, образованного

свободно перемещающимися электронами, что обуславливает высокую пластичность металлов. Наличие электронного газа объясняет также высокую электро- и теплопроводность элементов с металлической связью.

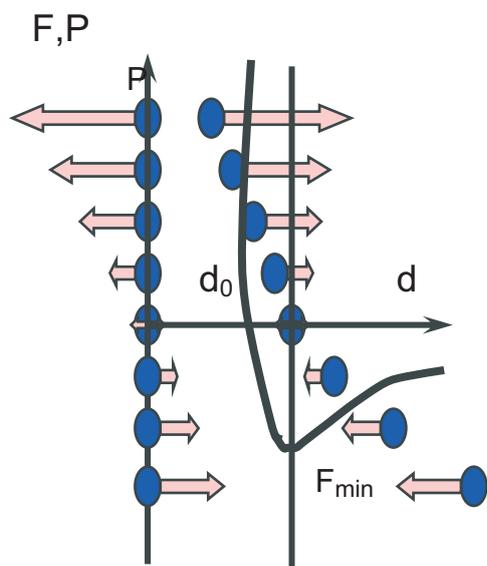


Рис.6. Взаимодействие межатомных сил

Возможность существования кристаллического состояния вещества (независимо от типа связи) обусловлена возникновением сил взаимодействия между частицами (атомами, ионами, молекулами). Когда расстояние между частицами уменьшается (рис.6), то интенсивно растут силы отталкивания, при сближении частиц на расстояние равное d_0 , силы отталкивания и притяжения уравниваются, их результирующая равна нулю; при увеличении расстояния между частицами начинают возрастать силы притяжения. Расстояние между частицами, равное d_0 , - положение устойчивого равновесия, которому соответствует минимум свободной энергии F ,

что делает кристалл термодинамически стабильным, а сближение или удаление частиц будет сопровождаться повышением энергии. Атомы в положении равновесия совершают колебательные движения с частотой порядка 10^{14} с^{-1} . Амплитуда колебаний обычно не превышает 5...7% равновесного расстояния.

1.3. Металлы

В технике под металлом понимают вещества, обладающие «металлическим блеском» и пластичностью. Еще М.В. Ломоносов определял металлы, как «светлые тела, которые ковать можно».

Современное определение: «Металлы – вещества, обладающие высокой тепло- и электропроводностью, ковкостью (пластичностью), блеском и другими свойствами, обусловленными наличием в них большого числа свободно перемещающихся электронов».

Каждый металл отличается строением и свойствами, тем не менее, по некоторым признакам их можно объединять в группы. Прежде всего, металлы по цвету можно разделить на — черные и цветные.

Черные металлы имеют темно-серый цвет, большую плотность (кроме щелочноземельных), высокую температуру плавления, относительно высокую твердость и во многих случаях обладают полиморфизмом (способностью менять кристаллическое строение).

Цветные металлы чаще всего имеют характерную окраску: красную, желтую, белую. Обладают большой пластичностью, малой твердостью, относительно низкой температурой плавления, для них характерно отсутствие полиморфизма.

Основные свойства материалов подразделяют на физические, химические, механические, технологические и специальные.

К *специальным* свойствам относятся жаропрочность, жаростойкость, сопротивление коррозии, износостойкость и др.

Инженера-механика в первую очередь интересуют механические свойства материала, которые должны соответствовать нагрузкам, действующим на элементы конструкций и машин.

Технологические свойства характеризуют способность материала подвергаться обработке.

Показатели механических свойств определяют испытаниями.

Наибольшее распространение получили статические испытания на растяжение, когда испытуемый образец определенной формы подвергается нагружению на разрывной машине. Такое испытание дает информацию о прочности, упругости и пластичности материалов.

По оси ординат на диаграмме откладывают нагрузку P , а по оси абсцисс – абсолютные удлинения Δl . Чтобы исключить влияние размеров образца, диаграмму строят в координатах напряжение – относительное удлинение. Напряжение это нагрузка, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения рабочей части образца, Н/мм^2 (МПа) $\sigma = \frac{P}{F}$, относительное удлинение – отношение абсолютного удлинения к начальной длине расчетной части образца

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100, \%$$

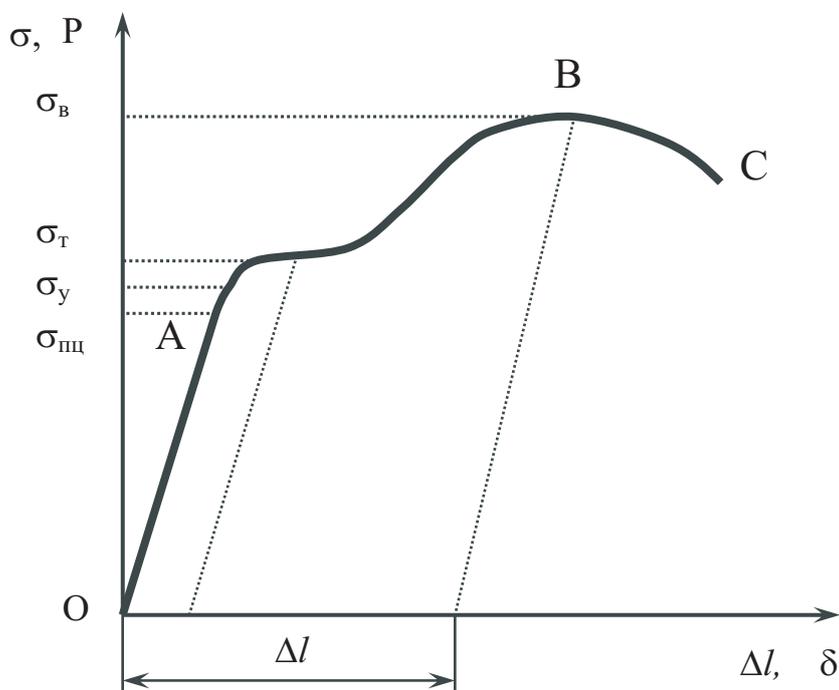


Рис. 7. Диаграмма растяжения

Пределом прочности (временным сопротивлением) называется напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}$$

Разрушение образца наступает в точке C (рис.7).

Значения предела прочности и других показателей приводятся в справочниках.

1.4. Атомно-кристаллическое строение металлов

Все наиболее характерные свойства металлов объясняются наличием в них легкоподвижных коллективизированных электронов, количество которых в кристаллической решетке составляет $10^{22} - 10^{23}$ в 1 см^3 .

Располагаясь в металлах в строгом порядке, атомы в плоскости образуют атомную сетку, а в пространстве - атомно-кристаллическую решетку. Линии на этих схемах являются условными; в действительности никаких линий не существует, а атомы колеблются возле точек равновесия, т.е. узлов решетки с большой частотой. Следовательно, *кристаллическая решетка* – воображаемая пространственная сетка, в узлах которой располагаются частицы, образующие кристаллическое тело.

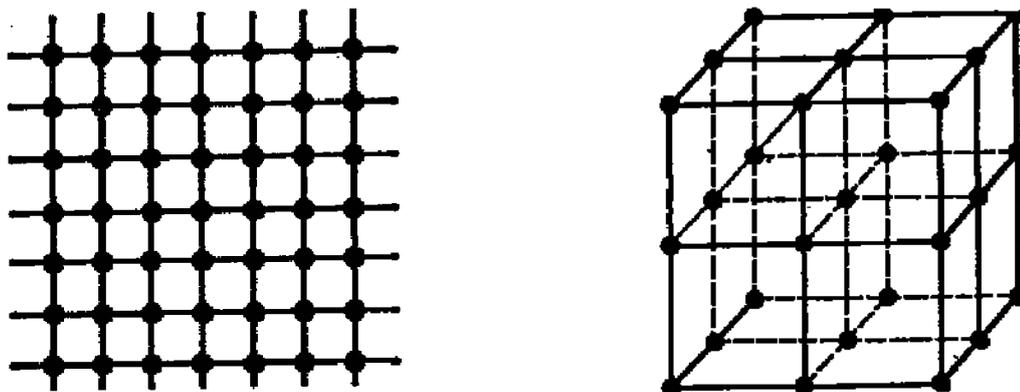


Рис.8. Плоскостная и объемная кристаллические решетки

В кристаллической решетке можно выделить элементарную кристаллическую ячейку, представляющую собой элемент объема из минимального количества атомов, многократным переносом (трансляцией) которого в пространстве можно построить весь кристалл. Для металлов наиболее характерны три типа кристаллических решеток: объемно-центрированная кубическая (ОЦК), гранецентрированная кубическая (ГЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГПУ) (рис.9).

Для описания геометрии элементарной ячейки кристаллической решетки используют шесть величин: три отрезка, равные расстояниям между центрами ближайших атомов по осям координат (a , b , c) называемых *периодами решетки*, а также три угла между этими отрезками α , β , γ . Соотношение между этими величинами и определяет форму решетки.

Кроме того, для характеристики кристаллической решетки вводят следующие величины: атомный радиус, базис, координационное число и коэффициент компактности.

– смещение, сдвиг). Краевая дислокация образована краем «экстраплоскости» (лишней полуплоскости). Винтовая дислокация образуется при сдвиге одной части кристалла относительно другой.

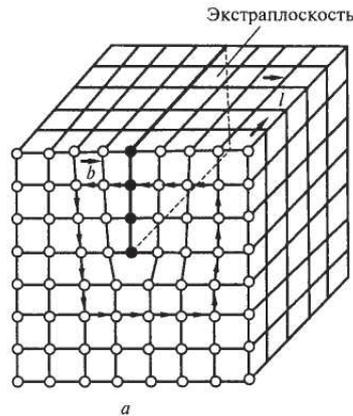


Рис. 11. Краевая дислокация

Под поверхностными дефектами понимают такие нарушения в кристаллической решетке, которые обладают большой протяженностью в двух измерениях и лишь в несколько межатомных расстояний в третьем измерении. Наиболее важными поверхностными дефектами являются поверхности раздела между отдельными зернами. В соседних зернах решетки ориентированы различно и граница между зернами представляет собой переходный слой шириной 5...10 межатомных расстояний. В нем нарушена правильность расположения атомов, имеются скопления дислокаций, повышена концентрация примесей.

1.5. Кристаллизация

Кристаллизацией называется процесс перехода вещества из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллической решетки. Рассмотрим энергетические условия процесса кристаллизации. В природе все самопроизвольно протекающие процессы, в том числе кристаллизация и плавление, обусловлены тем, что новое состояние в новых условиях является энергетически более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии.

Энергетическое состояние системы, имеющей огромное число охваченных тепловым движением частиц, характеризуется термодинамической функцией, называемой свободной энергией. Как известно любая система обладает запасом внутренней энергии, которая формально состоит из двух частей – *свободной энергии* F и так называемой *связанной энергии* TS , тогда

$$F = U - TS, \text{ где}$$

U – полная энергия;

T – абсолютная температура системы;

S – энтропия.

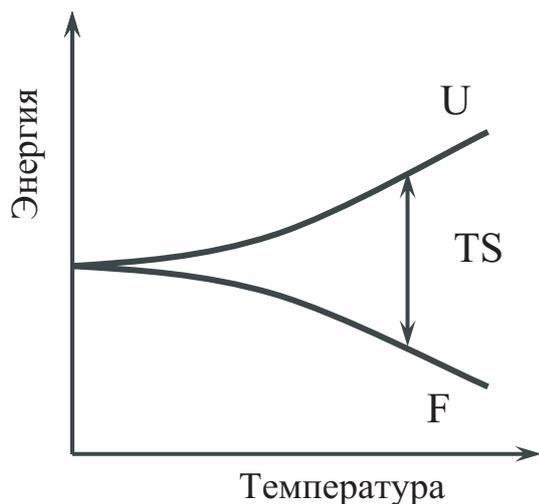


Рис. 12. Зависимость энергии вещества от температуры

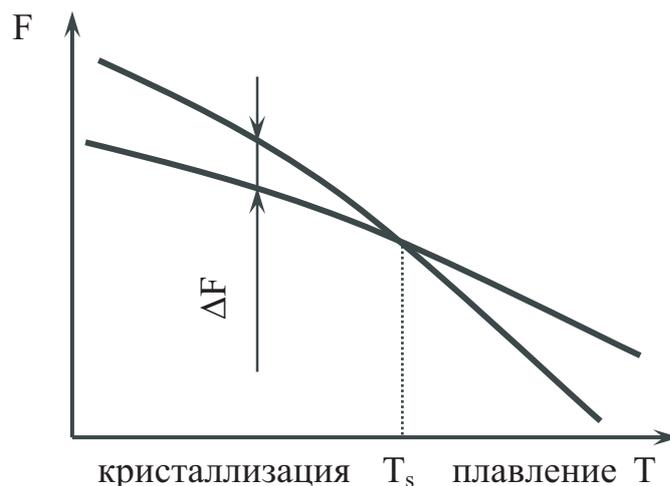


Рис. 13. Зависимости свободной энергии твердого и жидкого состояний вещества

Энтропия служит мерой внутреннего беспорядка (хаотичности) в расположении частиц системы. Так как при нагреве возрастает склонность к беспорядочному расположению атомов, то быстро возрастает энтропия. Это приводит к уменьшению свободной энергии, причем темп падения свободной энергии для жидкой и твердой фаз различен. Равенство свободных энергий жидкого и твердого состояний при температуре равной T_s обуславливает их сосуществование – *состояние равновесия*. Изменение температуры приведет к нарушению равновесия, окажется возможным переход вещества в фазу с меньшей свободной энергией (рис.13).

При температурах ниже T_s будет происходить кристаллизация, а выше T_s – плавление металла.

Разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации называется *степенью переохлаждения* ΔT .

Процесс кристаллизации начинается из жидкого состояния вещества, характеризующегося по строению ближним порядком в расположении атомов и большей внутренней энергией, чем твердое состояние со структурой дальнего порядка.

Механизм процесса кристаллизации.

Д.К. Черновым было установлено, что процесс кристаллизации состоит из двух этапов: 1) зарождение центров (зародышей); 2) рост кристаллов из этих центров.

Размер образующегося зародыша зависит от размеров зоны флуктуации (отклонения значения величины от среднего значения), и не каждый зародыш способен к дальнейшему росту. Если энергия флуктуации позволит «кристаллу» вырасти до критического размера, то дальнейший его рост будет сопровождаться уменьшением свободной энергии системы и способен протекать само-

произвольно. Минимальный размер зародыша, способного к росту при данных температурных условиях называется *критическим*.

Рост кристаллов происходит по *дендритной (древовидной)* схеме, характеризующейся тем, что вначале к зародышам присоединяются все новые атомы жидкого металла в направлении, имеющим наибольшую плотность упаковки. В результате вырастают длинные ветви, которые называются осями первого порядка. По мере роста кристалла на осях первого порядка появляются и начинают расти ветви второго порядка, от которых ответвляются оси третьего порядка и т.д. В последнюю очередь идет кристаллизация в участках между осями дендритов.

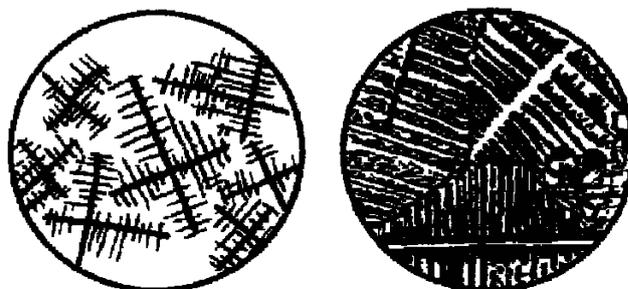


Рис. 14. Дендриты и зерна

Дендриты растут до тех пор, пока не соприкоснутся друг с другом. После этого окончательно заполняются межосные пространства и дендриты, деформируя друг друга, превращаются в кристаллы с неправильной внешней огранкой. Их называют зернами, или кристаллитами.

Скорость процесса и окончательный размер кристаллов при затвердевании определяются соотношением скоростей роста кристаллов и образования центров кристаллизации. Оба процесса связаны с перемещением атомов и зависят от температуры.

При небольшом переохлаждении, т.е. при малой ΔT разность свободных энергий жидкой и твердой фаз невелика, поэтому критический размер зародыша большой, и требуется большая энергия флуктуации, чтобы упорядоченное расположение атомов превратилось в центр кристаллизации. В связи с этим образуется небольшое количество центров кристаллизации, скорость их роста также мала, и кристаллы могут расти долго, с образованием крупнозернистой структуры. С увеличением температуры переохлаждения увеличивается разность свободных энергий, уменьшается критический размер зародыша, и уже при небольшой энергии флуктуации возможно образование центров кристаллизации, которые быстро увеличиваются в размерах. Так как образуется большое количество зародышей, быстро увеличивающихся в размерах, то кристаллы намного быстрее начинают сталкиваться друг с другом и образуется мелкозернистая структура (рис. 15).

Вследствие уменьшения свободной энергии при кристаллизации выделяется теплота, называемая *скрытой теплотой кристаллизации*. Этому соответствует горизонтальный участок кривой охлаждения. При значительной температуре переохлаждения у некоторых металлов скрытая теплота кристаллизации выделяется настолько бурно, что не успевает отводиться в окружающую среду и температура скачкообразно повышается, приближаясь к теоретической, и далее до окончания процесса кристаллизации не изменяется.

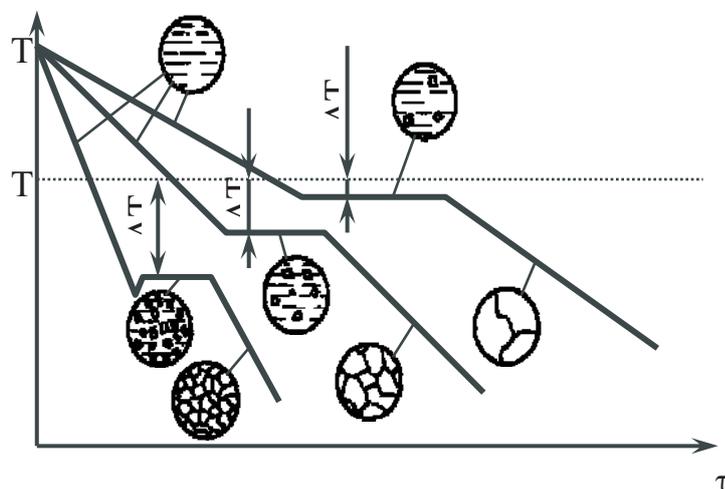


Рис. 15. Зависимость размера зерна от переохлаждения

В реальных условиях самопроизвольное зарождение кристаллов в жидком металле затруднено. Источником образования зародышей служат различные твердые частицы: неметаллические включения, оксиды, продукты раскисления. Чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации, тем мельче зерна. Иногда в металл специально вводят вещества, которые способствуют измельчению зерна. Эту операцию называют *модифицированием*, а специально вводимые элементы – *модификаторами*.

Строение слитка.

Строение стального слитка впервые описано Д. К. Черновым. Структура слитка состоит из трех зон: наружной мелкозернистой зоны I, зоны столбчатых кристаллов II и зоны равноосных кристаллов III.

Образование наружной мелкозернистой зоны обусловлено резким перепадом температур: жидкий металл — холодные стенки изложницы. Металл в этой зоне сильно переохлаждается, в нем образуется большое число центров кристаллизации и он приобретает мелкозернистое строение.

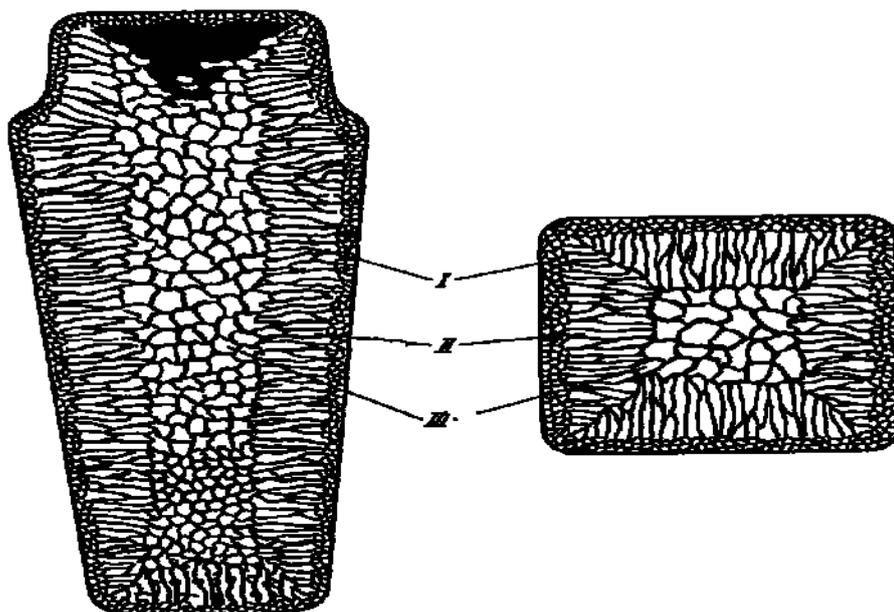


Рис. 16. Схема строения слитка

После образования корковой зоны условия теплоотвода меняются, температурный градиент в прилегающем слое жидкого металла падает и снижается степень переохлаждения. В результате, из сравнительно небольшого числа центров кристаллизации по линии отвода тепла, т. е. перпендикулярно к стенке изложницы, начинают расти столбчатые кристаллы, образующие вторую зону. Развитие их в стороны сдерживается соседними дендритами.

Третья зона – зона равноосных кристаллов. В центре слитка нет определенной направленности отвода тепла. Здесь зародышами обычно являются различные мелкие твердые частицы и кристаллы растут примерно одинаково во все стороны.

Лекция 2. Пластическая деформация и рекристаллизация металлов.

Основы теории сплавов

1. Физическая природа, виды и механизм пластической деформации.
2. Наклеп, возврат, рекристаллизация.
3. Сплавы, соединения и диаграммы состояния.
4. Правило фаз и правило отрезков.
5. Типы диаграмм состояния сплавов.

2.1. Физическая природа, виды и механизм пластической деформации

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием приложенных к нему сил. Деформацию вызывают: 1) внешние силы, приложенные к телу; 2) внутренние силы, возникающие при различных физико-механических процессах, происходящих в теле, например, при быстром неравномерном нагреве или охлаждении.

В твердых телах возможны *упругая* и *пластическая* деформации. Упругой называется деформация, исчезающая после снятия нагрузки, а пластической - остающаяся после снятия нагрузки.

Упругая деформация характеризуется прямой пропорциональностью между прикладываемой нагрузкой P и абсолютным удлинением Δl , на что указывает линия OA диаграммы растяжения (рис. 1). Выше точки A нарушается пропорциональность между напряжением и деформацией, и вслед за упругой наблюдается остаточная деформация, характеризующаяся отрезками, например, ob при нагрузке P_1 и oc при нагрузке P_2 .

Рассмотрим механизм упругой и пластической деформаций.

При упругой деформации кристалла происходят обратимые смещения атомов из положения равновесия: при растяжении атомы удаляются, а при сжатии сближаются. Смещения составляют доли d_0 (межатомного расстояния) и после снятия нагрузки нарушенный баланс межатомных сил

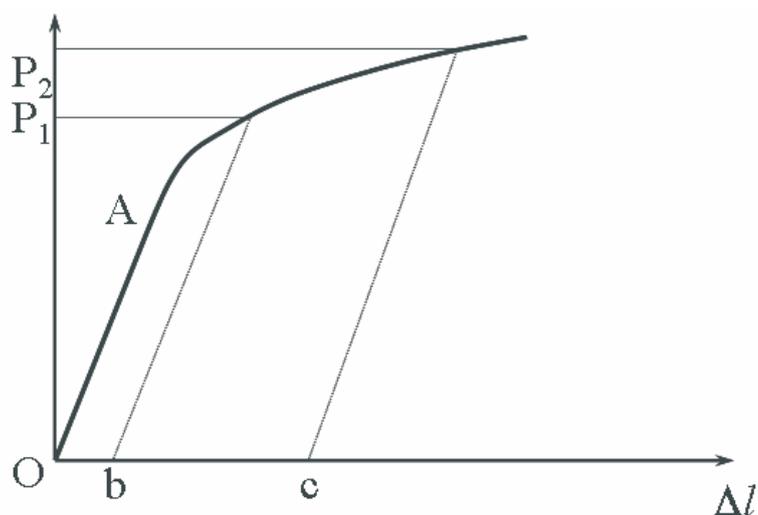


Рис. 1. Диаграмма растяжения

взаимодействия восстанавливается. Атомы возвращаются в положения равновесия, а тело приобретает прежние форму и размеры - оно деформировалось упруго.

Пластическая деформация представляет собой совершенно другой, более сложный процесс необратимых изменений.

При пластическом деформировании происходит сдвиг одной части кристалла относительно другой. После снятия нагрузки перемещенная часть кристалла не возвращается на прежнее место. Сдвиг вызывают касательные напряжения, когда их значения превышают критическое значение $\tau_{кр}$.

Сдвиг в кристалле может осуществляться скольжением или двойникованием (рис. 2,3). При скольжении одна часть кристалла смещается параллельно другой части вдоль плоскости, называемой плоскостью скольжения или сдвига. Скольжение - основной вид сдвига в металлах и сплавах. Деформация двойникованием представляет собой перестройку части кристалла в новое положение, зеркально симметричное к его недеформированной части. Плоскость зеркальной симметрии называют плоскостью двойникования.

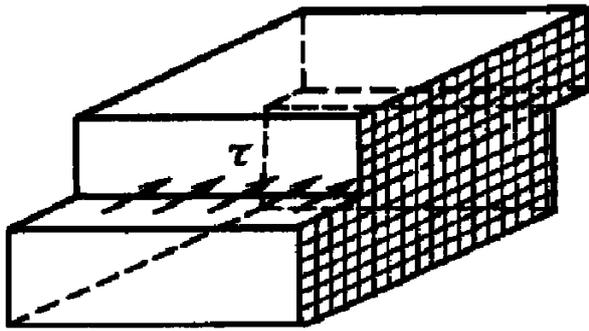


Рис. 2. Схема деформации сдвигом

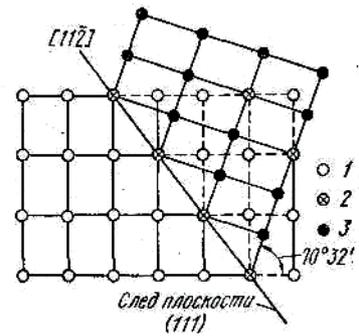


Рис. 3. Деформация двойникованием

Рассмотрим механизм пластического сдвига в монокристалле.

Можно предположить, что под действием некоторого касательного напряжения τ все атомы части кристалла с идеальной решеткой выше плоскости А-А смещаются одновременно (рис. 4). В 20-е годы XX в. Френкелем Я.И. были выполнены теоретические изыскания по расчету критического касательного напряжения $\tau_{\text{тек}}$ такого синхронного «жесткого» сдвига. Оказалось, что его значения в сотни или даже тысячу раз больше фактических значений. Это различие настолько существенно, что вначале гипотезу Френкеля считали ошибочной. Для объяснения этого расхождения была выдвинута теория дислокаций, которые смогли увидеть только в 50-е годы с помощью электронного микроскопа.

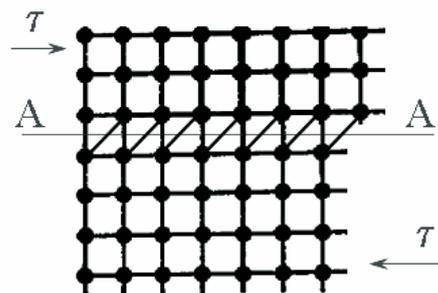


Рис. 4. Схема деформации идеального кристалла

Рассмотрим теперь дислокационный механизм пластической деформации (рис. 5).

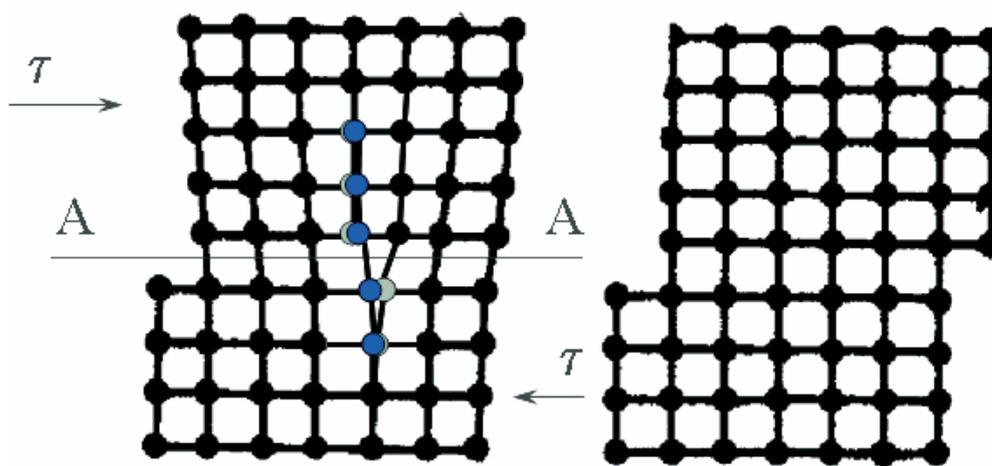


Рис. 5. Схема дислокационной деформации

Под действием касательного напряжения избыточная полуплоскость в верхней части кристалла соединяется с расположенной ниже частью правой соседней плоскости и образует с ней одну атомную плоскость, а оставшаяся правее часть плоскости становится новой полуплоскостью, которая заканчивается краевой дислокацией. Данное перемещение дислокации направо происходит вследствие того, что изменяется «соседство» атомов по обе стороны от плоскости скольжения А-А и незначительного смещения небольшой группы атомов оказывается достаточным для перемещения дислокации на одно межатомное расстояние. При постоянно действующем напряжении дислокация как бы по эстафете передается от одной атомной плоскости к другой, последовательно разрывая при этом каждый соседний «правильный» ряд атомов. Процесс идет до тех пор, пока дислокация не выйдет на поверхность кристалла, где образуется ступенька в одно межатомное расстояние (период решетки).

В плоскости скольжения обычно расположены десятки дислокаций. Их последовательное перемещение вдоль плоскости скольжения развивает процесс пластического течения. Высота ступеньки при этом пропорциональна числу дислокаций, выходящих на поверхность кристалла.

Такой процесс пластической деформации, когда в определенный момент разрывается только одна межатомная связь, а не все сразу, требует незначительных напряжений, гораздо меньших, чем теоретические. Тем самым подтвердилась гипотеза Френкеля и стала теорией. Она получила полное

признание, когда удалось вырастить бездислокационные кристаллы («усы») - нитевидные образования ($d \approx 2$ мкм и $l \approx 10$ мм).

Важной характеристикой, непосредственно влияющей на сопротивление материала пластической деформации, является плотность дислокаций. Согласно теории И.А. Одингга, зависимость между прочностью металла и плотностью дислокаций может быть представлена гиперболической функцией (рис.6).

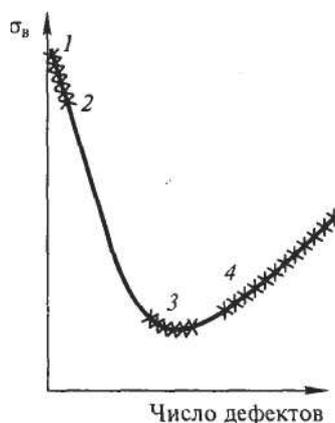


Рис. 6. Зависимость прочности металла от плотности дислокаций

Точка 1 соответствует прочности идеального бездефектного кристалла, т.е. теоретической прочности. Точка 2 соответствует прочности «усов» с очень низкой плотностью дислокаций. С увеличением числа дислокаций в интервале точек 2 - 3 прочность металла снижается, сдвиг кристаллической решетки облегчается, т.к. дислокации располагаются в плоскости скольжения. В точке 3 при плотности дислокаций 10^6 - 10^7 уменьшение прочности прекращается и начинается ее постепенный рост. Это объясняется тем, что с увеличением плотности дислокаций их перемещение затрудняется в связи с тем, что они располагаются не только по параллельным, но и по пересекающимся плоскостям и тем самым препятствуют движению друг друга. Следовательно, позиция 4 соответствует упрочненному металлу.

Таким образом, дислокации искажают решетку и упрочняют металл.

Рассмотрим пластическую деформацию поликристаллического тела.

В результате пластической деформации такого тела происходит

формоизменение каждого зерна. Пока общая деформация мала, порядка 1%, не все зерна деформируются, так как они различно ориентированы по отношению к приложенной нагрузке. С ростом степени деформации увеличивается охват зерен процессом, зерна постепенно вытягиваются в направлении пластического течения, внутри их измельчаются блоки, возрастает плотность дислокаций. При значительных деформациях образуется волокнистая структура материала, где границы зерен различаются с трудом (рис.7).

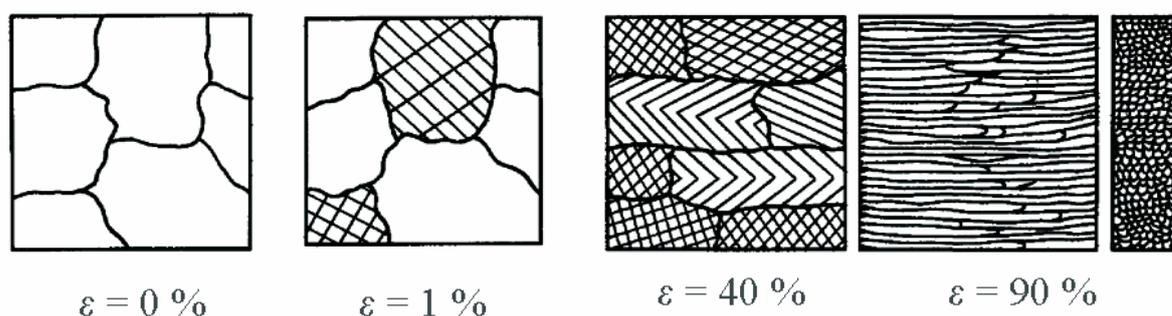


Рис. 7. Микроструктура деформированного металла

Таким образом, при значительной деформации в металле появляется определенная ориентация зерен, которая называется *текстурой* деформации.

2.2. Наклеп, возврат, рекристаллизация

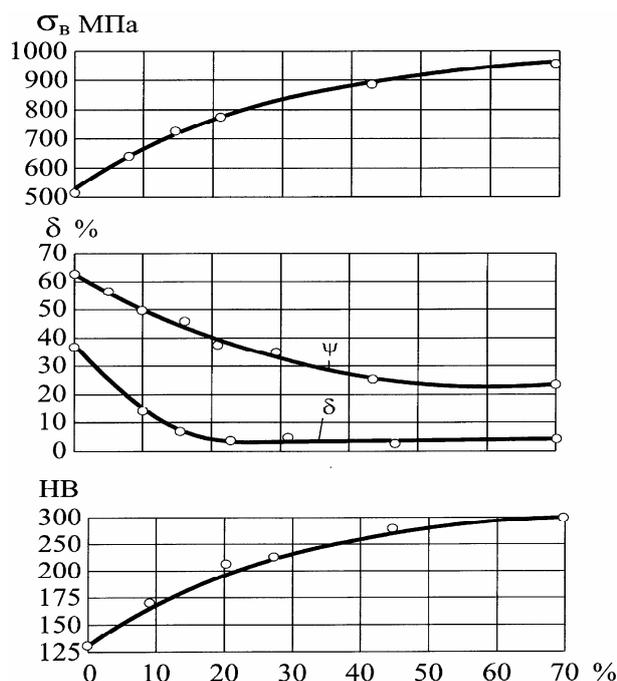


Рис. 8. Влияние степени деформации на механические свойства стали 25

С ростом степени деформации механические свойства (σ_b , твердость и др.), характеризующие сопротивление деформации повышаются, происходит деформационное упрочнение, а способность к пластической деформации падает, т.к. δ и ψ уменьшаются (рис. 8).

Упрочнение металла в процессе пластической деформации называется *наклепом* или *нагартовкой*. Наклепанный металл имеет меньшую плотность, более высокое электросопротивление, меньшую

теплопроводность; у него падает устойчивость против коррозии.

Структура пластически деформированного (наклепанного) металла неравновесна, что приводит к увеличению свободной энергии металла, он переходит в неустойчивое состояние. Поэтому должны происходить самопроизвольные явления, возвращающие металл в более устойчивое структурное состояние.

Следует отметить использование наклепа на практике - для упрочнения деталей машин.

Переход металла в более стабильное состояние происходит при нагреве. Уже умеренный нагрев (до $0,3 T_{пл}$) вызывает ускорение движения атомов, в результате которого уменьшается количество точечных дефектов (вакансий) и дислокаций, следовательно, частично устраняются внутренние напряжения и частично восстанавливается кристаллическая решетка.

Частичное снятие искажений решетки в процессе умеренного нагрева деформированного металла называется *возвратом*, или *отдыхом*. В результате отдыха твердость и прочность несколько понижаются (примерно до 20% по сравнению с исходными), а пластичность возрастает.

При большем повышении температуры наклепанного металла происходит образование новых равноосных зерен из волокнистых. Это явление называется рекристаллизацией. Итак, *рекристаллизация* - процесс возникновения и роста новых зерен из распадающейся волокнистой структуры, происходящий в результате существенного нагрева наклепанного металла.

Академик Бочвар А.А. установил, что между температурой начала рекристаллизации и температурой плавления существует простая зависимость

$$T_{рек} = a \cdot T_{пл},$$

где a - коэффициент, зависящий от чистоты металла.

Для химически чистых металлов $a = 0,1 - 0,2$; для технически чистых металлов $a = 0,3 - 0,4$; для сплавов $a = 0,5 - 0,8$.

Рассмотрим механизм рекристаллизации. При температуре рекристаллизации у границ деформированных зерен (блоков), где повышенная плотность

дислокаций и где кристаллическая решетка наиболее искажена, образуются зародыши новых зерен, к которым переходят атомы от деформированных участков, в результате чего будут расти новые зерна (рис. 9). Образование новых, равноосных зерен вместо волокнистой структуры деформированного металла является первым этапом рекристаллизации и называется *первичной рекристаллизацией* или *рекристаллизацией обработки*. Такая обработка называется *рекристаллизационным отжигом*. Первичная рекристаллизация заканчивается, когда новые зерна полностью замещают весь объем деформированного металла.

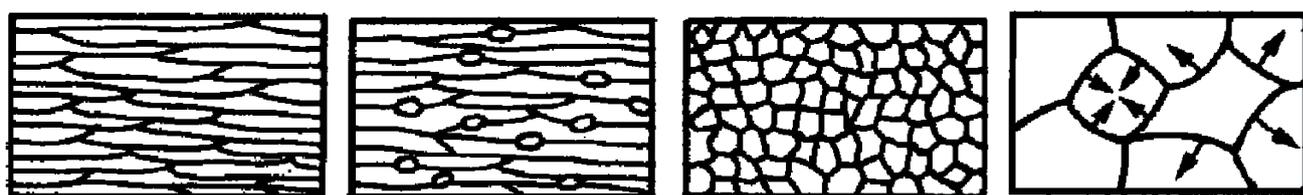


Рис. 9. Схема рекристаллизации металла

В процессе последующего нагрева или выдержки происходит рост некоторых новых зерен за счет других, при этом зерна с вогнутыми границами поглощают зерна выпуклые. Процесс роста рекристаллизованных зерен называется собирательной рекристаллизацией. Процесс собирательной рекристаллизации развивается самопроизвольно в связи с тем, что укрупнение зерен приводит к уменьшению свободной энергии металла (меньше суммарная поверхность границ).

При продолжении процесса наблюдается интенсивный рост зерен, имеющих благоприятную кристаллографическую ориентацию и меньшую концентрацию дефектов. В результате получается структура в целом мелкозернистая, но с небольшим количеством очень крупных зерен. Такая структура обладает пониженной пластичностью.

Процесс образования отдельных крупных зерен называется *вторичной рекристаллизацией*.

По мере повышения температуры твердость сначала слегка снижается вследствие явлений возврата (рис. 10). После отжига (первичной

рекристаллизации) твердость резко падает и достигает исходного значения (значения твердости до наклепа). Вторичная рекристаллизация, связанная с ростом отдельных зерен, приводит к частичному снижению твердости. Аналогично изменяются показатели прочности (предел прочности, предел текучести). Изменяется также и пластичность.

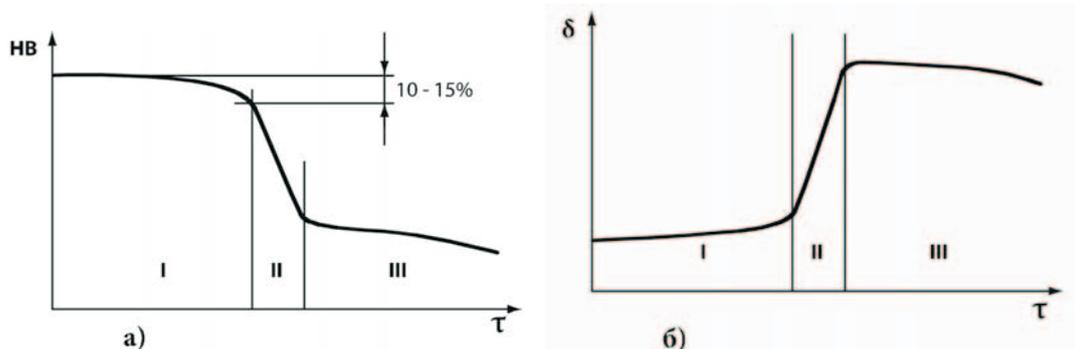


Рис. 10. Влияние степени отжига на твердость и пластичность нагартованного металла

На свойства металла существенное влияние оказывает размер рекристаллизованного зерна. Размер зерна после холодной пластической деформации и рекристаллизации зависит от температуры рекристаллизационного отжига, его продолжительности, степени предварительной деформации, размера исходного зерна, наличия примесей и химического состава.

Чем больше степень деформации, тем мельче зерно после рекристаллизации. При очень малых степенях деформации нагрев не вызывает рекристаллизации. При 3-15% -ной деформации после нагрева наблюдается гигантский рост зерна, т.к. не все зерна будут деформированы и при первичной рекристаллизации быстро растут исходные недеформированные зерна за счет поглощения соседних деформированных зерен, обладающих повышенной свободной энергией и, следовательно, менее устойчивых. Такая степень деформации называется *критической*. Поэтому чтобы не образовывалась крупнозернистая структура, которая имеет низкую пластичность, необходимо выходить в зону сверхкритических деформаций.

2.3. Сплавы, соединения и диаграммы состояния

Чистые металлы обычно имеют низкую прочность и невысокие технологические свойства, поэтому в технике обычно применяют сплавы. *Сплав* - сложное вещество, получаемое сплавлением или спеканием двух или нескольких простых веществ, называемых компонентами. (При сплавлении компоненты доводят до плавления, а при спекании их порошки смешивают и подвергают давлению при высокой температуре).

В зависимости от физико-механического взаимодействия компонентов в сплавах образуются различные фазы. *Фаза* - однородная часть сплава, отделенная от других частей (фаз) поверхностью раздела, при переходе через которую структура вещества или химический состав изменяется скачком.

Сплав имеет более сложное строение, чем его компоненты. Особенности структуры сплава зависят от характера взаимодействия компонентов. Составляющие сплав компоненты могут вступать в химическое взаимодействие, образуя химическое соединение, или взаимно растворяться друг в друге, образуя растворы. Кроме того, часто сплавы представляют собой механическую смесь зерен веществ, образующих сплав.

Механическая смесь двух компонентов А и В образуется тогда, когда они не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не образуют химическое соединение. При этом сплав представляет собой смесь двух типов кристаллов - веществ А и В, отчетливо видимых на микроструктуре (рис. 11).

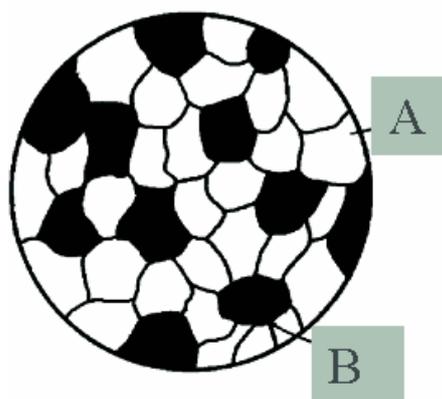


Рис. 11. Микроструктура сплава – механическая смесь

Свойства такого сплава зависят от соотношения компонентов, от размеров и формы зерен. Механические свойства имеют промежуточные значения в сравнении со свойствами чистых металлов А и В.

Химические соединения имеют следующие особенности:

- 1) соотношение компонентов кратное, описывается формулой A_nB_m ;
- 2) кристаллическая решетка сложнее, чем решетки отдельных компонентов А и В;
- 3) свойства соединения резко отличаются от свойств компонентов А и В;
- 4) образование химического соединения сопровождается значительным тепловым эффектом.

Образуемая в результате кристаллизации сплава **однородная** (как и в жидком виде) **твердая фаза**, называется *твердым раствором*. Такой сплав имеет однородные зерна, хотя химических элементов несколько. Рентгеновский анализ обнаруживает в твердом растворе только один тип решетки.

В отличие от механической смеси твердый раствор является однофазным (один тип кристаллов, одна атомно-кристаллическая решетка), а в отличие от химического соединения твердый раствор существует не при строго определенном соотношении компонентов, а в интервале их концентраций.

Различают твердые растворы замещения и внедрения. Твердый раствор замещения образуется замещением части атомов растворителя А атомами растворенного компонента В. Твердый раствор внедрения образуется путем внедрения атомов растворенного компонента В в междоузлия кристаллической решетки растворителя А (рис. 12).

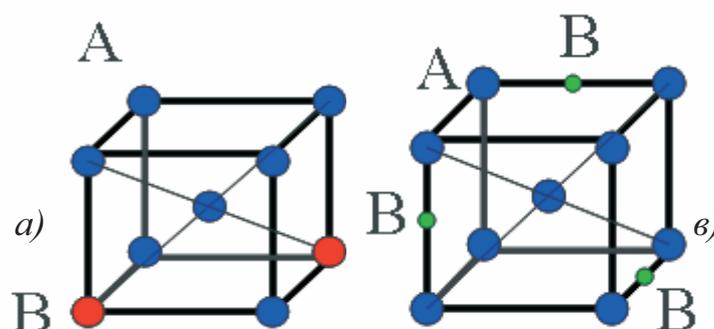


Рис. 12. Твердые растворы замещения (а) и внедрения (в)

В свою очередь твердые растворы замещения могут быть *ограниченными* и *неограниченными*. При неограниченной растворимости любое количество атомов А может быть заменено атомами В, однако для этого требуется выполнение следующих условий: решетки обоих компонентов должны быть изоморфными (одинаковыми), незначительное различие атомных радиусов, валентные оболочки близки по строению.

Различия в размерах атомов, при замещении атомов одного компонента атомами другого приводят к искажению кристаллической решетки. Искажения решетки упрочняют сплав, меняют и другие его свойства.

Диаграмма состояния сплавов — графическое изображение состояния сплава в зависимости от состава, его температуры, давления. Диаграмма состояния показывает устойчивые, равновесные состояния сплава, обладающие при данных условиях минимальной свободной энергией. Поэтому диаграмму иногда называют диаграммой фазового равновесия.

Диаграмму состояния как правило строят при постоянном давлении. При этом по оси ординат откладывают температуру, а по оси абсцисс - концентрацию компонентов. Для однокомпонентной системы (для элемента) диаграмма линейно-представляет собой одну шкалу температуры, на которой отмечают температуру плавления и другие критические точки. Последнее относится к веществам, обладающим полиморфизмом (аллотропией) - способностью существовать в различных кристаллических формах (модификациях).

Так, например, марганец имеет четыре модификации, кобальт и железо по две, Al, Cu, Cr - одну, т.е. вплоть до плавления решетки не меняются (монотропны). Аллотропические формы обозначаются греческими буквами α , β , γ и т.д., которые в виде индексов добавляются к символу, обозначающему элемент.

Диаграмма состояния для сплава, состоящего из двух компонентов, имеет ось концентраций. Общее содержание обоих компонентов в сплаве равно 100% и каждая точка на оси абсцисс соответствует определенному содержанию каждого компонента. Например, в промежуточной точке В с 40% компонента будет 60% - А, а крайние ординаты соответствуют чистым компонентам.

Рассмотрим построение диаграммы состояния сплавов, состоящих из

свинца Pb и сурьмы Sb. Свинец и сурьма обладают неограниченной растворимостью в жидком состоянии, а в твердом состоянии не растворяются друг в друге, т.е. при охлаждении образуют механическую смесь.

Для построения диаграммы состояния обычно пользуются термическим методом, т.е. строят кривые охлаждения для чистых элементов и для сплавов разной концентрации. Возьмем сплавы с 5, 13 и 40% сурьмы (рис. 13).

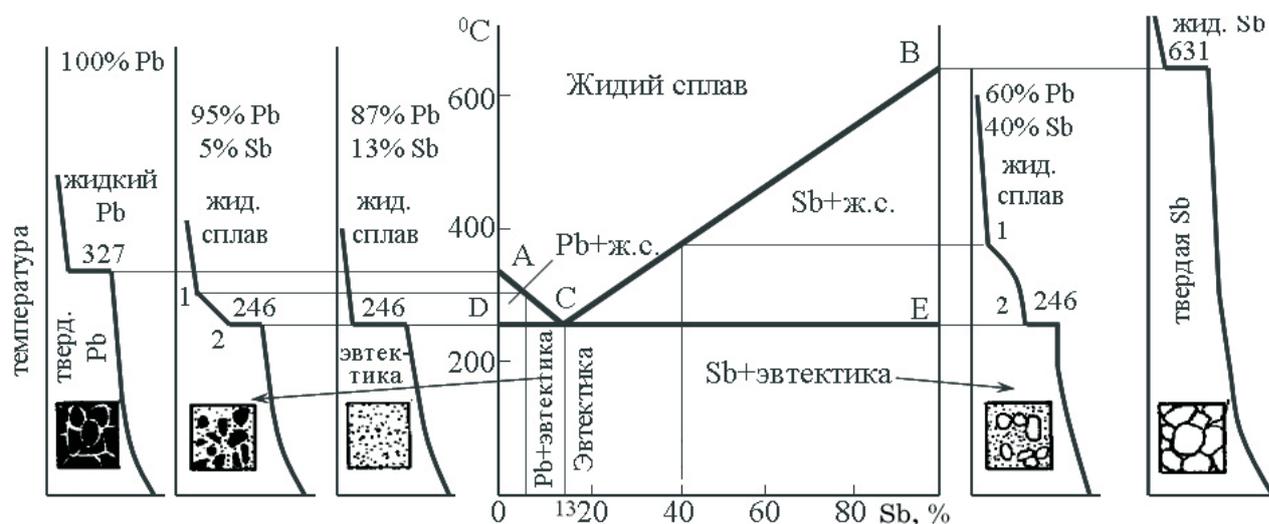


Рис 13. Диаграмма состояния сплавов свинец-сурьма

При рассмотрении кривых охлаждения чистых металлов видно, что они имеют по одной горизонтальной площадке, т.е. по одной критической точке: для свинца 327 °С, а для сурьмы 631 °С, которые характеризуют температуру кристаллизации данных элементов. Переносим эти точки на диаграмму состояния, получаем точки А и В, соответственно с нулевым и стопроцентным содержанием сурьмы в сплавах.

Теперь рассмотрим сплав с содержанием 13% сурьмы и 87% свинца. Из графика охлаждения видно, что данный сплав также имеет одну критическую точку – 246 °С, являющуюся температурой кристаллизации данного сплава с образованием механической смеси кристаллов. Особенностью такого сплава является то, что одновременно выделяются кристаллы свинца и сурьмы, а температура кристаллизации наиболее низкая для данной системы. Такая механическая смесь называется *эвтектикой*, а состав сплава *эвтектическим*. Переносим найденную точку на диаграмму состояния при значении по шкале абсцисс 13% сурьмы и получаем точку С.

Сплав с 5% сурьмы и 95% свинца на кривой охлаждения имеет две критические точки 1 и 2, указывающие на то, что этот сплав затвердевает в интервале температур. Сплав с 40% Sb аналогично предыдущему, имеет две критические точки, которые тоже переносим на диаграмму. Из анализа кривых охлаждения видно, что температура конца кристаллизации не зависит от состава сплава и постоянна - для данной системы это 246°C.

Соединив между собой точки А, С и В, и проведя отрезок параллельный оси абсцисс через точку С, получим две линии АСВ и DCE. Линия АСВ характеризует температуру начала кристаллизации сплавов разного состава и называется «ликвидус» (Liquidus с лат. - жидкий), вторая линия DCE характеризует температуру конца кристаллизации и называется «солидус» (в пер. с лат. - твердый). Эти линии разделяют диаграмму состояния на области с различным фазовым составом.

Выше линии ликвидус сплавы находятся в жидком состоянии, ниже линии солидус - в твердом состоянии, образуя механическую смесь. Между этими линиями сплавы находятся в полужидком - полутвердом состоянии, т.е. состоят из жидкости и кристаллов. Кристаллизация начинается с выпадения из жидкости того компонента, который имеет избыточную концентрацию по отношению к эвтектике. Таким компонентом в сплавах, имеющих сурьмы меньше 13% избыточная будет свинец, и такие сплавы называются доэвтектическими, а у которых сурьмы больше 13% - сурьма, такие сплавы называются заэвтектическими. Выпадение кристаллов избыточного компонента будет продолжаться до тех пор, пока в остающейся жидкой фазе не будет состава эвтектического сплава, т.е. 13% сурьмы и 87% свинца, который закристаллизуется при температуре 246 °С.

При более низкой температуре доэвтектические сплавы данной системы состоят из двух структурных составляющих: кристаллов чистого свинца, выделившихся в интервале температур между линиями ликвидуса и солидуса и эвтектической смеси, затвердевшей при постоянной температуре на линии солидуса. Заэвтектические сплавы будут иметь структуру, состоящую из кристаллов чистой сурьмы и эвтектики.

2.4. Правило фаз и правило отрезков.

Правило фаз (закон Гиббса) представляет собой математическое выражение условия равновесия системы, т.е. уравнение, которое показывает количественную зависимость между числом компонентов, числом фаз и числом степеней свободы.

Для условия равновесия системы при постоянном давлении уравнение имеет вид

$$C = K + 1 - \Phi,$$

где C - число степеней свободы (вариантность системы),

K - число компонентов,

Φ - число фаз.

Под числом степеней свободы (вариантностью системы) понимают возможность изменения внешних и внутренних факторов (температуры и концентрации) без изменения числа фаз, находящихся в равновесии. Когда $C = 0$ (систем невариантна), изменение хотя бы одного фактора приведет к нарушению равновесия и вызовет изменение фазового состава. Например, для чистого металла $C=0$ только при температуре кристаллизации, т.е. существование жидкой и твердой фаз возможно лишь при постоянной температуре. При температуре выше или ниже система будет моновариантной ($C = 1$), т.е. фазовый состав остается постоянным при изменении (в некоторых пределах) одного из переменных факторов (температуры). Для двухкомпонентных сплавов возможно бивариантное состояние ($C=2$), например, в жидком состоянии. В этом случае можно изменять два фактора (концентрацию и температуру) без изменения фазового состава.

В процессе кристаллизации даже при неизменном числе фаз изменяются и концентрация фаз (жидкость обедняется компонентом, входящим в кристаллы), и соотношение фаз (жидкости становится меньше).

С помощью **правила отрезков (правила рычага)** можно определить в любой точке диаграммы (когда в сплаве одновременно существует две фазы): что это за фазы, какова их концентрация, каково их количество.

Рассмотрим пример для сплавов «А - В» (рис. 14).

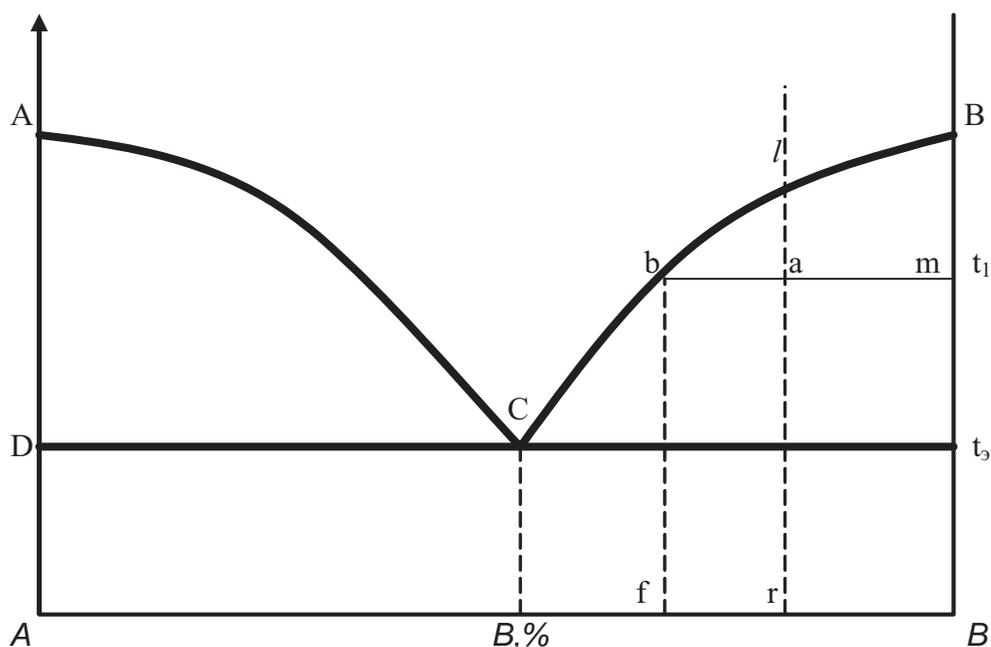


Рис. 14. К решению задачи по правилу рычага

В точке a , показывающей состояние сплава при температуре t_1 он состоит из кристаллов В и жидкости. Выше точки l сплав находится в однофазном состоянии и концентрация компонентов в этой фазе (т.е. в жидкости) определяется проекцией точки l на ось абсцисс. При охлаждении из сплава выделяются кристаллы В и жидкость обогащается компонентом А, а при достижении эвтектической температуры t_3 , содержание компонента В в жидкости определяется проекцией точки С на ось абсцисс. Значит, концентрация компонента В в жидкости изменяется по кривой lbc и для точки a она определяется проекцией точки b на ось абсцисс. Выделяющиеся кристаллы В имеют постоянный состав -это чистый компонент В, концентрация которого лежит на вертикальной оси В.

Из изложенного вытекает первое положение правила отрезков:

для определения концентрации компонентов в фазах, через данную точку проводят горизонталь до пересечения с *ближайшими основными* линиями диаграммы. Проекция точек пересечения на ось концентрации показывают составы фаз. Горизонталь, проведенная через точку a называется конодой.

Количество фаз также можно определить. Если точка l определяет

концентрацию сплава, точка b — состав жидкой фазы, а точка m — состав твердой фазы, то линия bm определяет все количество сплава, отрезок am — количество жидкости и отрезок ba — количество кристаллов. Второе положение правила отрезков формулируется так: для определения количества фазы в заданной точке нужно разделить длину отрезка коноды, *противолежащего* положению данной фазы, на общую длину коноды. То есть, количество кристаллов $Q_k = \frac{ba}{bm}$, а количество жидкости $Q_{жс} = \frac{am}{bm}$.

2.5. Типы диаграмм состояния

Диаграмма I рода — для сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов (см. выше диаграмму Pb - Sb). Фазы: жидкость, кристаллы A и кристаллы B. Структурные составляющие: кристаллы A и B и эвтектика.

Диаграмма II рода — диаграмма для сплавов с неограниченной растворимостью в твердом состоянии. Компоненты A, B. Фазы: жидкость L, твердый раствор α (рис. 15).

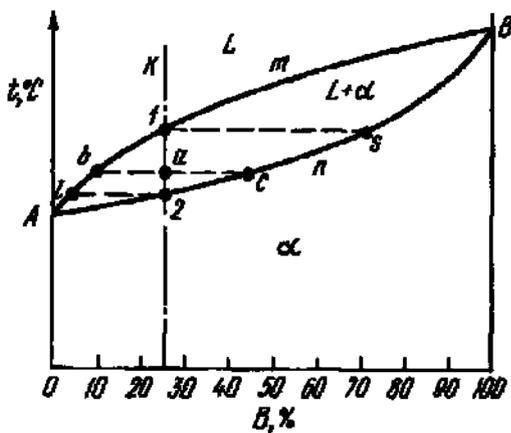


Рис. 15. Диаграмма II рода

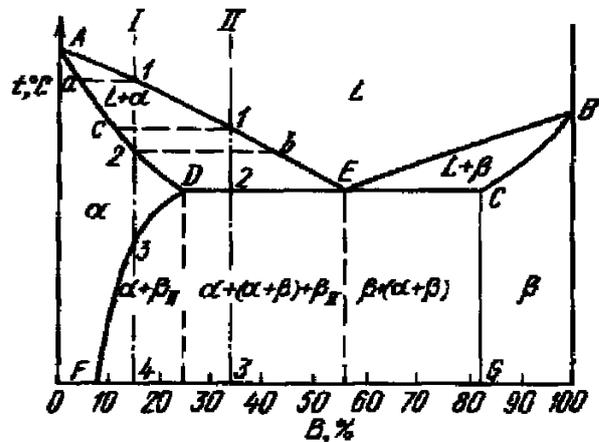


Рис. 16. Диаграмма III рода

Если два компонента неограниченно растворимы в жидком и твердом состояниях, то возможно одновременное существование лишь двух фаз: жидкости и твердого раствора. Следовательно, трех фаз не бывает, кристаллизации при постоянной температуре не наблюдается и горизонтальной линии на диаграмме не будет.

Диаграмма состояния III рода (рис. 16) — диаграмма для сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии. Компоненты: A, B. Фазы:

жидкость L, твердые растворы α и β .

Оба компонента неограниченно растворимы в жидком состоянии, ограниченно в твердом и не образуют химических соединений. В сплавах такого рода возможно существование: жидкой фазы, твердого раствора компонента В в компоненте А, который называется α -раствор, твердого раствора компонента А в В, который обозначается через β . В этой системе не образуются фазы, представляющие собой чистые компоненты. Из жидкости могут выделяться только твердые растворы α или β (около вертикалей А и В, соответствующих чистым компонентам). Предельная растворимость компонента В в А определяется линией DF, а предельная растворимость А в В - линией CG. Линия AEB является на этой диаграмме линией ликвидус, линия ADCB - линией солидус.

Наиболее характерным сплавом для этой диаграммы является сплав I. Выше точки 1 сплав находится в жидком состоянии. В точке 1 начинается процесс кристаллизации и выделяются кристаллы твердого раствора α . В точке 2 кристаллизация закончится. Ниже точки 3 твердый раствор α является пересыщенным и выделяет избыточные кристаллы β -твердого раствора. Количество кристаллов β при охлаждении увеличивается, они обозначаются символом β_{II} и называются вторичными кристаллами, т.к. выделяются из твердого раствора, в отличие от первичных β -кристаллов, выделяющихся из жидкости.

Так как линия CG в отличие от линии FD изображена вертикальной, т.е. растворимость компонента А в В не зависит от температуры, то вторичных выделений α -кристаллов нет.

Между точками D и C кристаллизация происходит по типу диаграммы I рода - диаграммы механических смесей.

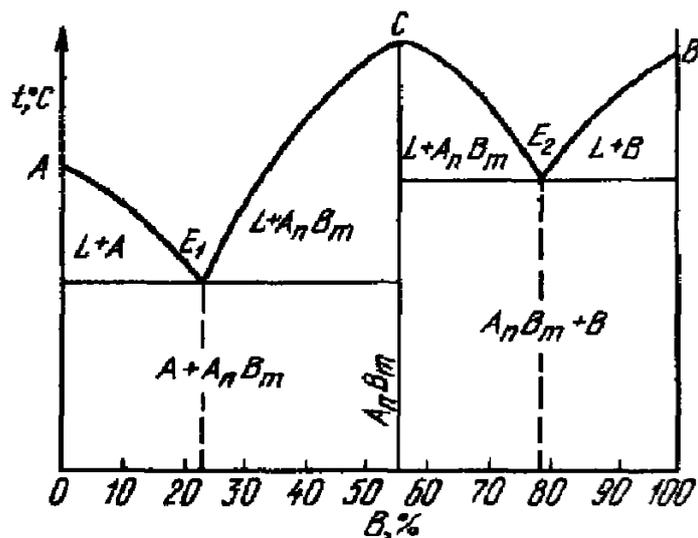


Рис. 17. Диаграмма IV рода

Диаграмма IV рода - диаграмма состояния сплавов, образующих устойчивое химическое соединение. Компоненты А и В при плавлении образуют химическое соединение, характеризующееся их определенным соотношением, что отразится на диаграмме вертикальной линией, проходящей через абсциссу, отвечающую данному соотношению компонентов в химическом соединении (рис. 17). Химическое соединение устойчиво, а значит, может само играть роль компонента системы сплавов, разделяя общую диаграмму состояния на ряд отдельных диаграмм, например, на две диаграммы I рода, где точки E_1 и E_2 - эвтектические.

Лекция 3. Железо и его сплавы.

1. Железо и углерод.
2. Фазы в системе Fe – Fe₃C.
3. Диаграмма состояния сплавов системы Fe – C.

В технике наиболее широко применяются сплавы на основе железа, а из них – сплавы железа с углеродом - стали и чугуны. Они составляют 95% используемых в мире конструкционных материалов. Для получения заданных свойств в них вводят легирующие элементы. Сплавы могут обеспечить не только разнообразные, но и лучшие свойства, чем чистое железо.

3.1. Железо

Чистое железо – металл серебристого цвета, мягкий, благородный. Однако, небольшая доля примесей придает ему склонность к ржавлению. В настоящее время можно получить в значительных объемах железо 99,999% чистоты.

Технические сорта железа (железо Армко) содержат 99,8 – 99,9% Fe, т.е. с примесями до 0,2%, из которых углерода до 0,02%, меди до 0,1% и еще десяток других элементов с малой концентрацией.

Температура плавления железа 1539 °С. При содержании примесей 0,01 – 0,1% железо имеет следующие механические характеристики: твердость НВ 70–80, предел прочности $\sigma_B = 200-250$ МПа, относительное удлинение $\delta = 50\%$. Железо полиморфно и имеет четыре модификации, из которых рассмотрим подробно две основные – α (ОЦК) и γ (ГЦК решетка) (рис. 1).

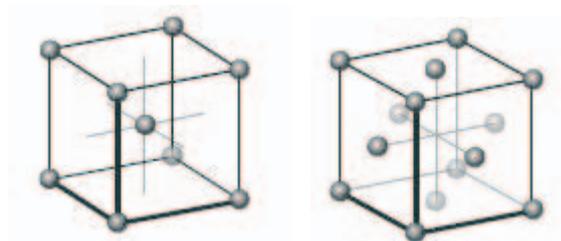


Рис. 1. Элементарные ячейки железа

Fe_α существует ниже 911 °С. Период решетки ОЦК 0,287 нм. Плотность $P_\alpha = 7,86$ г/см³. Ниже 768 °С (точка Кюри) железо ферромагнитно (магнитно), выше (Fe_β) – оно парамагнитно. В ОЦК решетке имеется 12 свободных мест в середине ребер. Диаметр такого свободного места, так называемой поры, 0,062 нм.

Fe_γ существует при температуре 911 – 1392 °С. Период решетки ГЦК 0,364 нм. Плотность $P_\gamma = 8,0$ г/см³. Пора в центре куба больше, чем в ОЦК. Несмотря на тепловое расширение, объем γ -металла меньше, чем объем Fe_α примерно на 1%, т.к. плотность упаковки атомов в ГЦК выше, чем в ОЦК.

Железо со многими элементами образует растворы: с *металлами* – растворы замещения, с *углеродом, азотом* и *водородом* растворы внедрения.

Углерод – неметаллический элемент, полиморфен: существует в двух кристаллических решетках. Соответствующие модификации – графит и алмаз.

Графит (от греч. grapho – пишу) – минерал, наиболее устойчивая модификация чистого углерода. Графит получают нагреванием антрацита без доступа воздуха. Твердость по минералогической шкале – 1, плотность $\rho = 2,2 \text{ г/см}^3$. Графит огнеупорен ($T_{пл} = 3500 \text{ }^\circ\text{C}$), электропроводен, имеет цвет от черного до серого. Кристаллическая решетка – гексагональная слоистая. Межатомные расстояния: в основании решетки – 0,142 нм, между слоями – 0,340 нм (рис. 2).

Алмаз (тюркс. алмас, от греч. adamas – несокрушимый), вторая – метастабильная (относительно устойчивая) модификация углерода. Этот самородный минерал очень твердый – твердость по минералогической шкале 10 (наивысшая), плотность $\rho = 3,5 - 3,6 \text{ г/см}^3$. Цвет: желтоватый, зеленоватый, иногда голубой и черный, а также бесцветный. Ограниченные кристаллы – бриллианты.

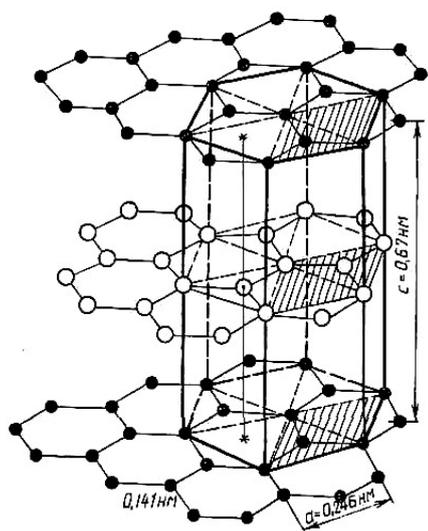


Рис. 2. Структура графита

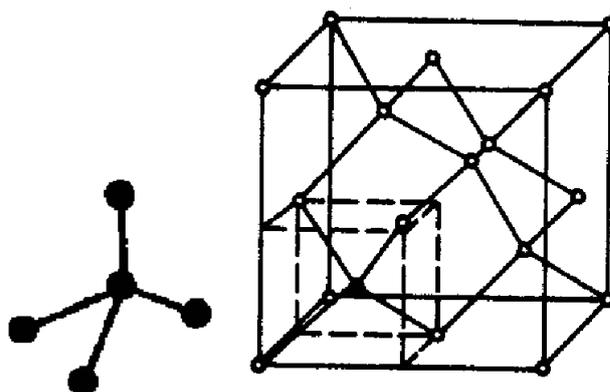


Рис. 3. Элементарная ячейка и объемная решетка алмаза

Непрозрачный алмаз – ценный абразив.

Синтетические алмазы получают при высоких давлениях и температуре из графита. Средний размер кристаллов 1-2 мм. Их используют как абразив, материал для паст и порошков, для изготовления фильер.

Исключительно высокая твердость алмаза определяется строением кристаллической решетки, в которой все четыре атома расположены на одинаковом расстоянии от центрального атома. Межатомная связь ковалентная, энергия связи очень большая, решетка неплотноупакованная.

В графите ковалентные силы действуют в основаниях, а между основаниями – слабые силы Ван-дер-Ваальса. При деформации графита в первую очередь разрушаются связи между слоями, чем и объясняется его низкая твердость.

Взаимодействие железа и углерода

- Углерод растворяется в железе в жидком и твердом состояниях. В твердом состоянии образует с атомами Fe твердые растворы внедрения $\text{Fe}(\text{C})$.
- Углерод и железо могут образовывать химическое соединение Fe_3C – карбид железа.
- В высокоуглеродистых соединениях углерод может находиться в чистом виде, в виде графита Γ (т.е. образуется механическая смесь $\text{Fe}_3\text{C}+\text{Fe}(\text{C})+\Gamma$).

3.2. Фазы в системе Fe – C

В системе железо – углерод возможно присутствие следующих фаз: жидкости (Ж), растворов феррита (Ф) и аустенита (А), химического соединения цементита (Ц) и графита (Г).

Жидкость – вещество, в промежуточном состоянии между твердым и газообразным с относительно равномерно распределенными атомами компонентов, имеющих «ближний порядок» в отличие «дальнего порядка» - атомной связи в кристаллах. В жидкости атомы охвачены повышенной энергией, более подвижны и потому проявляется текучесть.

Феррит (от «феррум»), являющийся твердым раствором внедрения углерода (и других элементов) в α -железе, обозначается $\text{Fe}_\alpha(\text{C})$. Различают высокотемпературный и низкотемпературный феррит. Свойства феррита при содержании 0,006% углерода при температуре 20 °С: предел временного сопротивления $\sigma_b = 250\text{-}300$ МПа, относительное удлинение $\delta = 50\%$, твердость НВ 80 – 100.

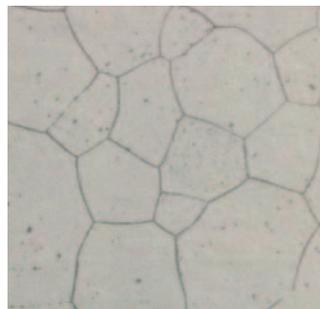


Рис. 4. Микроструктура феррита (полиэдры)



Рис. 5. Микроструктура аустенита

Растворимость углерода в феррите низка, так как в ОЦК решетке поры малы и значительная часть углерода располагается в вакансиях и на дислокациях.

Аустенит (в честь англ. ученого Р. Аустена) – твердый раствор внедрения углерода в γ -железе, обозначается $\text{Fe}_\gamma(\text{C})$. Растворимость углерода в Fe_γ достигает 2,14% - значительно больше, чем в Fe_α , т.к. в отличие от ОЦК решетки в ГЦК решетке в центре имеется сравнительно большая пора диаметром 0,102 нм

(диаметр атома графита 0,154 нм). Аустенит пластичен ($\delta = 60\%$), но прочнее - при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет твердость НВ 160 – 200 из-за искажений решетки.

Микроструктура аустенита и феррита – полиэдрические (многогранные) зерна, но в аустените имеются двойники (рис.5).

Главный вывод: Графит и алмаз – химический состав одинаков, но разные решетки и очень разные свойства; аналогично аустенит и феррит – одно и то же по составу, но структура различна и свойства также различны.

Цементит – карбид железа Fe_3C . Атомный состав в %: Fe – 75, С – 25. Массовый состав: 6,67% С, остальное Fe.

Цементит имеет сложную ромбическую решетку, очень твердый ($>800\text{ НВ}$) и хрупкий (имеет почти нулевую пластичность). Температура плавления $T_{\text{пл}} = 1260\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В кристаллах цементита преобладает металлическая связь, поэтому он электропроводен, имеет блеск, белый цвет. В цементите атомы железа могут замещаться атомами металлов, атомы углерода атомами азота и кислорода – получается *легированный* цементит.

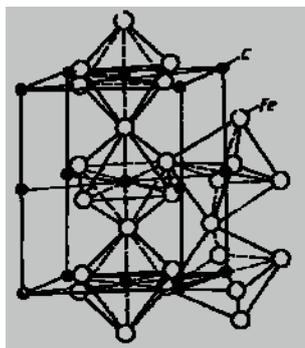


Рис. 6. Элементарная ячейка цементита

Цементит - соединение неустойчивое и при высокой температуре может распадаться на Fe и графит Г. Графит имеет 100% углерода и простую по форме решетку. Аустенит и феррит – малоуглеродистые сплавы (в аустените до 2,14% углерода) и имеют сложны решетки. Цементит имеет около 7% углерода и очень сложную кристаллическую решетку. В этой связи из жидкости при охлаждении, из других фаз (аустенита и феррита) легче образуется цементит (он ближе к ним по строению), чем свободный графит.

3.3. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

Диаграмма состояния по составу компонентов железо-углерод (Fe – C), а по фазовому составу железо-цементит (Fe – Ц или Fe – Fe_3C), поэтому диаграмма имеет двойную шкалу концентраций (рис. 7). Вертикальные шкалы – температурные с критическими точками для железа (А (1539 $^{\circ}\text{C}$), G (911), N (1392)) и у цементита – точка D ($T_{\text{пл}}$). Принимая за второй компонент цементит (а не углерод) диаграмму называют диаграммой состояния сплавов железо-цементит.

Линия ACD – ликвидус, линия AECF – солидус.

На участке AC в интервале температур из жидкости кристаллизуется аустенит, на участке CD – цементит, а в точке C и по всей горизонтали EF – эвтектическая смесь аустенита (А) с цементитом (Ц). Эта часть диаграммы представляет собой диаграмму III рода с эвтектикой и линией ES ограничения растворимости углерода.

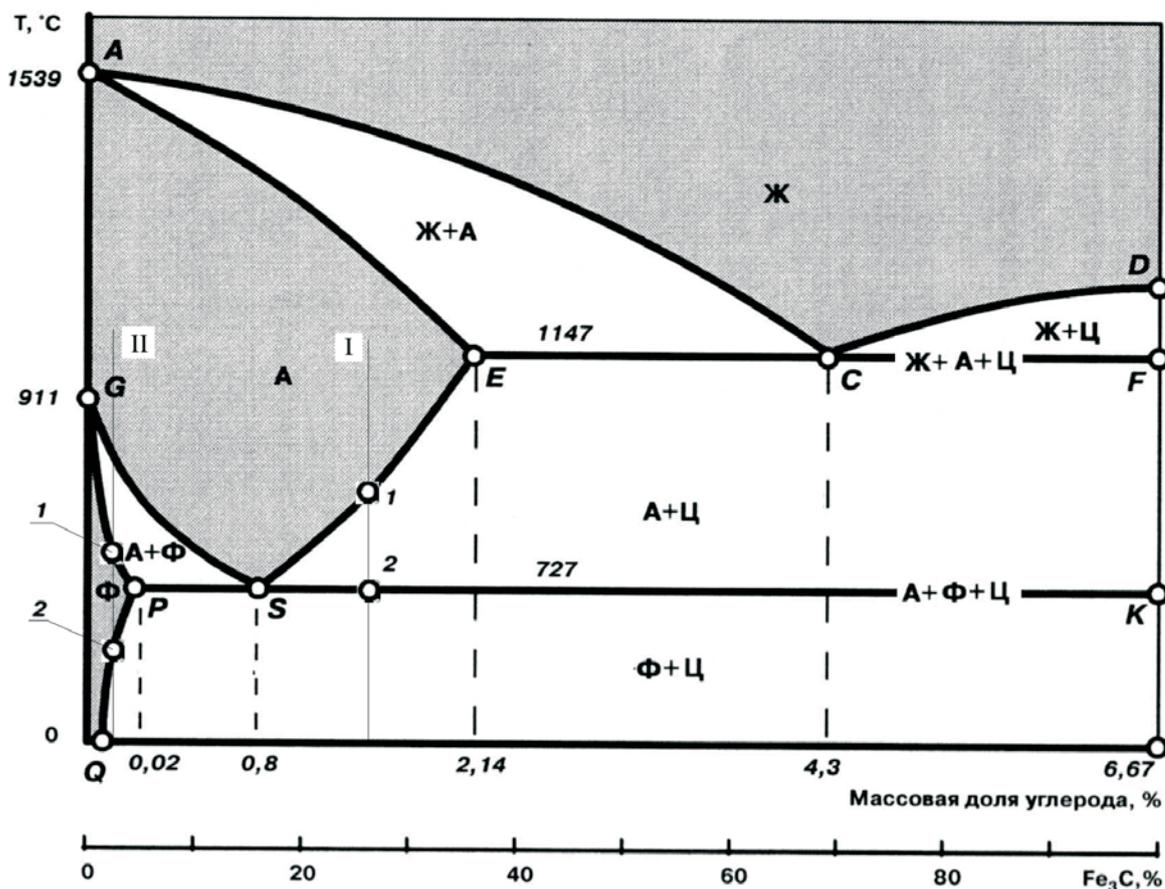


Рис. 7. Фазовая диаграмма состояния сплавов Fe - C

Линии: CD – первичного цементита, образующегося из жидкости,
 ES – вторичного цементита, образующегося из аустенита (А),
 PQ – третичного цементита, образующегося из феррита (Ф).

Особенности превращений:

1. Выделение цементита из-за переменной растворимости углерода в фазах.

Так, для сплава I с 1,5% содержанием углерода (C) при температуре 1147°C насыщение аустенита углеродом не полное (могло быть $\approx 2\%$), но при охлаждении от точки 1 и ниже концентрация углерода снижается и на линии PSK составит всего 0,8%. Аналогичный процесс происходит в сплаве II при температурах от точки 2 и ниже для феррита, т.к. при охлаждении концентрация углерода уменьшается до 0,006% (точка Q). Выделяющийся углерод образует цементит для сплава I – вторичный, для сплава II – третичный.

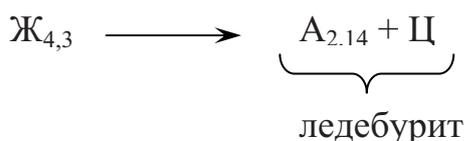
2. Вторичная кристаллизация (перекристаллизация), вызванная превращением $Fe_\gamma - Fe_\alpha$

Чистое железо претерпевает это превращение при 911°C , а сплавы - в интервале температур, соответствующих линиям GS (начало превращения аустенита в феррит) и GP (конец превращения), а также от GS до PS. Кроме того, на линии PSK происходит перлитное превращение (рассмотрено ниже).

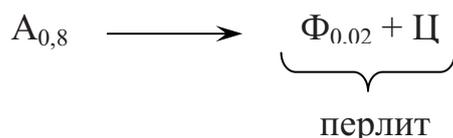
Используя правило рычага, можно установить, что в области диаграммы EFKSE находятся фазы аустенит (А) и цементит (Ц), а в PKLQP – феррит и цементит. Таков фазовый состав железоуглеродистых сплавов на диаграмме состояния.

- Количественно распределение фаз на диаграмме (рис. 7) следующее:
- однофазные области: Ж – выше линии ликвидус ACD,
 А – в пределах AESGA, здесь т. Е соответствует предельной растворимости углерода в аустените,
 Ф – в пределах GPQOG, здесь т. Р и Q соответствуют предельной растворимости углерода в феррите;
 - по две фазы имеются во всех остальных областях и на наклонных линиях;
 - по три фазы существуют только на горизонтальных линиях ECF и PSK.

На этих горизонтальных линиях происходят изотермические превращения: на линии ECF (1147°C) – *эвтектическое* превращение. Образующаяся эвтектика называется *ледебуритом* (в честь немецкого ученого А. Ледебура);



на линии PSK (727°C) – *эвтектоидное* превращение. Образующийся эвтектоид называется *перлитом* (от перламутрового блеска).



Эвтектика и эвтектоид («похожий на эвтектику») представляют собой **мелкокристаллические смеси двух фаз** (составляющих). Это самостоятельные структурные составляющие, значительно влияющие на свойства сплавов.

Перлит (0,8% С) (рис.8) чаще всего имеет пластинчатое строение и является прочной структурой: $\sigma_b \approx 600$ МПа, твердость НВ 180 – 220, $\delta \approx 16\%$.

Ледебурит (4,3% С) (рис. 9) при охлаждении претерпевает на линии PSK эвтектоидное превращение находящегося в нем аустенита. При низких температурах ледебурит представляет собой смесь перлита с цементитом. Цементит образует сплошную матрицу, в которой размещены колонии перлита (цементит на рис.9 светлый, перлит – темный). Такое строение ледебурита служит причиной его большой твердости ($> \text{НВ } 600$) и хрупкости (δ до 2%). Присутствие ледебурита в структуре сплавов обуславливает их неспособность к обработке давлением, затрудняет обработку резанием.

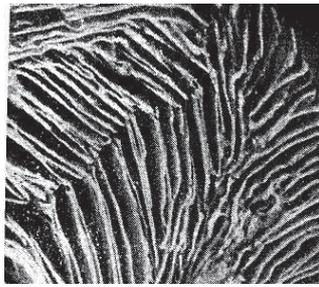


Рис. 8. Перлит (эвтектоид)

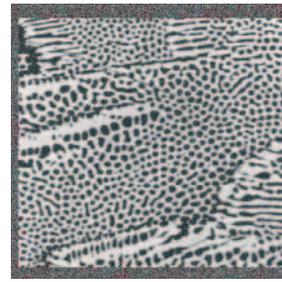


Рис. 9. Ледебурит (эвтектика)

Поскольку структурная диаграмма (рис. 10) довольно сложная, необходимо рассмотреть процессы превращений железоуглеродистых сплавов различного состава.

I сплав содержит углерода до 0,006%. В жидкости в интервале линии AC-AE кристаллизуется аустенит, который при дальнейшем охлаждении в интервале линий GS-GP превращается в феррит ($A \rightarrow \Phi$), что представлено на фрагменте диаграммы точками 1 и 2. Ферритная структура сохраняется вплоть до комнатной температуры (пунктирная линия).

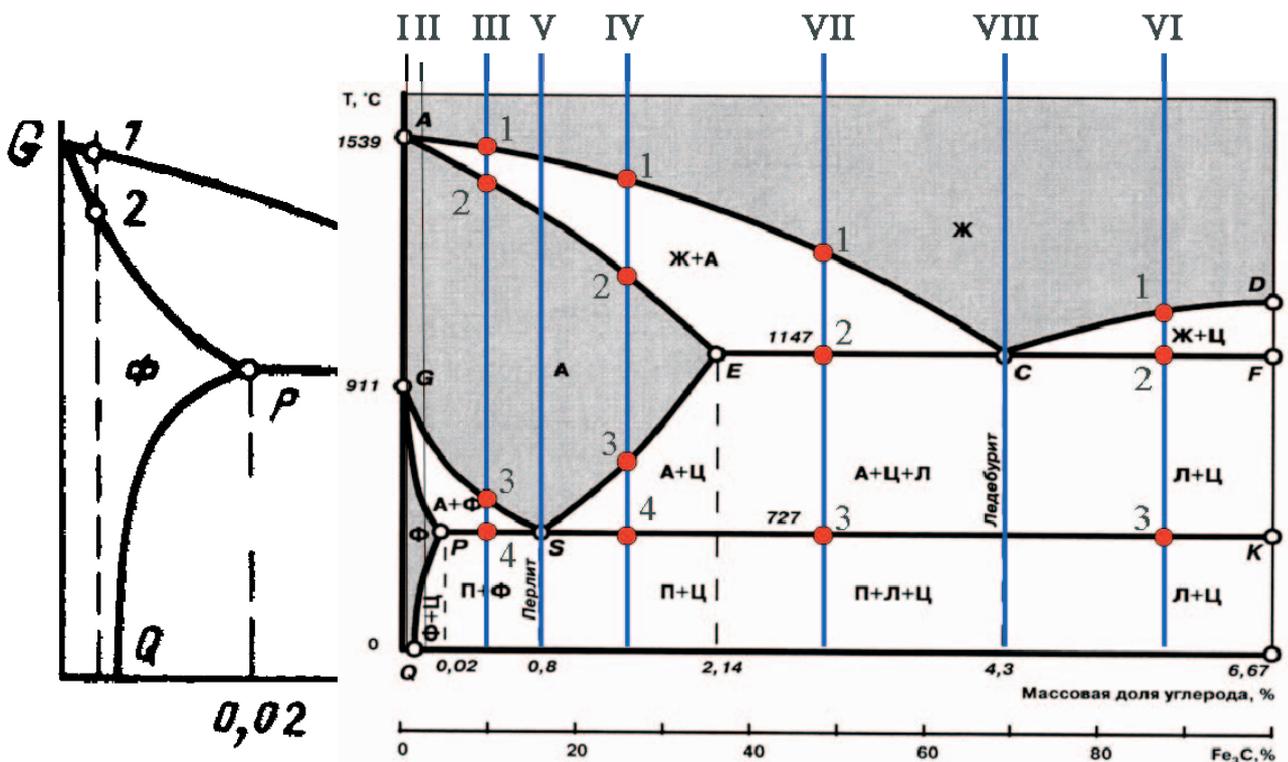


Рис. 10. Структурная диаграмма состояния сплавов Fe - Fe₃C

II сплав с содержанием углерода 0,006 – 0,02%. Сначала процесс идет как в сплаве 1, но при охлаждении феррита от линии PQ из него выделяются избыточный углерод и образуется цементит третичный (процесс описан выше). Конечная структура будет двухфазной: $\Phi + \text{Ц}_{\text{III}}$ (феррит + третичный цементит), причем феррит в виде зерен, цементит в виде прослоек по их границам. Третичный цементит ухудшает технологическую пластичность.

Так как содержание третичного цементита невелико по сравнению с цементитом, выделяющимся при других фазовых превращениях, то о нем и не упоминают при рассмотрении структур сплавов с содержанием углерода больше 0,02% (для сплавов правее т. Р).

Сплавы с содержанием углерода от 0,02 до 2,14% - стали.

Сплав III с содержанием углерода от 0,02 до 0,8%. Образование кристаллов аустенита происходит в интервале температур 1 – 2. В точке 2 кристаллизация аустенита заканчивается от точки 2 до точки 3 структурных изменений не происходит, аустенит просто охлаждается. В точке 3 начинается превращение аустенита в феррит. При охлаждении сплава до точки 4 состав остаточного аустенита будет соответствовать эвтектоидному, поэтому произойдет эвтектоидное превращение аустенита в перлит. При комнатной температуре структура сплава состоит из феррита и перлита (рис.11).

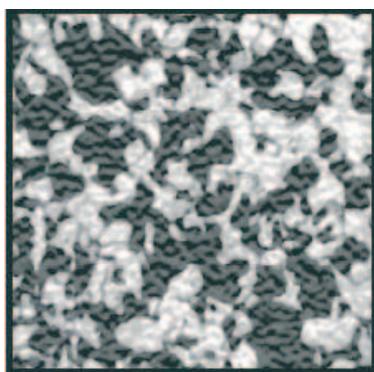


Рис. 11. Сталь доэвтектоидная

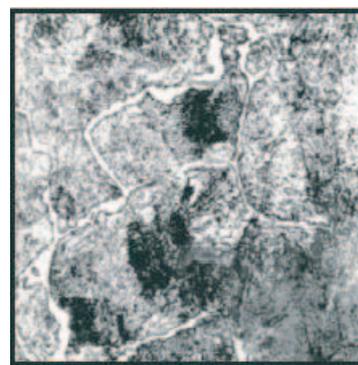


Рис. 12. Сталь заэвтектоидная

Сплав IV с содержанием углерода от 0,8 до 2,14%. До точки 3 превращение в этом сплаве такие же, как и в предыдущем (из жидкости образуется аустенит, который охлаждается без изменения до точки 3). При охлаждении в интервале температур 3 – 4 из кристаллической решетки аустенита выделяется избыточный углерод с образованием вторичного цементита Цц. На линии PSK происходит эвтектоидное превращение, при котором аустенит превращается в перлит. Поэтому при комнатной температуре структура сплава состоит из перлита и вторичного цементита (в виде белой сетки вокруг перлитных зерен), что представлено на рис. 12.

Сплав V с содержанием углерода 0,8%, по составу соответствует точке S. Слева от точки S аустенит частично превращается в феррит, справа от нее аустенит частично превращается в цементит вторичный, а в точке S весь аустенит превращается в перлит (А+Ц).

В сплавах с содержанием углерода более 2,14% при кристаллизации происходит эвтектическое превращение. Такие сплавы называются чугунами.

Сплав VI с содержанием углерода от 4,3 до 6,67%. Кристаллизация начинается с образования цементита. Первичный цементит выделяется из жидкости в интервале температур 1 – 2. В точке 2 состав жидкости соответствует точке С, т.е. жидкость имеет концентрацию углерода, равную 4,3% и происходит эвтектическое превращение этой жидкости в ледебурит. При дальнейшем охлажде-

нии в интервале температур 2 – 3 из аустенита, входящего в эвтектику – ледебурит, выделяется вторичный цементит. В точке 3 происходит перлитное превращение аустенита. Поэтому при комнатной температуре сплав состоит из цементита и ледебурита, представляющего собой смесь перлита и цементита (рис. 14).

Сплав VII с содержанием углерода от 2,14 до 4,3%. Кристаллизация начинается в точке 1 образованием аустенита, в точке 2 жидкость имеет концентрацию углерода, равную 4,3% и происходит эвтектическое превращение жидкости в ледебурит. При дальнейшем охлаждении в интервале 2 – 3 из аустенита, как структурно свободного, так и входящего в эвтектику (ледебурит), выделяется вторичный цементит. В точке 3 происходит перлитное превращение аустенита, содержащего 0,8% углерода. Структура таких сплавов при комнатной температуре состоит из перлита, ледебурита и вторичного цементита (рис. 13). Вторичный цементит и цементит ледебурита сливаются и практически неразличимы.

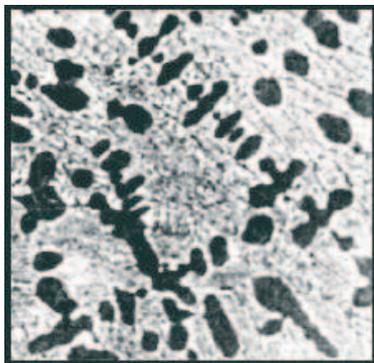


Рис. 13. Чугун доэвтектический

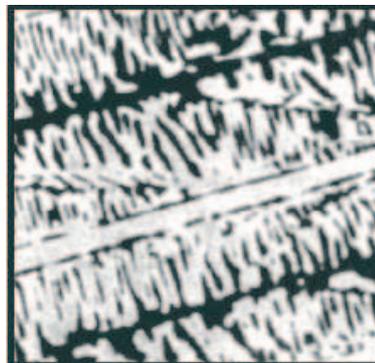


Рис. 14. Чугун заэвтектический

Сплав VIII с содержанием углерода 4,3%. Жидкость в точке С превращается в ледебурит – смесь мелких кристаллов аустенита и цементита. При охлаждении содержание углерода в аустените, входящем в ледебурит понижается и на линии PSK происходит его перлитное превращение.

У всех сплавов, содержащих < 2,14% углерода – у сталей, в результате первичной кристаллизации получается пластичная структура аустенита, у сплавов с у углеродом > 2,14 % - у чугунов структура хрупкая, т.к. включает ледебурит.

Это различие в структуре при высокой температуре и создает существенное различие в технологических приемах обработки сплавов. Стали подвергают ковке, прокатке и другим видам обработки давлением, а чугуны применяют как литейный материал.

Диаграмма железо – цементит называется равновесной, т.к. получена при медленном охлаждении, обеспечивающем условия для диффузионных превращений. Если вести очень медленное охлаждение, то вместо первичного цементита при более высокой температуре из жидкости выделяется графит – Γ_1 . Выше линии ECF образуется графитная (не цементитная) эвтектика $A + \Gamma_{эвт}$.

Из аустенита будет выделяться графит вторичный, выше линии PSK образуется графитный эвтектоид. Таким образом, будет получена диаграмма Fe – C.

Диаграмма имеет большое теоретическое и практическое значение. Теория термообработки опирается на критические точки (точки Чернова), которые имеют особые обозначения.

$A_0 = 210 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – граница ферромагнитности Fe_3C ,

$A_1 = 727 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – линия PSK,

$A_2 = 768 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – точка Кюри, граница ферромагнитности железа,

A_3 – граница α - γ превращений (GS),

$A_4 = 1392 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – точка N, на упрощенной диаграмме не показана,

A_{cm} – граница цементитного превращения (ES).

При нагреве к букве A добавляют индекс *c* (например A_{c3}), при охлаждении сплава индекс *r* (A_{r1}).

Лекция 4. Производство чугуна и стали. Производство цветных металлов

1. Материалы для производства металлов.
2. Производство чугуна.
3. Производство и разливка стали.
4. Получение цветных металлов.

4.1. Материалы для производства металлов

К исходным материалам для производства металлов относят *руды, флюсы и топливо*.

Руды – горные породы, содержащие химические соединения металлов (оксиды, силикаты, карбонаты), а также примесную пустую породу.

В зависимости от содержания добываемого материала бывают *богатые и бедные* руды. Для разных материалов градация на бедные и богатые руды осуществляется по-разному, например, для железа руда считается богатой, если она содержит металла от 45-50% и более, для меди 5% и более, для молибдена – от 0,02% . Бедные руды обогащают, удаляя пустую породу, получают *концентрат* (содержащий более 60% металла).

Флюсы – материал, загружаемый в плавильную печь для получения *шлака* – легкоплавкого соединения с пустой породой и золой топлива. Шлак не только позволяет удалить пустой материал при плавке, но и защищает металл от печных газов и воздуха. За счет изменения состава, шлаки позволяют получать металл требуемого химического состава.

В условиях высоких температур шлаки в плавильной печи могут взаимодействовать с футеровкой печи (кладкой внутренних пространств печи). Футеровка может быть кислой, основной и нейтральной. Поэтому при плавке в печах с кислой футеровкой используют кислые флюсы (кварцевый песок, состоящий из SiO_2), а в печах с основной футеровкой – основные флюсы (известняк CaCO_3).

Топливо: кокс, мазут, природный и колошниковый (доменный) газ.

Требования, предъявляемые к основному твердому топливу:

- механическая прочность, чтобы выдерживать массу шихтовых материалов;
- кусковатость (размер кусков 25 – 60 мм);
- зольность (в коксе 8-12% золы);
- содержание серы (в коксе 0,5 – 1,8%).

Кокс – продукт сухой перегонки каменного угля определенных сортов. Для коксования используют смесь углей, которая размягчается при высокой температуре ($T = 1000^\circ\text{C}$ без доступа воздуха) с выделением газов, затем спекается в пористую массу, которая потом растрескивается и распадается на куски.

Огнеупорные материалы применяют для покрытия внутренних поверхностей металлургических печей, разливочных ковшей, дымовых труб и т.д.

Эти материалы должны выдерживать резкие перепады температур, механические нагрузки при высоких температурах и химическое воздействие шлака

и печных газов. Огнеупорные материалы применяют в виде кирпичей, порошков и растворов как заполнителей швов при кладке печей.

По химическому составу огнеупорные материалы подразделяются на *кислые, основные и нейтральные*.

К кислым огнеупорным материалам относят кварцевый песок, в котором содержится не менее 95% кремнезема SiO_2 (кварц). Он служит для изготовления динасового кирпича, огнеупорность которого равна 1690-1720 °С.

К основным материалам относят магнезит и магнезитовый порошок.

Магнезитовый порошок содержит 80 – 85% MgO , из него изготавливают магнезитовый кирпич, огнеупорность которого больше 2000 °С, однако он очень дорогой и мало термостоек. Магнезит, содержащий 35% MgO и 50% CaO (известь), служит для изготовления доломитового кирпича, огнеупорность которого 1800 – 1900 °С.

К нейтральным огнеупорным материалам относят каолинит и графит.

Из каолинита, содержащего 30 – 40% Al_2O_3 , 50 – 60% SiO_2 , изготавливают шамотный кирпич, огнеупорность которого 1580 – 1730 °С. Шамотный кирпич самый дешевый огнеупор, применяется для футеровки доменных печей, воздухонагревателей, ковшей и т.д. Углеродистый кирпич и блоки, содержащие до 92% углерода, применяют для кладки лещади домны, электролизных ванн, тиглей.

Подготовка материала к плавке.

Основная масса руды (примерно 95%) проходит стадию предварительной подготовки к плавке, включающую в себя дробление, сортировку, обогащение и окускование.

Сначала руду дробят на конусных и щековых дробилках, а после этого сортируют. Пригодными для плавки считают куски размером 40 – 100 мм. Основным методом обогащения руд является метод магнитной сепарации, сущность которого заключается в том, что в магнитном поле происходит отделение магнитной части руды (содержащей железо) от немагнитной.

Слишком мелкая руда – довольно плотный материал, препятствующий движению газов, что затрудняет плавку. Поэтому проводится окускование мелкой породы. Различают два способа окускования: *агломерация* и *окатывание*.

Агломерация заключается в спекании шихты, состоящей из железной руды (40 – 45%), известняка (15 – 20%) и мелкого кокса (4 – 6 %). Спекают руду на агломерационных машинах при температуре 1300 – 1500 °С. В процессе спекания удаляются примеси (сера, мышьяк); происходит офлюсовывание руды, в результате получается пористый кусковой материал – *агломерат*.

Окатывание применяется для обработки тонко измельченных концентратов. Смесь тонко измельченных концентратов, флюса, топлива увлажняется и обрабатывается во вращающихся барабанах. Получаются шарики-окатыши диаметром 20 – 30 мм. Окатыши сушат при температуре 200 – 400 °С и обжигают при температурах 1200 – 1350 °С, поэтому они становятся прочными и пористыми.

4.2. Производство чугуна

Чугун выплавляют в печах шахтного типа – в доменных печах. Сущность процесса заключается в восстановлении оксидов железа, составляющих руду оксидом углерода, водородом, твердым углеродом, выделяющимися при сгорании топлива в печи.

Доменная печь и ее работа.

Современные доменные печи (рис.1) имеют общую высоту до 80 м, полезный объем до 5600 м³. Рабочее пространство печи состоит из колошника, шахты, распара, заплечиков и горна. Материалы подаются к печи двумя скиповыми подъемниками с опрокидывающимися ковшами, доставляющими агломерат, кокс и флюс в определенном соотношении (шихту), к засыпному устройству (порция шихты называется колошей). Засыпное устройство состоит из двух попеременно опускающихся конусов. Для равномерного распределения материала на колошнике печи малый конус с цилиндром после каждой засыпки поворачивается на определенный угол.

Доменные печи, как и все шахтные печи, работают по принципу противотока. Сверху опускаются шихтовые материалы, а снизу им навстречу движутся газы, образующиеся в процессе горения топлива. Расширяющаяся книзу коническая шахта облегчает опускание шихты и равномерно распределяет поток газов по сечению печи.

Самая широкая (цилиндрическая) часть доменной печи – распар. Здесь происходит плавление пустой породы и флюсов с образованием шлака, которое заканчивается в заплечиках, имеющих форму сужающегося книзу усеченного конуса. Нижнее основание заплечиков имеет меньший диаметр, поскольку сокращается объема материалов вследствие их плавления.

Расположенный ниже заплечиков горн имеет цилиндрическую форму. В верхней части горна располагаются фурменные отверстия, через которые в печь подается горячий, обогащенный кислородом воздух при температуре 900 – 1200 °С. Здесь происходит горение кокса, а в нижней части горна на лещади скапливаются жидкие чугун и шлак, которые периодически выпускаются через специальные отверстия – летки. Причем чугунная летка расположена на 0,5м выше лещади, а шлаковая летка – на 1,5м. Постоянно остающийся на лещади полуметровый слой жидкого чугуна предохраняет ее от разрушения. Чугунная летка между выпусками чугуна забивается огнеупорной массой.

Протекающие в печи физико-химические процессы очень сложны и многообразны. Условно можно выделить следующие этапы общего процесса выплавки чугуна:

- горение углерода топлива,
- разложение компонентов шихты,
- восстановление железа (Fe) и других металлов из оксидов,
- науглероживание железа,
- шлакообразование

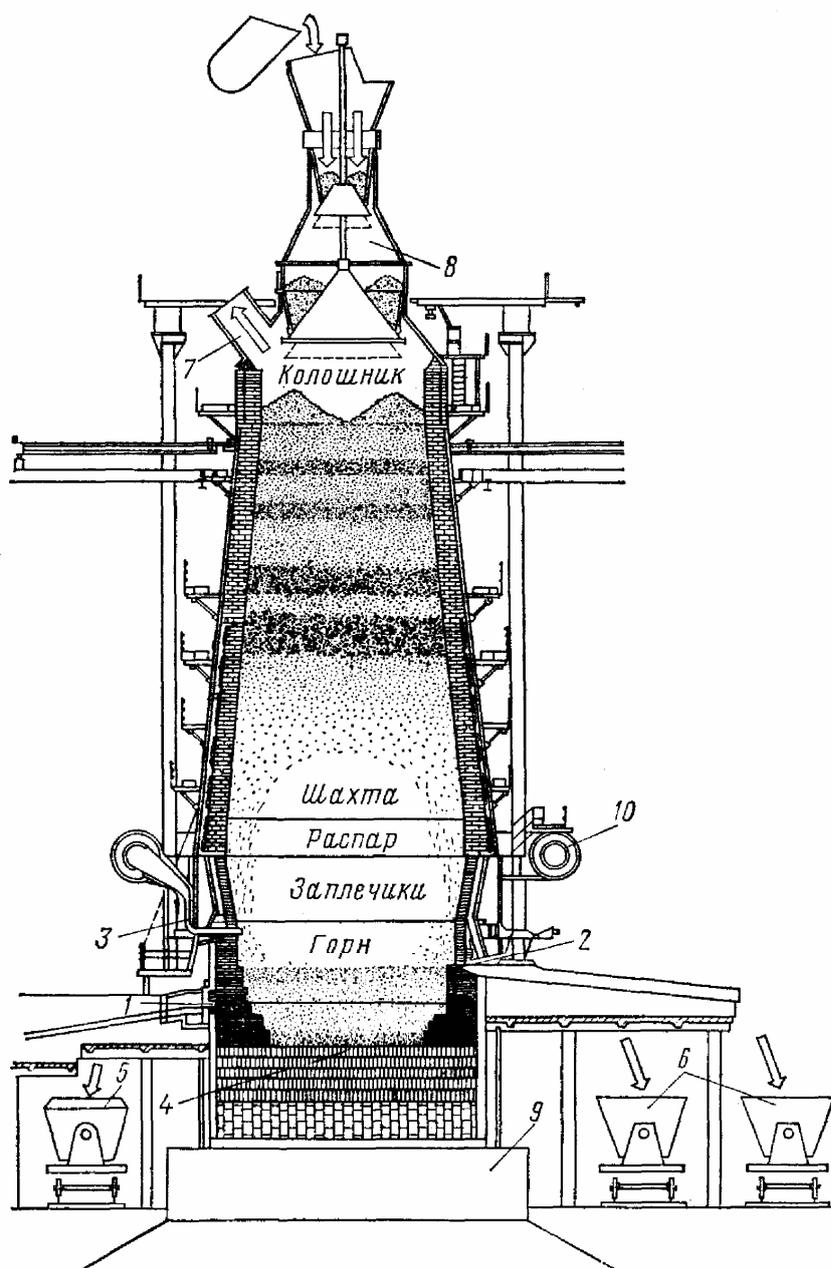


Рис. 1. Схема доменной печи

Горение топлива.

Вблизи фурм углерод кокса, взаимодействуя с кислородом воздуха, нагретого до $T = 900 - 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, сгорает с выделением тепла: $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + Q$. При высоких температурах в присутствии углерода кокса углекислый газ восстанавливается до оксида углерода: с поглощением тепла $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO} - Q$.

В результате горения кокса температура над фурмами повышается до $1800 - 2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и образуется газовый поток CO , CO_2 и др. газов (колошниковый газ), который поднимаясь вверх отдает теплоту шихте, а сам охлаждаясь до $300 - 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ у колошника, отводится, очищается и идет в воздухонагреватели.

Восстановление оксидов железа в доменной печи.

Восстановление железа из руды происходит по мере продвижения шихты вниз и повышения температуры - в несколько стадий, от высшего оксида к низшему: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$.

Главную роль в восстановлении оксидов железа играет оксид углерода.

При температуре ≈ 570 °С оксид железа восстанавливается оксидом углерода и твердым углеродом кокса:



При температуре $T = 750 - 900$ °С оксид железа восстанавливается интенсивнее (увеличивается концентрация СО в газах и повышается температура):



Из руды, находящейся в нижней зоне шахты образуется твердое губчатое железо. Шихта опускается и достигает зоны, где $T = 1000 - 1100$ °С. При этом твердое железо, взаимодействуя с оксидом углерода, коксом, сажистым углеродом, интенсивно науглероживается (т.к. твердое железо при высоких температурах растворяет углерод – образуется аустенит Fe(C)). Кроме того, образуется цементит, который хорошо растворяется в γ - железе:



Насыщенное углеродом железо имеет более низкую температуру плавления и на уровне распара – заплечиков оно расплавляется. Протекая по кускам кокса, железоуглеродистый сплав еще больше насыщается углеродом (до 4 – 4,4%), а также марганцем, кремнием, фосфором и др. веществами, которые восстанавливаются из руды; серой, содержащейся в коксе.

Таким образом, в результате восстановления оксидов железа, части оксидов марганца и кремния, фосфатов и сернистых соединений, растворения в железе С, Mn, Si, P, S, образуется **чугун**.

В результате сплавления оксидов пустой породы, флюсов и золы в нижней части печи образуется шлак. Шлак образуется постепенно, его состав по мере стекания меняется. В горне он скапливается на поверхности чугуна и выпускается через летки каждые час-полтора. Чугун выпускается через 3 – 4 часа, в более мощных печах выпуск чугуна через два часа, а в некоторых практически непрерывно.

Продукты доменной плавки: передельный чугун, литейный чугун, ферросплавы, побочные продукты.

Передельный чугун – исходный продукт для получения стали. На долю передельного чугуна приходится 80% всего выплавляемого чугуна.

Литейный чугун используется для переплавки на машиностроительных заводах в фасонные отливки (поступает в виде отливок-чушек по 45 – 50 кг).

Ферросплавы – сплавы железа с кремнием, марганцем и др. металлами, применяемые для раскисления и легирования стали: ферросилиций содержит 9 – 13% Si и до 3% Mn; ферромарганец – 70-75% Mn, до 2% Si; зеркальный чугун – 10-25% Mn, до 2% Si.

Побочные продукты: шлаки, колошниковый газ. Из шлака изготавливают шлаковату, шлакоблоки, цемент, щебень и др. Колошниковый газ служит топливом для нагрева воздуха в кауперах – воздухонагревателях.

4.3. Производство и разливка стали

Исходным материалом для производства стали является передельный чугун и стальной лом (скрап). Сущность металлургического передела чугуна в сталь – снижение содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы при плавке.

Например, состав передельного чугуна и низкоуглеродистой стали следующие, %

Материал	C	Si	Mn	P	S
Передельный чугун	4,2	1,0	до 1,75	0,2	до 0,07
Сталь низкоуглеродистая	0,2	0,15	0,5	0,05	0,055

Переплавка чугуна в сталь происходит в два этапа:

I этап – окислительный, II – раскислительный.

В процессе плавки кислород атмосферы или дутья окисляет примеси. Кремний (Si), марганец (Mn), фосфор (P), сера (S) образуют оксиды и другие соединения (SiO_2 , MnO, CaS и т.п.), которые нерастворимы или малорастворимы в металле и частично удаляются в шлак. Углерод взаимодействуя с кислородом образует оксид углерода: $C + O \rightarrow CO$, который удаляется в атмосферу печи.

Полностью окислить примеси не удастся – с их уменьшением начинает окисляться железо: $Fe + O \rightarrow FeO$. Оксиды железа, растворяясь в железе, обогащают его кислородом. Сталь, содержащая кислород, непригодна для обработки давлением (ковки, прокатки), так как при деформации в горячем состоянии в ней образуются трещины.

Поэтому для уменьшения содержания кислорода в стали предусмотрен II этап переплавки – **раскисление**. При этом в сталь вводят элементы с большим сродством к кислороду, чем у железа: ферросилиций, ферромарганец, а также алюминий. Они образуют, взаимодействуя с кислородом стали, нерастворимые оксиды, частично всплывающие в шлак.

Основными способами производства стали являются кислородно-конверторный, мартеновский и в электропечах.

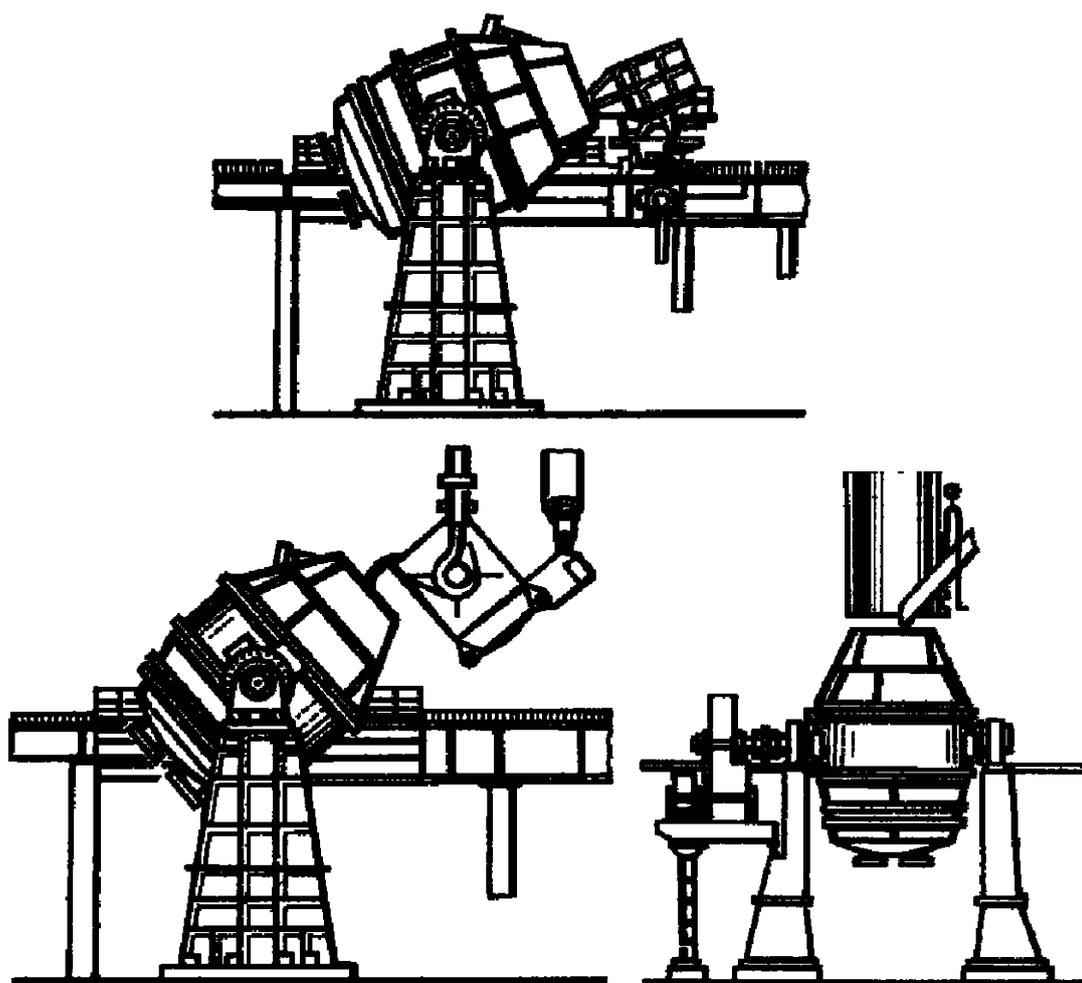


Рис. 2. Кислородный конвертер и схема загрузки

Кислородно-конверторный процесс – выплавка стали из жидкого чугуна в конвертере с основной футеровкой и продувкой кислородом через фурму.

Конвертор – сосуд грушевидной формы на 130 – 350 т жидкого металла, который может поворачиваться вокруг горизонтальной оси на 360° . Кислород подается в конвертер под давлением 0,9 – 1,4 МПа (рис.2).

Процесс протекает следующим образом. Конвертор наклоняют и загружают скрапом, заливают из ковша чугун при температуре $1250 - 1400^{\circ}\text{C}$, ставят конвертор вертикально, опускают фурму, и подавая кислород, начинают продувку. Одновременно с этим загружают шлакообразующие материалы (известь (CaO), железную руду, боксит). Струи кислорода, проникая в металл, вызывают его перемешивание со шлаком, циркуляцию. Примеси чугуна интенсивно окисляются. В зоне под фурмой температура поднимается до 2400°C .

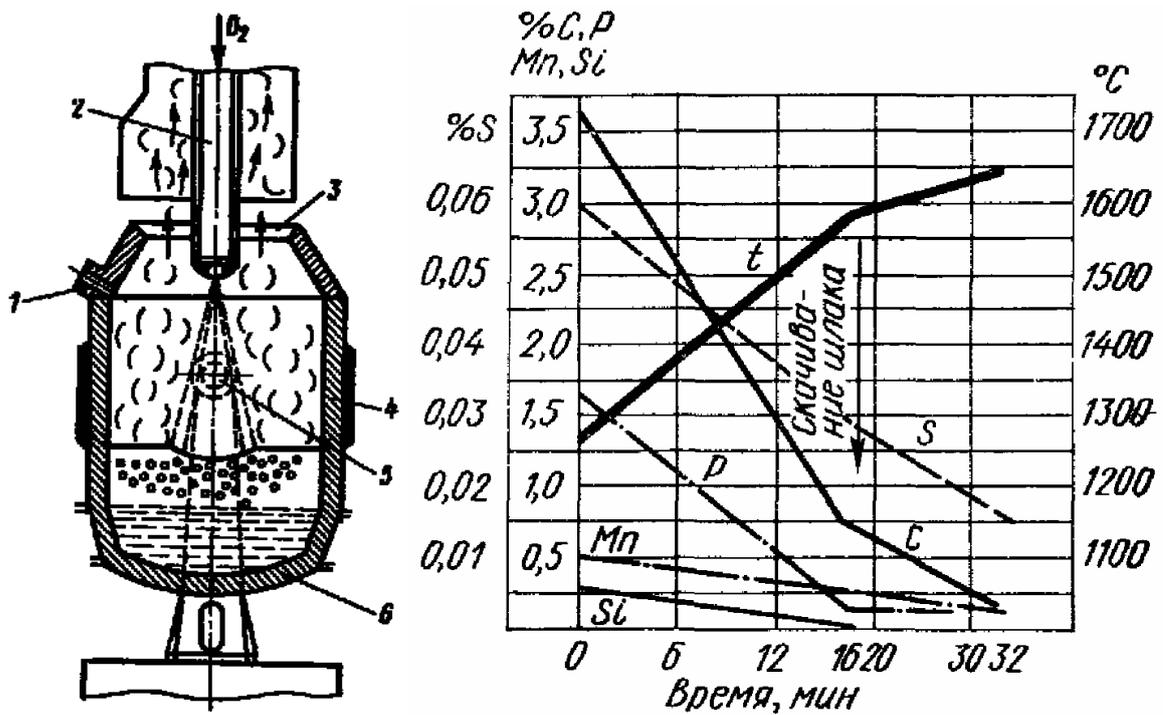


Рис. 3. Диаграмма выгорания примесей

По закону действующих масс в первую очередь окисляется тот металл, которого больше в расплаве, т.е. железо: $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO}$. Составляющие примеси чугуна окисляются газообразным кислородом, растворяющимся в металле и шлаке при продувке: $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$, $2\text{Mn} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{MnO}$, $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$.

Присутствие шлаков с большим содержанием извести (CaO) и закиси железа (FeO) при интенсивном перемешивании металла и шлака обеспечивает удаление из металла фосфора: $2\text{P} + 5\text{FeO} + 4\text{CaO} \rightarrow (\text{CaO})_4 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 + 5\text{Fe}$, а также серы: $\text{FeS} + \text{CaO} \rightarrow \text{CaS} + \text{FeO}$.

Все эти реакции протекают в конверторе с кислородным дутьем одновременно. Скорость протекания этих процессов можно представить, изучив диаграмму выгорания примесей (рис. 3).

После 15-16 минутной продувки поднимают фурму, наклоняют конвертор, берут пробу металла на экспресс-анализ и скачивают большую часть шлака; это занимает 7 – 8 минут; за это время экспресс-анализом определяются основные параметры стали и конвертор вновь ставят в вертикальное положение, опускают фурму и вторично продувают кислородом несколько минут в зависимости от данных анализа и заданной марки стали.

Получение стали завершается ее раскислением. В качестве раскислителей используют ферромарганец, ферросилиций и алюминий, часть которых иногда вводят за несколько минут до разливки. Завершается раскисление обычно в разливочном ковше.

Мартеновский процесс

Французы Э. Мартен и его сын Пьер Мартен в 1865 г. разработали мартеновский процесс выплавки стали, который был основным способом получения стали в России в период 1910 – 1970 гг.

Мартеновская печь – пламенная отражательная регенеративная печь (рис.4). В нее подается воздух, который смешивается с топливом (природный газ или мазут); температура факела пламени достигает 2000 °С. Продукты горения и тепло отражаются от свода и равномерно нагревают ванну. Футеровка может быть основной или кислой.

Выпускное отверстие, расположенное в задней стенке, перед плавкой забивают огнеупорной глиной. В печь загружают шихту (холодные материалы: скрап, руду, известь). Их подают в мурдах – стальных ящиках с помощью завалочных машин через завалочные окна. Заслонки над окнами опускают и вводят в печь газ и воздух для прогрева шихты. После этого из миксера (хранилища жидкого чугуна) в ковшах подвозят чугун и с помощью мостового крана по специальному желобу заливают его в печь.

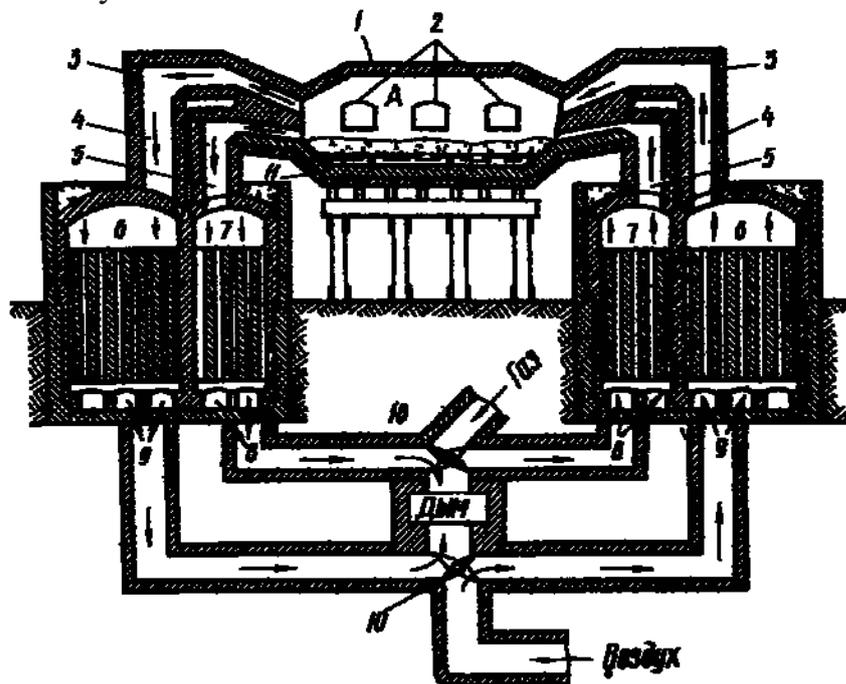
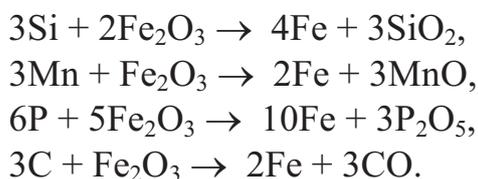


Рис. 4 Схема мартеновской печи

В зависимости от соотношения материала в шихте различают:

- скрап-рудный процесс – жидкого чугуна 55-75%, остальное (меньше половины) скрап, руда;
- скрап-процесс – основная часть шихты скрап (больше половины), перелдального чугуна 25 – 45%.

Скрап-процесс применяется на металлургических заводах, где нет доменных печей. Шире применяется скрап-рудный процесс в основной печи. Флюсом служит (в обоих процессах) известняк CaCO_3 (8 – 12% от массы металла). В процессе плавки примеси чугуна окисляются за счет оксидов железа руды и скрапа:



Сера удаляется в результате взаимодействия сернистого железа с известью
 $\text{FeS} + \text{CaO} \rightarrow \text{FeO} + \text{CaS}$.

Оксиды (SiO_2 , MnO , P_2O_5 , сульфид CaS , а также CaO из извести) образуют шлак.

Для интенсификации процесса плавления и окисления ванну продувают кислородом – это в 2-3 раза сокращает длительность процесса, уменьшает расход топлива и железной руды.

При продувке кислородом или при подаче руды наступает период кипения.

Углерод, содержащийся в металле, интенсивно соединяется с кислородом, образуя оксид углерода ($2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$). Кроме того, оксид железа, вступая в реакцию с углеродом, отдает свой кислород ($\text{C} + \text{FeO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$), также образуя оксид углерода. При отключенной подаче воздуха и топлива, давление в ванне падает и CO выделяясь, вызывает кипение расплава.

Эта реакция является главной в мартеновской плавке, так как при этом обезуглероживается металл, из него частично удаляются газы и неметаллические включения, увеличивается поверхность соприкосновения со шлаком, что облегчает удаление фосфора и серы.

После расплавления шихты регулярно отбирают пробы для анализа состава металла и шлака. При достижении заданного содержания углерода и минимального содержания фосфора и серы процесс кипения прекращают. Далее приступают к раскислению металла: в печи – ферромарганцем, ферросилицием, алюминием, в ковше – алюминием и ферросилицием.

Производство стали в электропечах

Преимущества: - быстрый нагрев и поддержание заданной температуры;
- атмосфера может быть нейтральной, окислительной или восстановительной;
- возможно создание вакуума.

Это позволяет получить сталь и сплавы высокого качества, специальные стали (высоколегированные, инструментальные, нержавеющие).

Для выплавки стали применяют дуговые и индукционные электрические печи (рис. 5).

Дуговые печи обеспечивают использование тепла электрической дуги, образующейся между графитовыми электродами и металлической ванной. Дуговые печи для плавки стали имеют вместимость 0,5 – 400 т. При помощи специального механизма печь можно наклонять под углом 40 – 45° в сторону выпускного отверстия для слива металла.

После загрузки шихтовых материалов электроды опускают и подключают к источнику тока. Используется трехфазный ток напряжением 180 – 600В и силой тока 1 – 10кА. Между шихтой и электродами образуется дуга с температурой до 3000 °С. Происходит плавление металла и окисление примесей, затем проводят комбинированное раскисление.

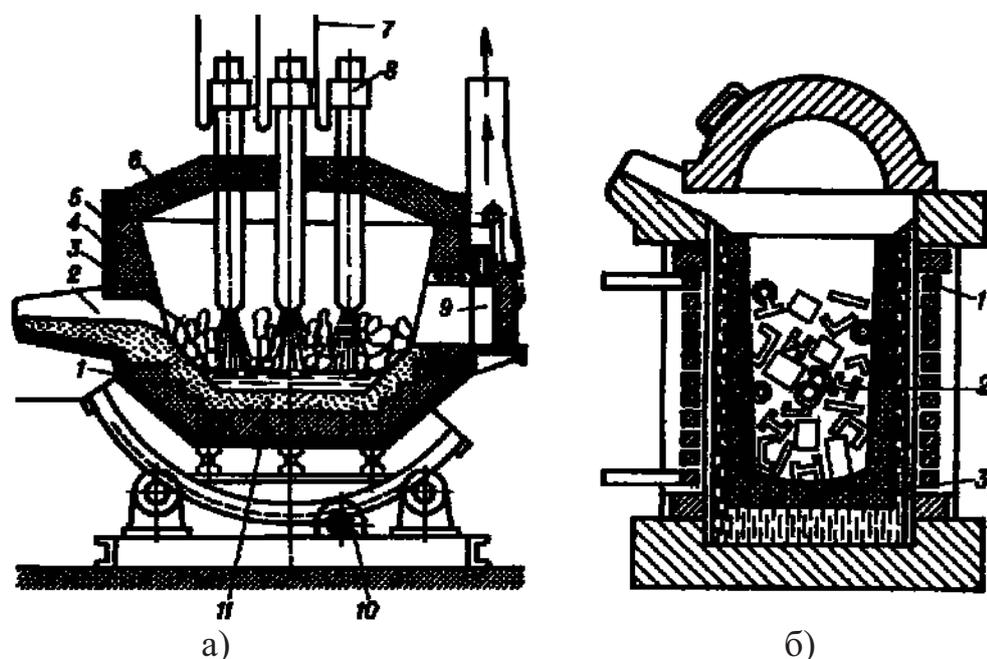


Рис. 5. Электropечи: а – дуговая; б – индукционная

Индукционные печи представляют собой тигель из огнеупорного материала, окруженный медной трубчатой спиралью (индуктором), через которую пропускают переменный ток высокой частоты (500 – 2000 кГц), образующий магнитный поток, который в металлической шихте наводит мощные вихревые токи. Вихревые токи обеспечивают нагрев и плавление металла. Кроме того, под действием электромагнитных сил металл в тигле циркулирует, что ускоряет химические реакции и способствует получению однородного металла. Вместимость индукционных печей до 5 т, в редких случаях 25-30т.

Также используется плавка в вакууме, позволяющая получать сплавы с минимальным содержанием газов и легирование любыми элементами.

Разливка стали

Выплавленную в печи сталь выпускают в сталеразливочный ковш – стальной сварной кожух, выложенный огнеупорным материалом. В дне ковша имеется керамический стакан с выпускным отверстием, которое закрыто пробкой. Объем ковша равен объему плавильной печи (5 – 250 т, бывают до 450 т).

Сталь разливают либо в изложницы, либо на установке непрерывной разливки стали (УНРС).

Изложницы – чугунные формы для получения слитков различного сечения. Для прокатки 10 – 12 т (иногда до 25т), для поковок 250 – 300т. Легированные стали иногда разливают в слитки массой в несколько сот кг (500 кг – 7т).

Для разливки спокойной стали применяют изложницы расширяющиеся кверху. Для разливки кипящей стали – расширяющиеся книзу.

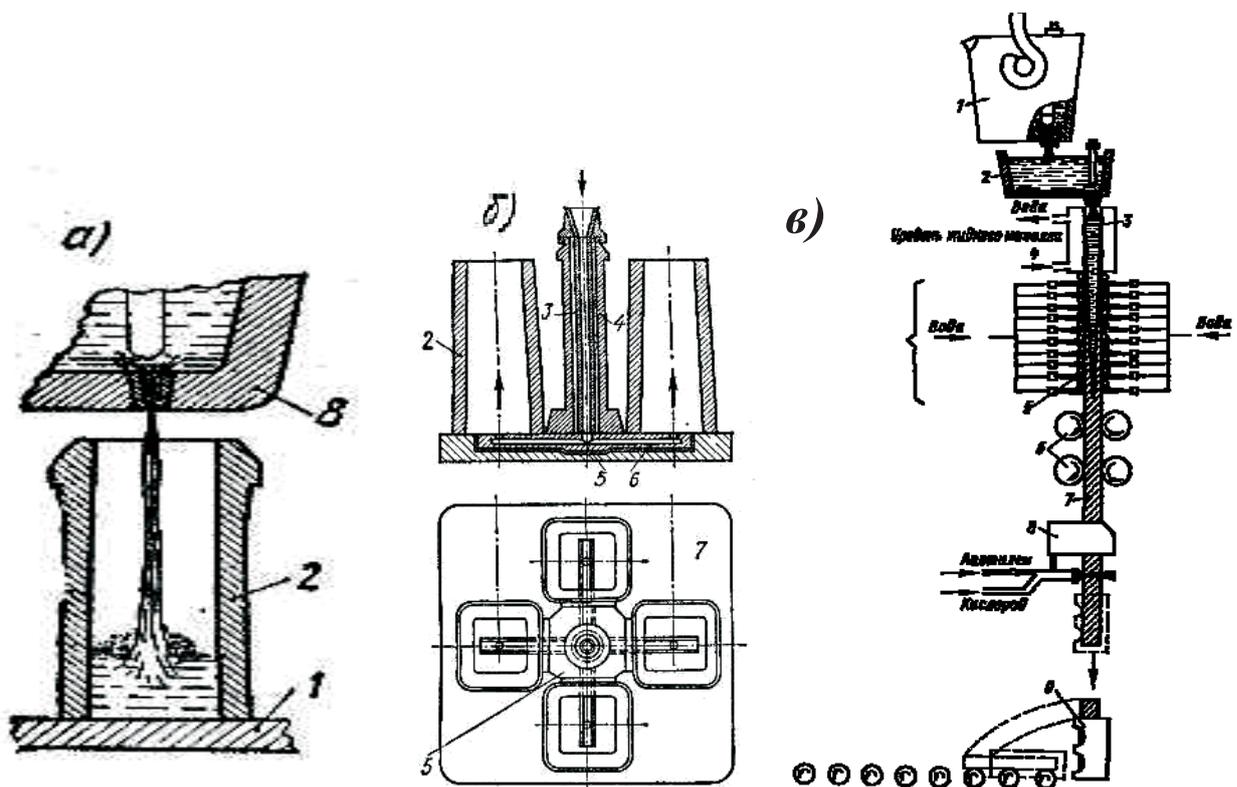


Рис. 6. Схемы разливки стали:
 а – верхней; б – сифонной; в – непрерывной.

Непрерывная разливка стали на УНРС

Сталь из разливочного ковша через промежуточный ковш непрерывной и равномерной струей заливается в кристаллизатор, стенки которого интенсивно охлаждаются проточной водой. Благодаря этому сталь быстро формирует прочные и плотные стенки слитка. Из кристаллизатора слиток непрерывно вытягивается валками с определенной скоростью, соответствующей скорости кристаллизации слитка. Ниже кристаллизатора до выхода из валков слиток подвергается вторичному охлаждению брызгами, при этом заканчивается его затверждение. После выхода из валков от непрерывно опускающегося слитка кислородно-газовой горелкой отрезают куски необходимой длины и отвозят в нужном направлении.

Лекция 5. Углеродистые стали и чугуны

- 5.1. Состав углеродистых сталей.
- 5.2. Влияние углерода и примесей на структуру и свойства стали.
- 5.3. Классификация и маркировка сталей.
- 5.4. Состав, структура и свойства чугунов.
- 5.5. Маркировка чугунов.

5.1. Состав углеродистых сталей

Сталь – основная продукция черной металлургии, причем приблизительно 90% изготавливается углеродистой стали, а 10% легированной.

Углеродистая сталь – сложный по химическому составу сплав, в котором кроме железа (97,0 – 99,5%), имеется много элементов, наличие которых либо обусловлено технологическими особенностями производства (специально вводят марганец и кремний), либо невозможностью полного удаления их из металла (сера, фосфор, кислород, азот, водород), а также случайными примесями (хром, никель, медь и др.). Сталь разных способов выплавки (мартеновский, конвертерный и др.) главным образом различают по содержанию этих примесей.

Итак, *примесями* являются элементы сплавов, присутствующие в малых дозах и несущественно влияющие на их свойства. Если же элементы содержатся в количестве достаточном для изменения свойств сплавов их называют *компонентами*.

Таким образом, по ряду причин в сталях обязательно содержаться примеси – это неизбежно. Однако один элемент в стал вводят специально – это **углерод**. Углерод сильно влияет на свойства стали даже при малых дозах. При небольших количествах остальных элементов (примесей) углерод является главным компонентом, который определяет свойства железоуглеродистых сплавов, поэтому эти сплавы, содержащие менее 2% углерода называют **углеродистыми сталями**.

В большинстве случаев от изделия требуется определенная **жесткость**. Конструктор выбирает площадь и форму поперечного сечения детали. При этом обычно получается, что действующие в детали напряжения значительно меньше предела текучести стали. В этом случае прочностные свойства металла достаточны в «сыром» виде, металл не подвергается специальной обработке.

В случае, когда прочность стали оказывается недостаточной ее подвергают термообработке. Но тогда к стали предъявляются повышенные требования (узкий предел по содержанию углерода и др.). Такая сталь называется сталью повышенного качества (качественная). Кроме того, различают стали высококачественные и особо высококачественные.

5.2. Влияние углерода и примесей на структуру и свойства стали

С изменением содержания углерода изменяется структура стали. Сталь, содержащая 0,8% углерода состоит из перлита; доэвтектоидная сталь, содержащая меньше 0,8% углерода, имеет перлит и феррит (Ф + П); заэвтектоидная сталь (> 0,8% углерода) содержит перлит и вторичный цементит (П + Ц_{II}).

Перлит и тем более цементит придают твердость, прочность, но и хрупкость. По закону Н.С. Курнакова, например, твердость линейно зависит от содержания углерода; относительное удлинение и ударная вязкость снижаются; предел прочности сначала растет, а затем уменьшается т.к. повышается хрупкость (рис. 1). Приведенные показатели механических свойств действительны для горячекатаных изделий без термообработки, для более грубой литой структуры показатели ниже (главным образом, пластичность).

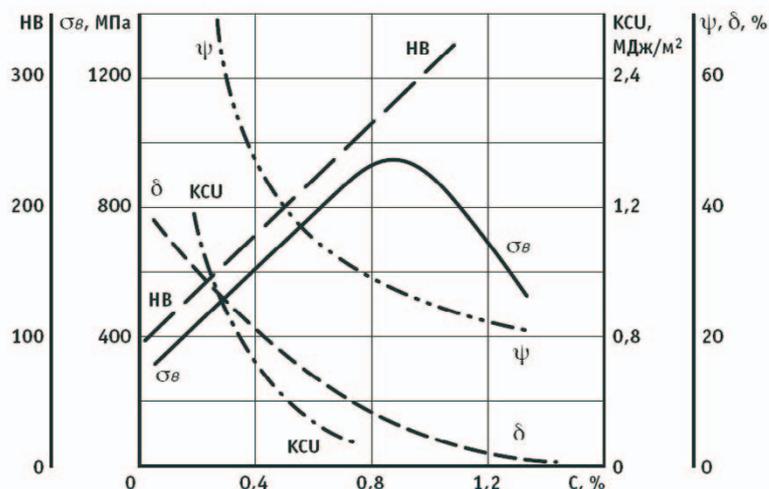


Рис. 1. Влияние содержания углерода на механические свойства сталей

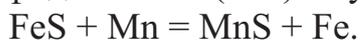
Влияние постоянных примесей на свойства стали.

Постоянные примеси (марганец, кремний, фосфор, сера), а также газы (водород, азот, кислород) обязательно присутствуют в технических сортах стали.

Обычно содержание этих элементов ограничивается следующими значениями: $Mn \leq 0,8\%$, $Si \leq 0,5\%$, $P \leq 0,05\%$, $S \leq 0,05\%$. При большем их содержании сталь относят к сорту легированных, а полезные элементы вводят специально.

Рассмотрим влияние примесей.

Марганец – вводят для раскисления стали (удаления закиси железа). Марганец уменьшает вредное влияние серы, переводя легкоплавкие соединения сульфида железа (FeS) в тугоплавкие соединения сульфида марганца (MnS):



Марганец растворяется в феррите и цементите (он образует раствор замещения $Fe_{\alpha}(Mn)$ и химическое соединение Mn_3C), что в результате повышает прочность стали.

Кремний – как и марганец является раскислителем стали. Влияние малых долей кремния аналогично влиянию марганца. Кремний структурно не обнаруживается, так как полностью растворяется в феррите ($Fe_{\alpha}(Si)$). Оксид кремния SiO_2 удаляется со шлаками, частично остается (не успевает всплыть), образуя силикатные включения.

Фосфор – вредная примесь. Фосфор переходит в сталь из железной руды, топлива и флюсов. Различные способы получения стали обеспечивают разный

уровень содержания фосфора в ней: от 0,02% (электропечи) до 0,12%, как в исходном чугуна (бессемеровский способ).

Фосфор может растворяться в феррите до 1,2%, но при этом резко повышается температура перехода в хрупкое состояние – *хладноломкость* стали. Повышение концентрации фосфора на 0,01% поднимает порог хладноломкости на 25 °С. В отдельных случаях фосфор желателен, так как облегчает обрабатываемость стали режущим инструментом.

Сера – вредная примесь. Сера, как и фосфор, попадает из руд, из печных газов. Максимальное содержание серы в бессемеровской стали – 0,06%. В сталях обыкновенного качества серы содержится до 0,05%, в высококачественных сталях – до 0,025%. Синтетические шлаки позволяют снизить содержание серы до 0,005%.

Сера нерастворима в железе и образует с ним сульфид, входящий в легкоплавкую эвтектику ($T_{пл} = 988\text{ }^{\circ}\text{C}$). Эта эвтектика (Fe+FeS), затвердевающая при кристаллизации стали в последнюю очередь, располагается по границам зерен железоуглеродистого сплава. При нагреве от 800 °С и выше (в области температур красного каления) сульфид железа, ослабляя межзеренные связи, охрупчивает сталь и вызывает *красноломкость*. Такая сталь не обрабатывается давлением – получают надрывы и трещины.

Введение марганца приводит к образованию сульфида марганца MnS, который плавится при температуре 1620 °С, а при температуре 800 – 1200 °С он пластичен и при обработке давлением вытягивается в продолговатые линзы.

Газы. Водород, азот и кислород содержатся в стали в небольших количествах, зависящих от способа производства. Они могут присутствовать:

- в свободном состоянии,
- в α -твердом растворе (внедрения),
- в соединениях (кислород в оксидах, азот в нитридах).

Водород может находиться в твердом растворе .а также скапливаться в порах и на дислокациях.

Водород охрупчивает сталь; повышенное его содержание приводит к образованию флокенов – мелких внутренних надрывов, образующихся при охлаждении стали, когда растворимость водорода уменьшается и он выделяется из раствора.

Кислород и *азот* так же как и водород снижают пластичность стали.

Оксиды SiO₂, MnO, FeO и др. в процессе деформации металла дробятся и располагаются в виде разорванных строчек и пятен (рис 2). Сульфиды (MnS и др.) – пластичные образования. Они располагаются вдоль направления прокатки в виде вытянутых линз(рис. 3). Наличие такой структуры вызывает сильную анизотропию свойств.

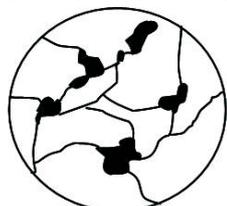


Рис. 2. Оксиды

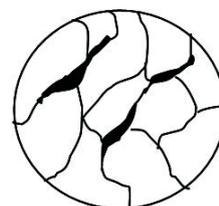


Рис.3. Сульфиды

Неметаллические включения (сульфиды, оксиды, нитриды) являются концентраторами напряжений, снижают пластичность и вязкость металла. Неметаллические включения, сера, газообразные примеси удаляются из металла в процессе переплава.

5.3. Классификация и маркировка сталей

Стали классифицируют по способу производства, содержанию углерода, степени раскисления, качеству, структуре, прочности и назначению.

По способу производства: мартеновские, конверторные и электросталь.

По содержанию углерода: низкоуглеродистые (< 0,25% С), среднеуглеродистые (0,3 – 0,5% С), высокоуглеродистые (до 0,65% С).

По степени раскисления стали бывают: спокойные, полуспокойные и кипящие. Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно без газовой выделению. Кипящие стали раскисляют только марганцем. Они содержат повышенное количество кислорода (в закиси железа FeO), который частично взаимодействуя с углеродом при затвердевании, удаляется в виде CO. Выделение пузырей CO создает эффект кипения стали, откуда такое название.

Слиток из спокойной стали имеет усадочную раковину, расположенную в его верхней части (рис 4). В связи с этим металл значительной части слитка (до 20%) не может быть использован и идет в отход. Зато металл оставшейся части слитка плотный, однородный по химическому составу и обладает высокими механическими свойствами. Слиток из кипящей стали имеет большое количество мелких усадочных раковин и газовых пузырей, рассеянных по всему объему. Кипящие стали дешевые, их применяют для изготовления неответственных изделий.

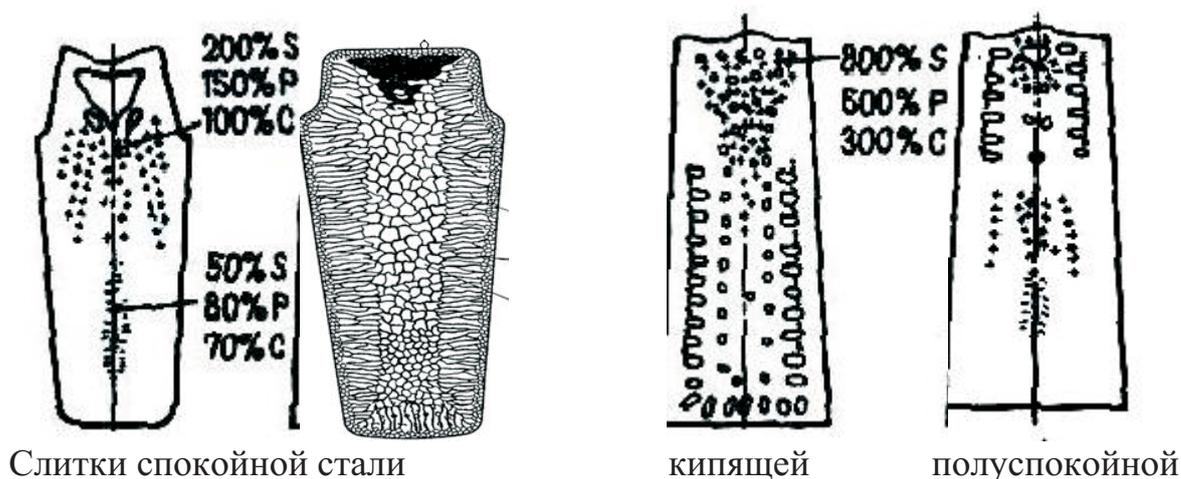


Рис. 4. Слитки сталей различной раскисленности

Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими сталями и раскисляются марганцем и алюминием.

По качеству принято выделять: стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные (легированные).

Таблица 1. Классификация углеродистых сталей по качеству

Группа стали	S, %	P, %
Стали обыкновенного качества	до 0,05	до 0,04
Качественные конструкционные	0,04	0,035
Качественные инструментальные	0,03	0,030
Высококачественные инструментальные	0,02	0,025

Под качеством стали понимают совокупность свойств, определяемых металлургическим процессом ее производства. Качество определяет содержание газов и вредных примесей, влияющих на однородность химического состава, строение и свойства стали, а также ее технологичность. Газы являются скрытыми, количественно трудно определяемыми примесями, поэтому нормы содержания вредных примесей (фосфора и серы) служат основными показателями для разделения сталей по качеству.

По структуре в равновесном состоянии углеродистые стали делятся на доэвтектоидные (структура - $\Phi + \Pi$), эвтектоидные (перлит пластинчатый или зернистый), заэвтектоидные ($\Pi + \text{Ц}_{II}$). Соответствующие микроструктуры представлены на рис. 5.

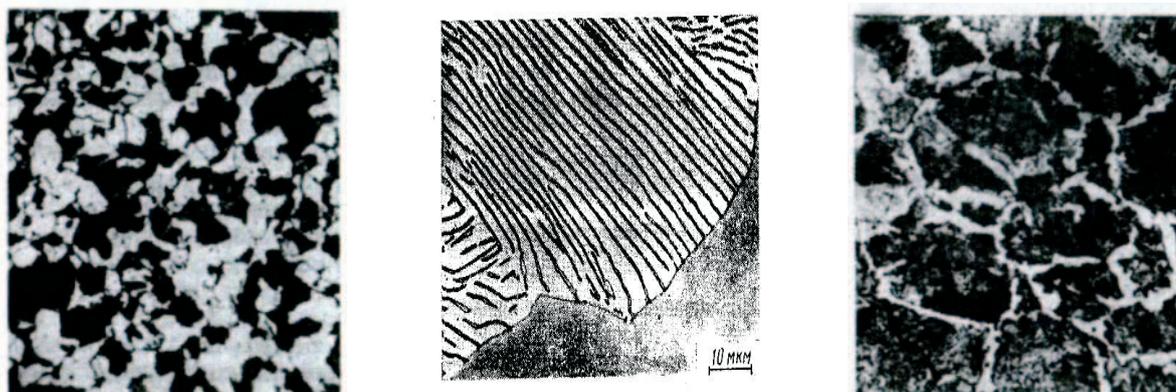


Рис. 5. Доэвтектоидная, эвтектоидная и заэвтектоидная стали

По прочности, оцениваемой временным сопротивлением, стали условно делят на стали нормальной (средней) прочности (до 1000 МПа), повышенной прочности (1000 – 1500 МПа), высокой прочности (более 1500 МПа).

По назначению. Две основные группы: конструкционные и инструментальные.

Углеродистые стали дешевы и удовлетворительно сочетают механические свойства с хорошей обрабатываемостью резанием и давлением (причем по последним показателям превосходят легированные). Однако они хуже выдерживают термообработку – при закалке требуют охлаждения в воде, что вызывает

коробление, деформацию. У них небольшая прокаливаемость (до 12 мм по диаметру).

Сталь углеродистая обыкновенного качества.

Такая сталь выплавляется по нормам массовой технологии, имеет повышенное содержание вредных примесей и газов. Стали обыкновенного качества (ГОСТ 380 – 94) выпускают в виде проката (балки, прутки, листы, уголки, трубы, швеллеры и т.п.), а также поковок.

Стали маркируют сочетанием букв «Ст» и цифрой (от 0 до 6), показывающей номер марки – чем выше номер, тем выше прочность, но ниже пластичность стали.

Степень раскисления обозначается добавлением индексов: в спокойных сталях – «сп», полуспокойных – «пс», кипящих – «кп».

Углеродистые качественные стали.

Эти стали характеризуются более низким, чем у сталей обыкновенного качества, содержанием вредных примесей и неметаллических включений. Они имеют гарантированный химический состав и механические свойства. Служат для изготовления ответственных деталей машин, подвергаемых термообработке.

Марки включают в себя сочетание слова «Сталь» и двузначные числа 05, 08, 10, 15, 20, ..., 60, обозначающие среднее содержание углерода в сотых долях процента (ГОСТ 1050 – 88). Например, сталь 10 содержит в среднем 0,10% С, сталь 45 – 0,45% С и т.п. В конце марки ставят также индексы, указывающие на степень раскисления. Причем спокойные стали маркируют без индекса, полуспокойные и кипящие с индексами соответственно «пс» и «кп». Такая маркировка относится к сталям содержащим не более 0,8% марганца, если марганец содержится в интервале 0,8 – 1,2%, то в конце марки добавляется буква «Г», например, Сталь 60Г.

Сталь углеродистая инструментальная.

По ГОСТ 1435 – 90 различают две группы сталей: качественная и высококачественная. В качественных сталях содержится до 0,028% S, до 0,030% P, в высококачественных - до 0,018% S, до 0,025% P. Маркируется сталь буквой «У», указывающей на то, что сталь углеродистая и цифрой, показывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента. Например, У7, У8 и т.д. Для обозначения высококачественной стали в конце марки ставят букву «А», например, У7А, У8А и т.д.

5.4. Состав, структура и свойства чугунов

Чугуны как и стали являются сплавами системы железо-углерод.

Отличия чугуна от стали:

- по составу: более высокое содержание углерода ($C > 2,14\%$, чаще до 4,5%),
- по технологическим свойствам: лучшие литейные качества, малая способность к пластической деформации (хрупкость),

- по стоимости (дешевле).

Из диаграммы железо-углерод видно, что в сплавах углерод связан в цементит. Однако на практике (детали машин, станков) в большинстве случаев применяется чугун с графитом, а не белый – с цементитом.

Рассмотрим процесс графитизации.

Графит – полиморфная модификация углерода. Кристаллическая структура графита – слоистая с ковалентной связью в слоях и с металлической связью между слоями, поэтому графит электропроводен и непрочен.

Цементит по составу ближе к аустениту, чем к графиту, так как аустенит содержит 2,14% С, цементит 6,67% С, а графит 100% С. Поэтому образование цементита из аустенита, а также из жидкости происходит кинетически легче, т.к. работа образования зародыша, как и необходимые диффузионные изменения, меньше в случае кристаллизации цементита, чем при кристаллизации графита.

С другой стороны, известно, что при нагреве цементит распадается на железо и углерод. Отсюда ясно, что термодинамически графит стабильнее.

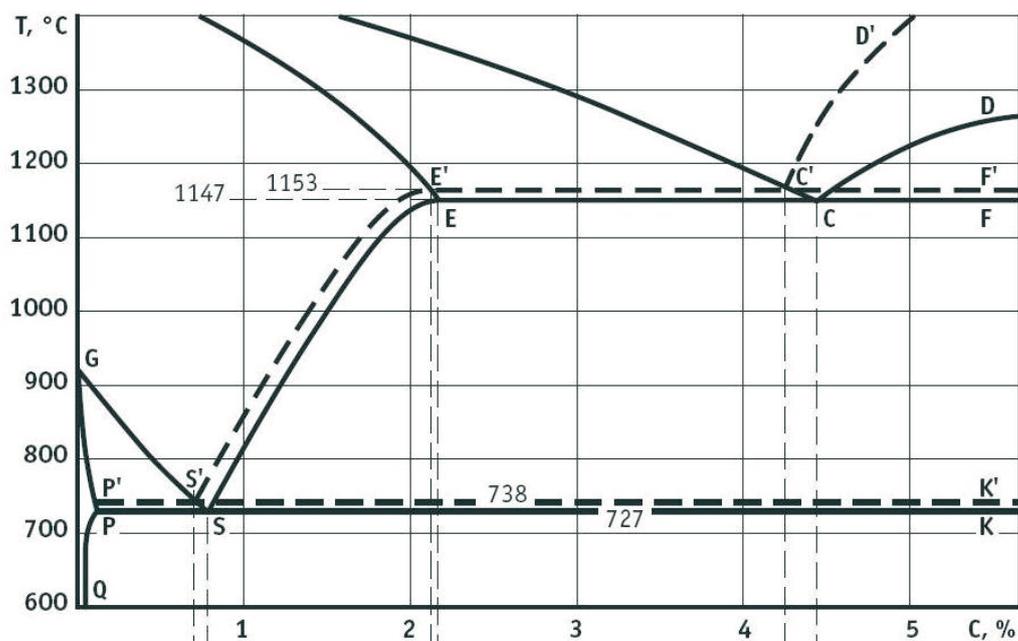


Рис. 6. Диаграммы Fe – Fe₃C и Fe – C

Для образования графита необходимы сильные диффузионные процессы: атомов железа от кристалла графита и атомов углерода к этому кристаллу, поэтому образование графита из жидкости или аустенита – медленно протекающий процесс, для его осуществления требуется малые скорости охлаждения. Однако благодаря наличию примесей в жидкости в реальных условиях процесс графитизации может начаться быстрее. Для облегчения графитизации в сплав вводят специальные модификаторы.

Структура и свойства чугунов.

Белый чугун – фазовый состав: П + Ц, структуры: Л + П + Ц_{II}; Л; Л + Ц_I.

Следовательно, весь углерод находится в форме цементита (графитизация равна нулю).

Белый чугун очень тверд и хрупок, практически не поддается обработке режущим инструментом и потому в машиностроении не используется. Однако примерно 85% получаемых в металлургии чугунов – белые. Они являются передельными, используются для передела в сталь, а также для получения серого, высокопрочного и ковкого чугунов.

Серый чугун в изломе имеет серый цвет, так как в структуре находятся графитные включения, количество и размеры которых имеют широкий диапазон. Металлическая основа чугуна тоже не одинакова. По строению металлической основы чугун разделяют на:

- серый перлитный. Перлит с включениями графита, в нем 0,8% углерода находится в связанном состоянии в виде цементита, остальное – в виде графита.
- серый ферритно-перлитный. Структура: $\Phi + \Pi$ + включения графита, в нем связано меньше 0,8% углерода.
- серый ферритный, имеет ферритную металлическую основу и весь углерод (допускается $C_{св} < 0,1\%$), имеющийся в сплаве, присутствует в форме графита.



Рис. 7. Серый чугун

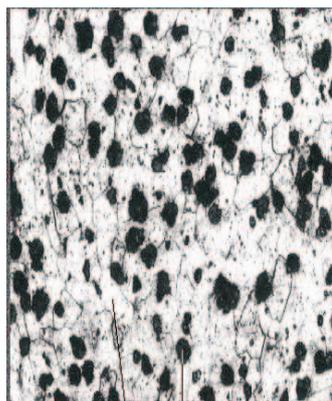


Рис. 8. Высокопрочный

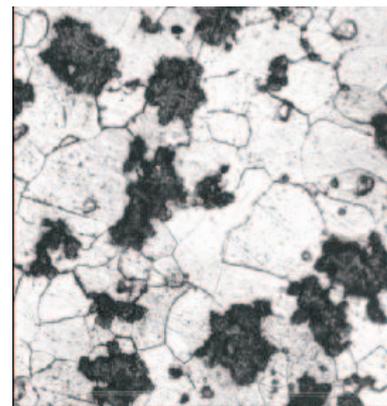


Рис. 9. Ковкий чугун

Таким образом, структура чугуна – стальная основа и графит. Отсюда, чугуны можно рассматривать как сталь, испещренную графитными включениями или пустотами (трещинами). Чем больше таких пустот (графита), тем ниже механические свойства чугуна. При одинаковом их объеме, свойства будут зависеть от их формы и расположения. Самые низкие механические свойства – если графитные включения образуют замкнутый скелет.

Графит в пластинчатой форме играет роль трещин, острых надрезов внутри металла. При растягивающих нагрузках по концам их образуются очаги разрушения. При сжатии свойства чугуна практически такие же, как и у стали того же состава и структуры, что у металлической основы чугуна. Но сопротивления изгибу, кручению (как и разрыву) гораздо ниже.

Графиту можно придать округлые формы. В чугунах, выплавленных с присадкой небольшого ($\approx 1\%$) количества магния (или церия), графит приобре-

тает шаровидную форму, механические свойства чугуна значительно улучшаются, он называется *высокопрочным*.

Белый чугун после отжига – нагреве выше температуры A_1 , выдержке и охлаждении, вследствие неустойчивости цементита, который распадется, получит графит в компактной, равноосной, но не округлой форме. Его называют хлопьевидным (иногда – углеродом отжига), а чугун – *ковким*.

Пластичность чугунов (δ) изменяется от формы графита следующим образом:

пластинчатый – 0,2 – 0,5%;

хлопьевидный – 5 – 10%;

шаровидный – 10 – 15%.

Нижние значения для перлитных чугунов, верхние для ферритных.

Твердость мало зависит от формы графита, но существенно – от структуры металлической основы: ферритная – 150, ферритно-перлитная – 200, перлитная – 250 НВ.

Как уже отмечалось, графитные включения являются ослабляющими элементами, т.е. оказывают отрицательное влияние. Но не всегда. В ряде случаев именно благодаря графиту чугун имеет преимущества перед сталью:

- графит облегчает обрабатываемость резанием, делает стружку ломкой;

- чугун обладает хорошими антифрикционными свойствами благодаря смазывающему действию графита;

- графитные составляющие быстро гасят вибрацию, резонансные колебания;

- чугун почти нечувствителен к поверхностным дефектам, надрезам. Тогда как для высокопрочной стали они недопустимы (являются концентраторами напряжений).

Чугуны обладают также лучшими литейными свойствами, чем сталь. У них ниже температура плавления, лучше жидкотекучесть и заполняемость формы.

Указанные преимущества чугуна делают его ценным конструкционным материалом, широко применяемым в деталях машин, если они не испытывают значительных растягивающих и ударных нагрузок.

Режим отжига белого чугуна для получения ковкого показан на рисунке 10.

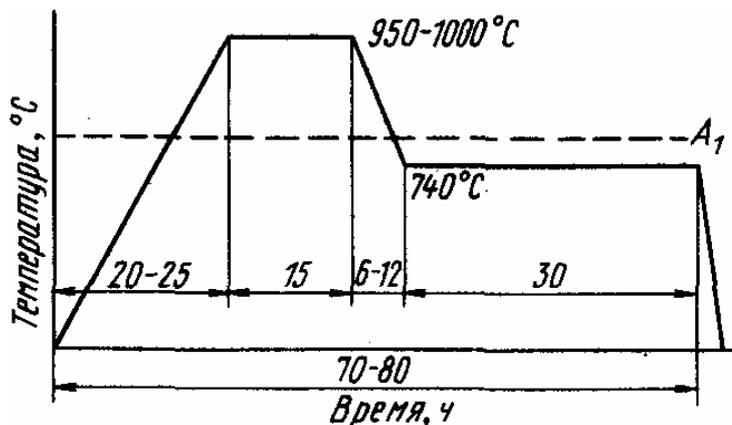


Рис. 10. График отжига для получения ковкого чугуна

При нагреве белого чугуна выше линии PSK ($T = 950 - 1000$ °C) образуются аустенит. Фазовый состав будет аустенит и цементит; цементит при этих температурах распадается в течение 10-15 ч с образованием хлопьев графита (I стадия графитизации). Если затем охладить чугун ниже PSK (до 740 °C) и дать длительную выдержку (что равноценно очень медленному охлаждению от 770 до 700 °C), то распадается цементит перлита (II стадия графитизации). При такой обработке весь углерод выделится в свободном состоянии и чугун будет состоять из феррита и включений хлопьевидного углерода отжига. Так получают *ферритный ковкий чугун*.

Если охлаждение (особенно в районе температур немного ниже линии PSK диаграммы железо — углерод) было недостаточно медленным или выдержка на II стадии графитизации была сокращена, то графитизация перлитного цементита может протекать не до конца; в этом случае чугун приобретает структуру перлит + феррит + углерод отжига. Такой чугун называется *феррито-перлитным*.

Если охлаждение ниже критического интервала температур было ускоренным (например, отливки охлаждали на воздухе), то процесс графитизации не охватит цементит перлита, в этом случае чугун приобретает структуру перлит + углерод отжига. Такой чугун называется *перлитным ковким чугуном*.

Для получения ковкого чугуна нужно иметь чисто белый чугун. При выплавке в вагранке даже частичная графитизация и, следовательно, образование пластинчатого графита при последующем охлаждении вызывает отложения графита на этих пластинках и получаемый ковкий чугун будет иметь пониженные свойства - как у серого чугуна.

Примеси в чугуне.

Обычный промышленный чугун содержит те же примеси, что и углеродистая сталь, т. е. марганец, кремний, серу и фосфор, но в большем количестве. Они существенно влияют на условия графитизации и, следовательно, на структуру и свойства чугуна.

Углерод — улучшает литейные свойства, повышает пластичность, но снижает предел прочности и твердость.

Кремний особенно сильно влияет на структуру чугуна, усиливая графитизацию. Содержание кремния в чугунах колеблется в широких пределах: от 0,3—0,5 до 3—5 %. Изменяя содержание кремния, можно получить от малокремнистого белого до высококремнистого ферритного (серого с пластинчатым или высокопрочного с шаровидным графитом). При малых дозах несколько повышает твердость и предел прочности.

Марганец в отличие от кремния препятствует графитизации, или способствует *отбеливанию чугуна*, образуя карбид Mn_3C . Связывает серу, образуя сульфид FeS .

Сера также способствует отбеливанию чугуна, но одновременно ухудшает литейные свойства (в частности, снижает жидкотекучесть), поэтому содержание серы в чугуне лимитируется: верхний предел для мелкого литья 0,08 %, для

более крупного, когда можно допустить несколько худшую жидкотекучесть, до 0,1—0,12 % S.

Фосфор практически не влияет на процесс графитизации. Однако фосфор —полезная примесь в чугунах, так как он улучшает жидкотекучесть, но охрупчивает металл. Поэтому чугуны для художественного литья содержат до 1% С, а в конструкционных его до 0,1%.

Легирующие элементы

Cu, Ni и др. не растворяются в цементите и способствуют графитизации; Cr, W, V, Mo и др. растворяются и препятствуют графитизации.

5.5 Маркировка чугунов

Марка отражает вид чугуна (СЧ, КЧ, ВЧ) и его механические свойства.

Серые чугуны по ГОСТ 1412 – 85 маркируют буквами СЧ и цифрами, обозначающими предел прочности при растяжении (σ_b , кгс/мм²):

СЧ – 10 – ферритный

СЧ 15

СЧ 18

СЧ 20

СЧ 25

СЧ 30

СЧ 35

} ферритно-перлитные: крышки, картеры, тормозные барабаны, поршневые кольца

} перлитные: блоки цилиндров, гильзы, маховики.

Высокопрочный чугун.

Согласно ГОСТ 7293 – 85 отливки изготавливают из чугуна следующих марок:

ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 50 – ферритные,

ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100 – перлитные.

Высокопрочный чугун обладает хорошими литейными и технологическими свойствами. Применяется для замены стальных литых и кованных изделий (коленчатый и распределительный валы, детали зубчатых передач).

Ковкие чугуны по ГОСТ 1215 – 79 имеют в марке дополнительно к значению σ_b цифру, характеризующую пластичность (δ , %).

Выпускают чугуны следующих марок

КЧ 30 – 6

КЧ 33 – 8

КЧ 35 – 10

КЧ 37 – 12

} ферритные чугуны

КЧ 45 – 7

КЧ 50 – 5

КЧ 55 – 4

КЧ 60 – 3

КЧ 65 – 3

КЧ 70 – 2

КЧ 80 – 1,5

} перлитные чугуны.

Лекция 6. Теория термической обработки стали

6.1. Общие сведения о термообработке.

6.2. Образование аустенита и рост его зерна.

6.3. Распад аустенита. Мартенситное и бейнитное превращения.

6.4. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении.

6.1. Общие сведения о термообработке

Термическая обработка – получение заданных свойств материала путем нагрева и охлаждения.

Термическая обработка применяется как промежуточная операция – для улучшения технологических свойств (облегченияковки, штамповки), и как окончательная операция – для обеспечения требуемого комплекса свойств изделия.

Основные факторы воздействия на металл при термообработке: температура и время, поэтому режим любой термообработки можно представить графиком в координатах Т (температура) и τ (время) (рис. 1).

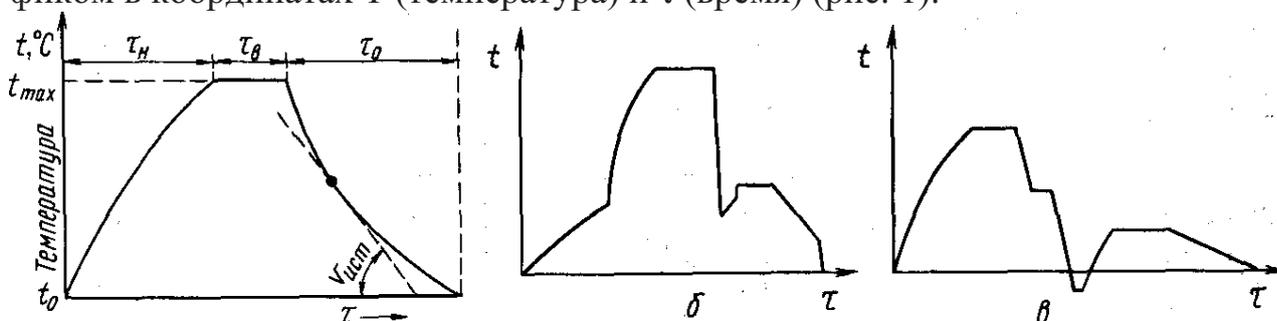


Рис. 1. График (режим) простой (а) и сложной (б, в) термической обработки

Кроме того, обязательно назначают время выдержки материала или изделия при температуре нагрева τ_B ; скорость нагрева $v_{нагр}$ и скорость охлаждения $v_{охл}$.

Изучение процессов термообработки началось с открытия Д.К. Черновым критических точек в стали (1868 г.).

Под теорией термической обработки понимают описание процессов формирования структур (при превращениях), а также особенностей структурного состояния сплавов (например, неравновесные состояния).

Основные процессы, рассматриваемые в теории термической обработки стали – фазовые превращения:

- $\text{П} \rightarrow \text{А}$ (при нагревании),
- $\text{А} \rightarrow \text{П}$ (при медленном охлаждении),
- $\text{А} \rightarrow \text{М}$ (при быстром охлаждении),
- $\text{М} \rightarrow (\text{Ф} + \text{Ц}), \text{М} \rightarrow \text{М}^* + \text{Ц}$

6.2. Образование аустенита и рост его зерна

Превращение перлита в аустенит в полном соответствии с диаграммой состояния железо-углерод может совершаться лишь при очень медленном нагреве. При обычных условиях нагрева превращение запаздывает, т.е. требуется перенагрев.

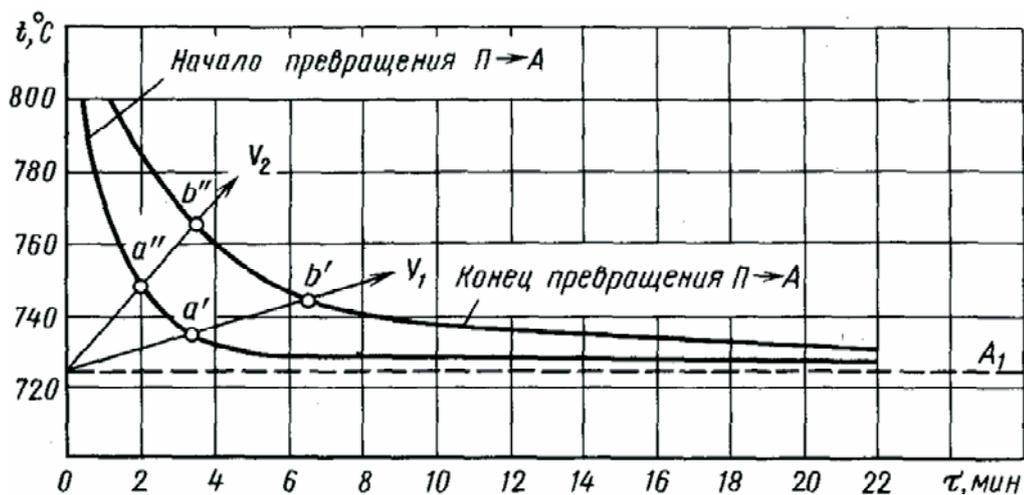


Рис. 2. Превращения перлита (П) в аустенит (А) при постоянной температуре

На рис. 2 приведены данные, показывающие время превращения перлита в аустенит для стали, содержащей 0,8 % С, при разных температурах. Расположение кривых показывает, что чем выше температура, тем быстрее протекает процесс.

При изотермическом нагреве ($T = \text{const}$) при 780°C превращение перлита в аустенит завершится за 2 мин, а при 740°C — за 8 мин.

При непрерывном нагреве. Если нагрев осуществляется со скоростью v_2 , то он соответствует превращению перлита в аустенит в интервале температур точек $a'' - b''$. При медленном нагреве v_1 луч пересекает кривые превращений при меньших температурах.

Кривые начала и конца превращения, асимптотически приближаясь к горизонтали A_1 , пересекут ее в бесконечности. Реальные превращения идут выше A_1 и в интервале температур, а не при постоянной температуре для равновесного состояния.

Для получения однородного по составу (гомогенного) аустенита, при нагреве требуется не только перейти через точку окончания перлитно-аустенитного превращения, но и перегреть сталь выше этой точки или дать выдержку для завершения диффузионных процессов внутри аустенитного зерна.

Рост аустенитного зерна.

Начало перлитно-аустенитного превращения сопровождается образованием множества первых зерен аустенита на границах между ферритом и цементитом. Размер этих мелких зерен характеризует так называемую величину начального зерна аустенита.

Переход через критическую точку A_{c1} (рис.3) сопровождается резким уменьшением размера зерна. При дальнейшем нагреве возможны два крайних варианта — зерно аустенита:

- почти не увеличивается до $T \approx 1000^\circ\text{C}$, а затем бурно растет;
- вскоре после перехода A_{c1} начинает довольно интенсивно расти.

Склонность аустенитного зерна к росту при температуре близкой к A_{c1} называют наследственной зернистостью. По этой склонности различают два предельных типа стали:

- наследственно мелкозернистая;
- наследственно крупнозернистая.



Рис.3. Схема роста зерна различных видов стали:
 1 – наследственно крупнозернистой;
 2 – наследственно мелкозернистой

Склонность к росту зерна определяется условиями раскисления стали и ее составом. Стали, раскисленные алюминием, наследственно мелкозернистые (т.к. дисперсные частицы AlN, Al_2O_3 тормозят рост зерна аустенита); легирующие элементы, особенно карбидообразующие замедляют собирательную рекристаллизацию.

Термин «наследственное зерно» указывает лишь на то, что при нагреве крупнозернистая сталь приобретает крупное зерно при более низкой температуре, чем сталь мелкозернистая. Наследственно мелкозернистая сталь может иметь более крупное зерно аустенита. Поэтому существует понятие – *действительное зерно*, т.е. существующее в стали при данной температуре.

Размер зерна стали несущественно влияет на твердость, прочность ($HВ, \sigma_B, \delta$), но с ростом зерна снижаются резко:

- ударная вязкость,
- работа распространения трещины.

повышаются:

- порог хладноломкости,
- склонность к закалочным трещинам.

6.2.1. Перегрев и пережог

Продолжительный нагрев доэвтектоидной стали при температурах значительно превышающих A_3 , для заэвтектоидных – A_{cm} приводит к образованию крупного действительного зерна как при данной температуре, так и после охлаждения до $20\ ^\circ C$. Это явление принято называть *перегревом стали*.

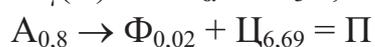
Перегретая сталь характеризуется крупнокристаллическим изломом. При охлаждении перегретой стали нередко часть феррита (цементита), благодаря диффузии углерода в условиях высоких температур, обеспечивает рост соответствующих (ферритных или цементитных) зерен в виде правильных, оригинально расположенных фигур, игл – видманштеттовых кристаллов – «узоров».

Перегрев может быть исправлен (после охлаждения) нагревом до температур выше A_{c3} для доэвтектоидных сталей, выше A_{c1} для заэвтектоидных сталей.

Нагрев до температур более высоких, чем вызывающие перегрев и к тому же в окислительной атмосфере приводит к *пережогу* стали. Он сопровождается образованием по границам зерен окислов железа, которые придают охлажденному металлу большую хрупкость. Излом пережженной стали – камневидный (тусклый). Пережог происходит при температурах ниже линии солидус примерно на $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и меньше. Пережог – это неисправимый брак.

6.3. Распад аустенита. Мартенситное и бейнитное превращения

Превращение аустенита в перлит заключается в распаде твердого раствора углерода в γ -железе ($\text{Fe}_{\gamma}(\text{C})$), на почти чистое α -железо и цементит:



При A_1 (температуре равновесия) свободные энергии аустенита и перлита равны $F_A = F_{\text{П}}$ и превращение невозможно, необходимо некоторое **переохлаждение**. Чем сильнее переохладить аустенит, тем быстрее, очевидно, будет идти превращение. Но механизм превращения диффузионный – перераспределение углерода очень значительное. А скорость диффузии определяется температурой. Со снижением температуры превращение будет замедляться.

Итак, увеличение переохлаждения приводит с одной стороны к увеличению скорости превращения (ΔF увеличивается), а с другой стороны – к ее замедлению (из-за снижения скорости диффузии). Суммарное действие этих факторов дает экстремальную кривую: при $A_1(727\text{ }^{\circ}\text{C})$ и ниже $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость превращения равна нулю; в зоне $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ превращение идет наиболее интенсивно.

6.3.1. Механизм перлитного превращения.

Перед распадом углерод диффундирует внутри аустенита и скапливается на границе зерен аустенита с образованием зародышей цементита. Рост их происходит за счет диффузии углерода из прилегающих объемов аустенита (рис. 4), который обедняется углеродом, что способствует превращению его в феррит.

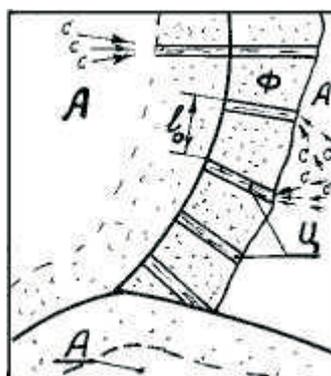


Рис. 4. Механизм перлитного превращения

Цементит, увеличиваясь в объеме, принимает форму пластин, между которыми находятся пластины феррита. Так возникает участок перлита: чередующиеся параллельные пластины феррита и цементита. При дальнейшем росте перлитного зерна пластины удлиняются и к ним присоединяются новые (краевой и боковой рост) – от границы кристалла аустенита по его объему.

Процесс идет до столкновения перлитных зерен и превращения всего аустенита в перлит. Если нанести на диаграмму температура – время точки начала (a_i) и точки конца (b_i) перлитных превращений для различных степеней переохлаждения (различных температур превращения), то получим: сначала большой период инертности, затем все меньшие, но потом снова увеличивающиеся.

В результате будем иметь **диаграмму изотермического превращения аустенита** (рис. 5).

Чем ниже температура распада аустенита, тем дисперснее образуется ферритно-цементитная смесь (меньше l_0 – усредненная толщина двух соседних пластинок Ц+Ф).

При малых степенях переохлаждения аустенита, при температуре около $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ получается *перлит* ($l_0 = 0,6-1,0\text{ мкм}$), твердость которого НВ 180-200. При температуре $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуется более мелкая ферритно-цементитная смесь, которая получила название *сорбит* ($l_0 \approx 0,3\text{ мкм}$), НВ 250-330. При температуре $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуется *троостит* ($l_0 \approx 0,1\text{ мкм}$), НВ 330-400.

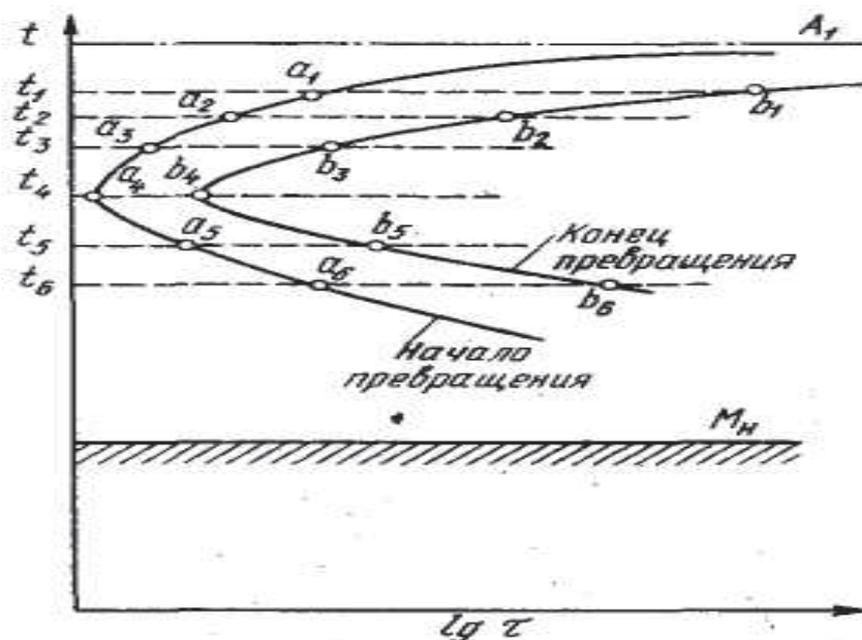


Рис. 5. Диаграмма изотермического распада аустенита

Таким образом, при разных температурах превращений получают структуры одинакового состава ($\Phi + \Pi$), но разной степени дисперсности, с разными свойствами.

6.3.2. Мартенситное превращение

Если аустенит переохладить до таких температур, когда диффузия атомов углерода практически прекращается, а γ - решетка неустойчива, но в ней растворен углерод, то происходит перестройка решетки без выделения углерода:

$\text{Fe}_\gamma(\text{C}) \rightarrow \text{Fe}_\alpha(\text{C}_{\text{начальное}})$, т.е. аустенит превращается в мартенсит.

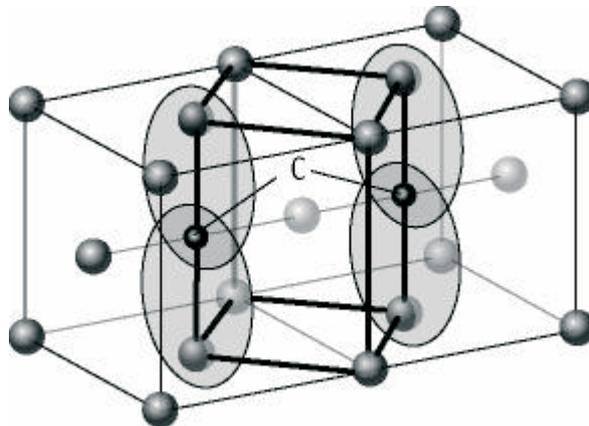


Рис.6. Схема распада ячеек аустенита на мартенсит

Мартенсит в стали – пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железе. Концентрация углерода в нем та же, что и у исходного аустенита, т.е. от 0,02 до 2,14%. Атомы железа, расположенные в аустените в виде ГЦК, оказываются в ОЦК (рис. 6); углерод не выделяется и вызывает искажение решетки – тетрагональность (отношение ребер ячейки $c/a > 1$). Ячейка мартенсита объемно-центрированная.

При изменении содержания углерода в мартенсите от 0,2 до 1,8% - c/a изменяется от 1,02 до 1,08, это вызывает большую напряженность структуры.

Кроме того, в такой структуре очень большая плотность дислокации и более сильная, чем металлическая – ковалентная связь, возникающая между атомом углерода и двумя соседними атомами железа, что обеспечивает мартенситу высокую твердость и хрупкость.

Для мартенсита характерна особая микроструктура. Его кристаллы представляют собой пластины (в плоскости микрошлифа – иглы), расположенные параллельно или пересекающиеся под определенными углами (60 и 120°), т.к. мартенсит образуется по определенным кристаллографическим плоскостям в аустените. Такое ориентированное превращение – сдвиг, смещение какого-то объема с одновременным γ - α - превращением требует напряженного состояния структуры.

Превращение состоит практически в мгновенном (за 0,001 с) образовании порции мартенситных пластин (пластина образуется за $1 \cdot 10^{-7}$ с). Затем наблюдается задержка и при дальнейшем охлаждении превращение возобновляется.

Начавшись в какой-то точке M_n мартенситное превращение заканчивается в M_k с каким-то количеством остаточного аустенита. Причем скорость охлаж-

дения роли не играет. С повышением содержания углерода значения температур для M_n и M_k снижаются в область отрицательных.

Особенности мартенситного превращения:

- бездиффузионность (состав аустенита и мартенсита одинаков);
- перестройка решетки $\gamma \rightarrow \alpha$;
- ориентировочность (мартенсит закономерно ориентирован относительно старой фазы - аустенита);
- сдвиговый характер превращения, рельефность микрорельефа.

6.3.3. Структура мартенсита

В закаленных средне- и высокоуглеродистых сталях наблюдается пластинчатый (игольчатый) мартенсит. Чем мельче зерно аустенита, тем мельче пластины. При очень мелких пластинах игольчатое строение неразлично под микроскопом при обычных увеличениях ($\times 500-600$) и мартенсит называют бесструктурным или скрытокристаллическим (правильно закаленная сталь) (рис.7).

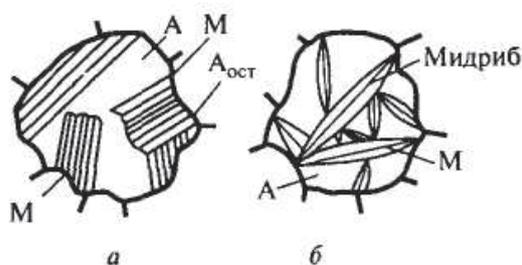


Рис.7. Мартенсит реечный и игольчатый

В закаленных низко- и среднеуглеродистых сталях наблюдается массивный (реечный) мартенсит, кристаллы которого имеют вид параллельных реек, объединенных в пакеты. Зерно аустенита может дать несколько таких пакетов.

Аустенитно-мартенситное превращение сопровождается увеличением объема. Все структуры стали можно расположить по мере увеличения объема в ряд: аустенит, феррит, перлит, сорбит, троостит, мартенсит.

6.3.4. Бейнитное превращение

Переохлажденный аустенит в интервале от 550°C до M_n превращается в бейнит. Превращение характерно сочетанием особенностей как диффузионного – перлитного, так бездиффузионного – мартенситного процессов и поэтому называется промежуточным.

Бейнитное превращение протекает в интервале температур, когда практически отсутствует диффузия железа, но диффузия углерода протекает интенсивно. В переохлажденном аустените углерод диффузионно перераспределяется. В результате возникают участки, обогащенные углеродом и обедненные им. Концентрационная неоднородность приводит к возникновению напряжений, а так как для бедных по углероду участков точка M_n лежит выше, то пластическая деформация приводит к γ - α превращению по мартенситной реакции. (На

полированном шлифе появляется рельеф). Так как температура высокая, то образовавшийся мартенсит распадается на ферритно-цементитную смесь.

Обогащенные углеродом участки аустенита могут не испытывать превращений, могут выделять цементит, могут частично испытывать мартенситное превращение. Кроме того, в структуре имеется остаточный аустенит.

Верхний бейнит – имеет перлитное строение, похожее на троостит, нижний бейнит - игольчатое строение, твердость его выше (\approx НВ 500 – 550 для эвтектоидной стали).

6.4. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении

Термообработка обычно проводится не изотермически, а непрерывным охлаждением. Кривые охлаждения строят в тех же координатах «температура – время», что и в диаграмме изотермического превращения аустенита.

При небольшой скорости охлаждения v_1 образуется перлит, с увеличением скорости $v_2 - v_3$ получаются более мелкие ферритно-цементитные смеси: сорбит и троостит

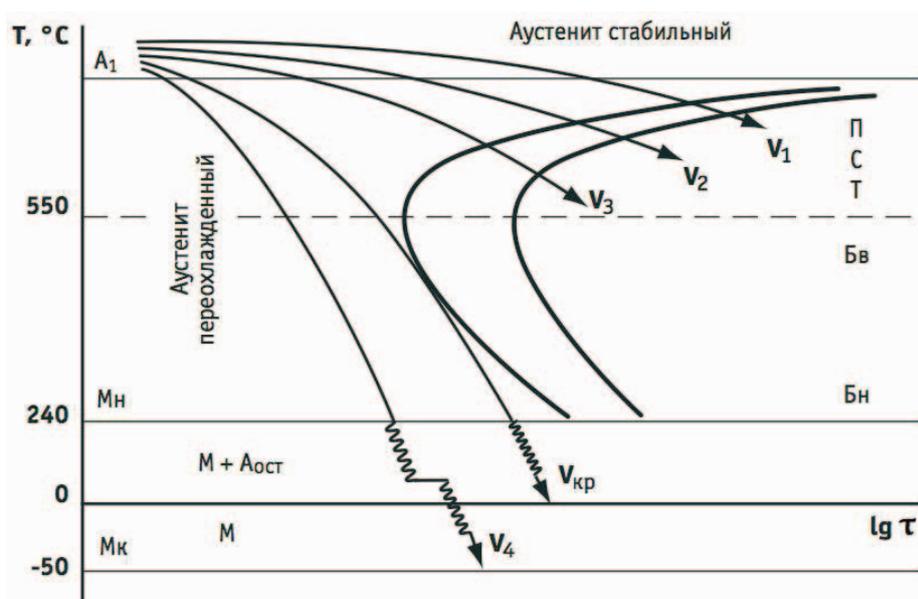


Рис.8. Диаграмма распада аустенита при непрерывном охлаждении

При скорости несколько большей v_3 аустенит распадается не полностью – часть его переохлаждается до точки M_n , то есть превращается в мартенсит, а часть превратится в троостит.

От скорости v_k (критической) весь аустенит переохлаждается до M_n , ферритно-цементитной смеси не образуется, образуется мартенсит. *Бейнит при непрерывном охлаждении углеродистой стали не образуется. Его получают при температуре 300-400 °С изотермически.*

Лекция 7. Технология термической обработки стали. Термомеханическая и химико-термическая обработка

- 7.1. Отжиг I и II рода: виды, назначение, режимы.
- 7.2. Закалка.
- 7.3. Отпуск стали.
- 7.4. Термомеханическая обработка.
- 7.5. Основа химико-термической обработки стали.

7.1. Отжиг I и II рода: виды, назначение, режимы

Основными видами термической обработки, различно изменяющими структуру и свойства стали в зависимости от требований предъявляемых к отливкам, поковкам, прокату и др. полуфабрикатам или готовой продукции являются: отжиг, нормализация, закалка, отпуск.

Содержание отжига: нагрев стали и медленное охлаждение с целью получения более равновесной структуры.

Отжиг I рода – устраняет химические или физические неоднородности при температуре ниже или выше температур фазовых превращений, которые не определяют цели термообработки.



Рис. 1. Отжиг I рода (температурные интервалы нагрева)

Виды отжига I рода:

- гомогенизация (диффузионный);
- рекристаллизационный отжиг;
- отжиг, уменьшающий напряжения (низкий отжиг).

7.1.1. Гомогенизация (диффузионный отжиг)

Применяется для слитков и крупных отливок *легированной* стали с целью уменьшения дендритной или внутрикристаллитной ликвации. Они повышают склонность стали к хрупкому разрушению, возникновению шиферности (слоистости) и флокенов (пустот), понижению пластичности и вязкости.

Режим : нагрев до 1100–1200 °С (1, рис. 1), выдержка 8-20 часов, медленное охлаждение до 200-250 °С.

Общее время обработки 50 – 100 ч.

7.1.2. Рекристаллизационный отжиг

Нагрев деформированной в холодном состоянии (наклепанной) стали выше температуры рекристаллизации, выдержка и последующее охлаждение. При этом крупные вытянутые зерна распадаются, образуются равноосные.

Температура нагрева малоуглеродистых и низколегированных сталей 600 - 700 °С (2. рис. 1).

Для среднелегированных – 750-770 °С, для высокоуглеродистых и легированных сталей – выше (например, для 12Х18Н9Т-1100 – 1150 °С).

Время нагрева 0,5 – 1,5 ч.

При отжиге кроме рекристаллизации феррита могут протекать процессы коагуляции и сфероидизации цементита – повышается пластичность стали, облегчается обработка давлением.

7.1.3. Отжиг для снятия остаточных напряжений (низкий отжиг)

Термическая обработка заключается в нагреве стали в интервале 200-700 °С и последующем охлаждении с целью уменьшения внутренних напряжений после технологических операций.

Например: детали прецизионных станков (ходовые винты, червяки, зубчатые колеса) после механической обработки нагревают до 570-600 °С и выдерживают в течение 2-3 ч.

Для снятия сварочных напряжений – Т=650-700 °С (3, рис. 1).

Отжиг II рода – когда фазовые превращения определяют их целевое значение.

Разновидности отжига II рода:

- полный;
- неполный;
- изотермический;
- нормализационный (нормализация).

7.1.4. Полный отжиг – для доэвтектоидной стали проводится с целью создания мелкозернистости, понижения твердости, повышения пластичности, снятия внутренних напряжений.

Режим:

- нагрев до $A_{C3} + (20-30) \text{ }^\circ\text{C}$;
- выдержка для полного завершения фазовых превращений в объеме;
- медленное охлаждение.

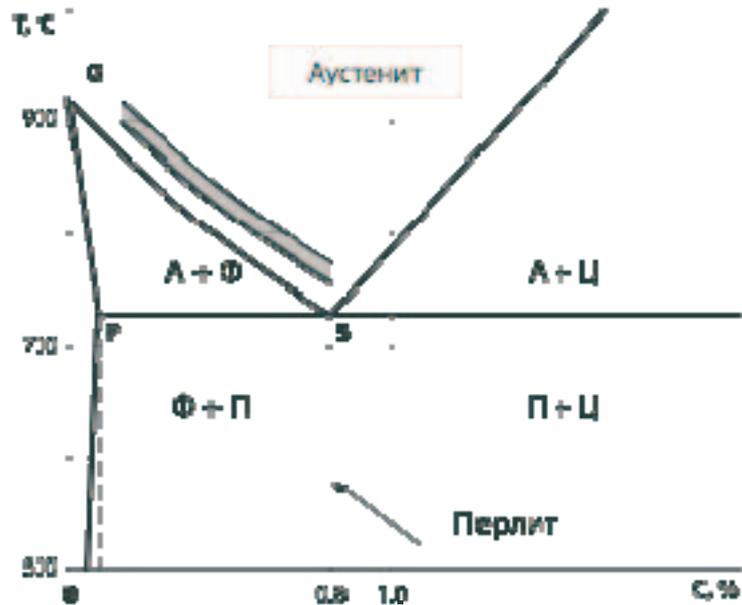


Рис. 2. Полный отжиг

При нагреве исходная крупнозернистая ферритно-перлитная структура превращается в мелкозернистую структуру аустенита («начальное зерно» - действительное зерно). При медленном охлаждении (для углеродистых сталей $V_{\text{охл}} = 200-250 \text{ }^\circ\text{C/ч}$) образуется мелкозернистая (ферритно-перлитная) структура, обеспечивающая высокую пластичность и вязкость.

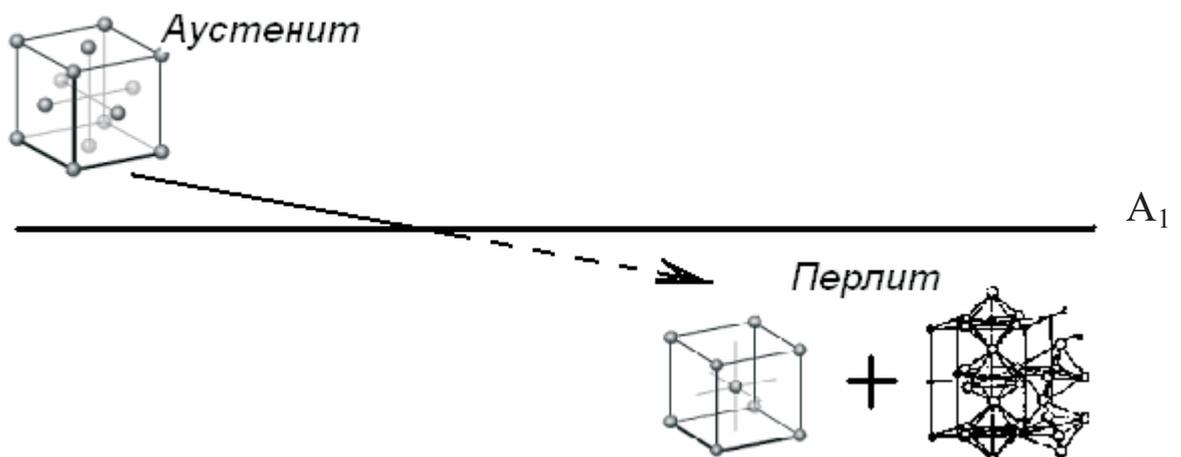


Рис.3. Распад аустенита при медленном охлаждении

Для заэвтектоидных сталей не применяются, т.к. при охлаждении образуется сетка цементита по границам зерен перлита, ухудшающая механические свойства.

7.1.5. Неполный отжиг

Этому виду отжига подвергают иногда доэвтектоидную, а в основном, эвтектоидную и заэвтектоидные стали, инструментальные заготовки с целью превращения пластинчатого перлита и сетки цементита в структуру зернистого перлита, лучше обрабатываемого на станках.

(Перлит пластинчатый – НВ 180-250;
зернистый – НВ 160-180).

Режим:

нагрев выше A_{C1} до 740-780 °С.

Если нагреть выше A_{cm} , то цементит растворится в аустените и при последующем охлаждении образуется пластинчатый цементит.

Нагретый сплав чуть выше A_{C1} имеет какое-то количество частиц цементита (меньшее чем было, т.к часть их растворилась в аустените), оставшиеся частицы при последующем охлаждении служат центрами кристаллизации цемента, выделяющегося ниже A_{T1} и принимающего в этом случае зернистую форму.

В связи с тем, что при таком отжиге получается зернистая или сфероидальная форма цементита – этот отжиг называется *сфероидизирующим*.

Охлаждение при сфероидизации медленное. Оно должно обеспечить распад аустенита на ферритно-цементитную смесь, сфероидизацию и коагуляцию образовавшихся карбидов при $T = 620-680^{\circ}\text{C}$. Для облегчения процесса образования зернистого перлита нагрев-охлаждение повторяют несколько раз – *маятниковый (циклический) отжиг*.

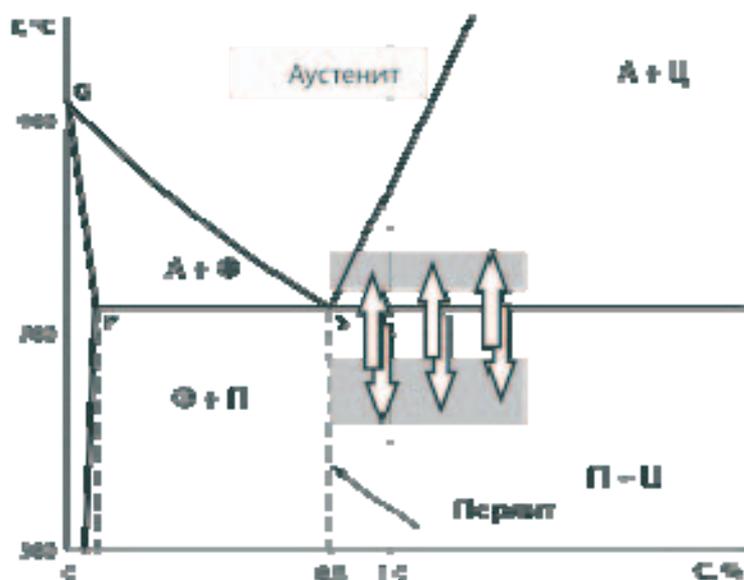


Рис. 4. Циклический отжиг

Чаще применяют изотермический отжиг, требующий меньше времени. При этом сталь медленно охлаждают (30-50 °С\ч) до 620-680 °С и выдерживают при $T = \text{const}$ от 1 до 3 часов, затем охлаждают на воздухе.

7.1.6. Изотермический отжиг отличается тем, что образование ферритно-перлитной или цементитно-перлитной структуры из аустенита происходит при $T = \text{const}$.



Режим:

нагрев до $T = A_{c3} + (20-30 \text{ } ^\circ\text{C})$ или $T = A_{c1} + (10-40 \text{ } ^\circ\text{C})$;

охлаждение до температуры ниже A_{r1} (680-700 °С);

выдержка при заданной температуре до полного распада аустенита;

охлаждение на воздухе.

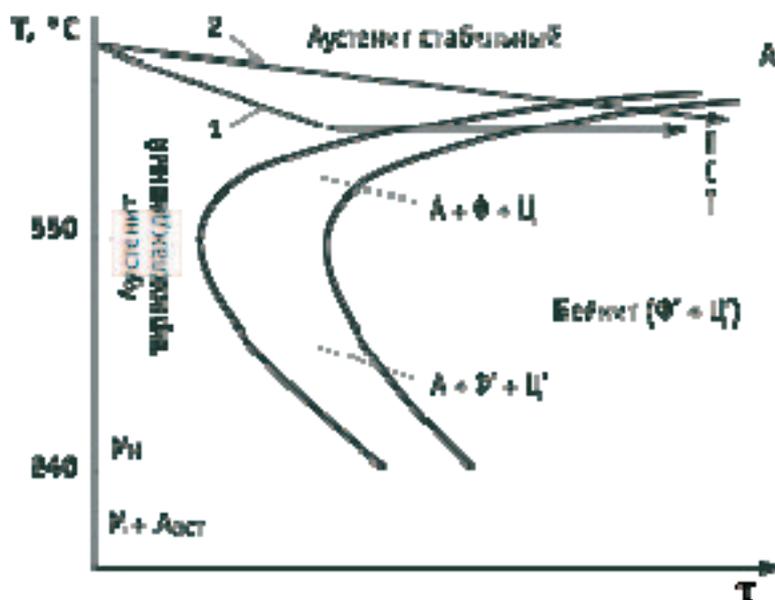


Рис.5. Кривые отжига:

1 – изотермического;

2 – полного.

Этот вид отжига часто применяют для легированных сталей. При этом значительно сокращается время для снижения твердости изделия (легированные стали требуют очень медленного охлаждения при снижении температуры).

Изотермический отжиг сокращает время по сравнению с полным, улучшает обрабатываемость резанием, чистоту поверхности и снижает деформацию изделий при последующей термической обработке. Применяется для поковок (шестерня, муфта, вал и др.) небольших размеров, т.к. быстрое и равномерное охлаждение больших поковок по сечению до $T = \text{const}$ невозможно.

7.1.7. Нормализационный отжиг

Нагрев до температуры выше A_{c3} или A_{cm} на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующим охлаждением на спокойном воздухе.

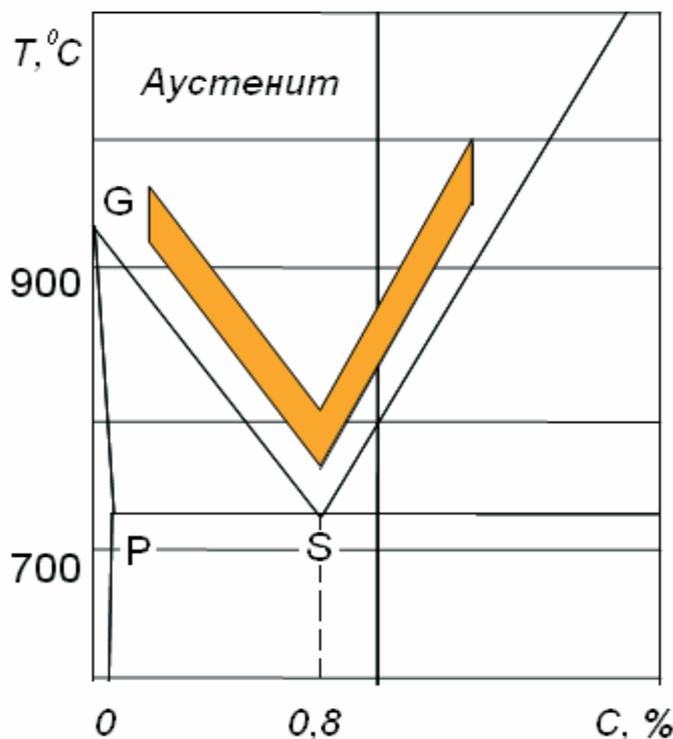


Рис.6.Нормализация (интервал нагрева)

Для среднеуглеродистой стали повышается твердость и прочность. Применяют для неответственных деталей вместо более дорогого улучшения.

Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию стали и устраняет крупнозернистую структуру, полученную при литье, ковке, штамповке. Твердость и прочность средне – и высокоуглеродистых нормализованных сталей больше на 10-15 % по сравнению с отожженными.

Нормализация дешевле отжига.

Заэвтектоидная сталь: при охлаждении на воздухе образуется большое количество центров Fe_3C , что препятствует выделению цементита по границам зерен (сетка не образуется) – получается мелкая смесь феррита и цементита.

7.2. Закалка: режим объемной закалки, закалочные среды, способы закалки, поверхностная закалка

Закалка – термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше критической (A_{c3} – для доэвтектоидной, A_{c1} – для заэвтектоидной) на $30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержке и последующим охлаждением со скоростью больше критической.

В результате закалки получается *неравновесная мартенситная структура*. Поэтому закалка не является окончательной операцией. Сталь обязательно

подвергают отпуску, чтобы уменьшить хрупкость и снизить остаточные напряжения.

Мартенсит – структура наивысшей твердости; после отпуска пластичность стали повышается, а твердость снижается. При одинаковой твердости структуры, полученные после отпуска мартенсита, имеют лучшие механические свойства, чем структуры закалки, полученные после распада аустенита (за исключением нижнего бейнита).

Главные цели закалки наряду с повышением твердости:

инструментальные стали – повысить прочность и износостойкость,

конструкционные стали – повысить прочность, пластичность и вязкость (а для некоторых деталей и износостойкость).

7.2.1. Нагрев под закалку

Выбор температуры нагрева для углеродистых сталей по диаграмме железо – цементит. Для доэвтектоидной стали $A_{c3} + (30 - 50 \text{ }^{\circ}\text{C})$ – *полная закалка*; для заэвтектоидной стали $A_{c1} + (30 - 50 \text{ }^{\circ}\text{C})$ – *неполная закалка*.

При этом в первом случае исходная ферритно-перлитная структура превращается в аустенит, а он при скорости охлаждения большей критической превращается в мартенсит. При меньших температурах нагрева остается феррит, ухудшающий закалочную структуру (ниже твердость, прочность).

Нагрев заэвтектоидной стали до температуры $760 - 790 \text{ }^{\circ}\text{C}$ переводит перлит в аустенит и в структуре остается нерастворенной в аустените часть вторичного цементита, который в структуре мартенсита повышает твердость и износостойкость стали.

Кроме того, для многих сталей температура нагрева под закалку значительно выше A_{c1} и A_{c3} (на $150 - 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$) – для перевода в твердый раствор специальных карбидов и получения требуемой легированности аустенита. При этом нерастворенные частицы карбидов тормозят рост зерна аустенита, что позволяет проводить нагрев без роста зерна.

Для сокращения времени операций нагрев стали следует вести быстро, однако не допуская образования дефектов. При быстром нагреве могут образоваться трещины (особенно в деталях сложной конфигурации).

Общая продолжительность нагрева:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{сп}} + \tau_{\text{ив}},$$

где $\tau_{\text{сп}}$ – время *сквозного прогрева* до заданной температуры;

$\tau_{\text{ив}}$ – продолжительность *изотермической выдержки*.

Эти параметры выбираются по таблицам:

$\tau_{\text{сп}}$ – с учетом скорости прогрева детали заданной формы на 1 мм сечения;

$\tau_{\text{ив}}$ – из условия необходимости завершения фазовых превращений (полного растворения углерода в аустените). Можно принять

$$\tau_{\text{ив}} = (0,15 - 0,25) \tau_{\text{сп}}.$$

Для закалки инструмента в электропечах (сталь углеродистая с содержанием 0,7 – 1,3% С) выдержка рекомендуется 50 – 80 сек/мм наименьшего сечения, а для легированной стали 70 – 90 с/мм.

При нагреве в пламенных или электрических печах взаимодействие атмосферы печи с поверхностью металла (особенно при температуре больше 500 – 550 °С) вызывает обезуглероживание ($C + O_2 \rightarrow CO_2$) и окисление стали ($2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$) – образование окалины.

Поэтому часто применяют контролируемую (защитную) газовую среду (аммиак, азот) или вакуум.

7.2.2. Закалочные среды

При закалке для переохлаждения аустенита до температур начала мартенситного превращения требуется быстрое охлаждение не во всем интервале температур, а только в пределах 650 – 400 °С, при низкой устойчивости аустенита.

Выше 650 °С скорость превращения аустенита мала (нельзя только допускать распада аустенита). Ниже 400 °С в углеродистой стали вновь начинается зона относительной устойчивости аустенита, допускающая пониженную скорость охлаждения.

В мартенситном интервале (начиная с 200 – 300 °С) особенно желательно замедленное охлаждение, чтобы к структурным напряжениям не добавлялись термические.

Механизм действия закалочных сред.

В момент погружения изделия в жидкость вокруг него образуется пленка перегретого пара; охлаждение через слой паровой рубашки относительно медленное – стадия пленочного кипения (I, рис. 7).

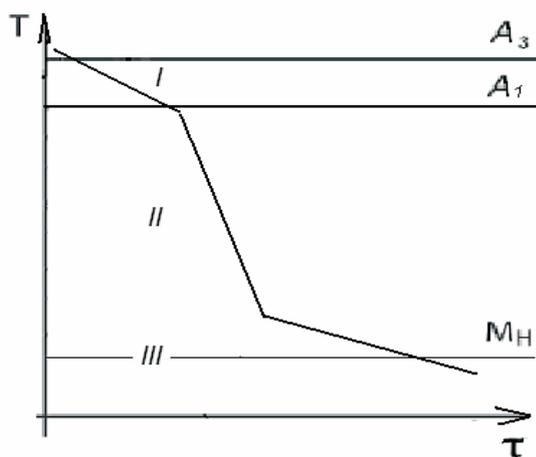


Рис.7. Кривая охлаждения при закалке

При снижении температуры поверхности паровая рубашка разрушается, жидкость начинает кипеть на поверхности детали и охлаждение идет быстро – стадия пузырьчатого кипения (II, рис. 7).

При снижении температуры поверхности металла ниже температуры кипения жидкости (при охлаждении в воде меньше 100 °С) кипение прекратиться, охлаждение замедлится – стадия конвективного теплообмена.

Закалочная жидкость охлаждает интенсивнее, если широк интервал II стадии (пузырчатого кипения), т.е. выше температура перехода от I стадии ко II и ниже температура границы между II и III стадиями.

Наиболее распространенные закалочные среды: вода, масло, воздух, водные растворы солей, щелочей, кислот, расплавленные соли.

Вода охлаждает гораздо быстрее, чем масло (в 6 раз при $T = 600$ °С). Поэтому для охлаждения углеродистых сталей, требующих большую скорость охлаждения применяю воду.

В масле охлаждают детали из легированных сталей и высокоуглеродистых при тонких сечениях.

Таблица 1.

Характеристика различных охлаждающих сред

Охлаждающая среда	Температурный интервал пузырькового кипения, °С	Относительная интенсивность охлаждения в середине интервала пузырькового кипения
Вода, 20 °С	400–100	1
Вода, 40 °С	350–100	0,7
Вода, 80 °С	250–100	0,2
Раствор 10%-го NaCl в воде при 20 °С	650–100	3,0
Раствор 50%-й NaOH в воде при 20 °С	650–100	1,0
Масло минеральное, 20...200 °С	500–250	0,3

Основной недостаток воды – высокая скорость охлаждения в области образования мартенсита, что создает опасность возникновения трещин. Добавление к воде солей, щелочей и кислот значительно увеличивает ее закаливающую способность: почти полностью исключается I стадия, снижается скорость охлаждения в мартенситном интервале.

Масло (минеральное, нефтяное) имеет следующие преимущества:

- небольшую скорость охлаждения в мартенситном интервале (по сравнению с водой при 200 °С – в 28 раз меньше),
- постоянную закаливающую способность в широком интервале температур среды (20 – 150 °С).

Недостатки масла:

- легкая воспламеняемость,
- пригорание к поверхности детали,
- постепенное повышение вязкости (густеет от высоких температур, ухудшается закаливающая способность),
- повышенная стоимость.

На практике часто применяются 8 – 12%-ные водные растворы NaCl и NaOH.

Прокаливаемость стали – способность закаливаться на определенную глубину.

При закалке в зависимости от сечения (например диаметра) и критической скорости охлаждения получается различная структура от края к середине. Так как теплота от внутренних слоев передается к наружным, то охлаждение по сечению будет неравномерным – внутренние слои детали охлаждаются медленнее $V_{вн} \ll V_{пов}$. Там, где скорость охлаждения меньше критической образуется бейнит, троостит, сорбит, перлит. Соответственно и твердость слоев будет различной. Если сердцевина охлаждается со скоростью больше критической, то по всему сечению образуется мартенситная структура.

Для различных сплавов критическая скорость охлаждения различна. Чем меньше V_k закалки, тем больше прокаливаемость. Легирование стали делает аустенит более устойчивым, снижает V_k и повышает прокаливаемость.

Простая углеродистая сталь принимает закалку на глубину до 5 – 6 мм, следовательно, деталь диаметром 10 мм еще можно закалить полностью, при больших диаметрах получается неоднородная структура. Деталь будет менее прочной.

Закаливаемость стали – способность получать в результате мартенситного превращения повышенную твердость. Чем больше содержание углерода в стали, тем больше тетрагональность и твердость. Практически закаливать можно стали с содержанием 0,3% углерода и более.

7.2.3. Способы закалки

Закалка в одном охладителе (рис. 8, кривая 1) — наиболее простой способ. Нагретую до определенной температуры деталь погружают в закалочную жидкость, где она остается до полного охлаждения. Этот способ применяют при закалке несложных деталей из углеродистых и легированных сталей.

Для уменьшения внутренних напряжений деталь иногда не сразу погружают в закалочную жидкость, а некоторое время охлаждают на воздухе, «подстуживают». Такой способ закалки называется *закалкой с подстуживанием*.

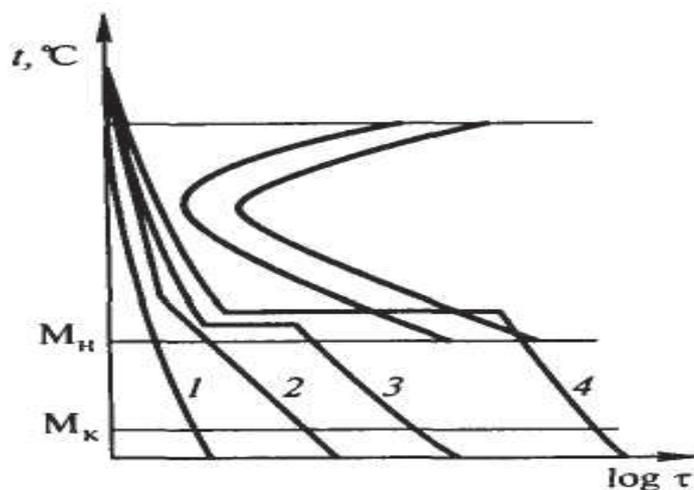


Рис. 8 Кривые охлаждения при различных способах закалки стали

Прерывистая закалка, или закалка в двух средах (рис. 8, кривая 2). Деталь охлаждают сначала в быстро охлаждающей среде, а затем в медленно охлаждающей. Обычно первое охлаждение проводят в воде, а затем деталь переносят в масло, или охлаждают на воздухе.

Этот способ применяют при закалке инструмента из высоколегированных сталей. Требуется термист высокой квалификации.

Ступенчатая закалка (рис. 8, кривая 3).

Деталь охлаждается в закалочной среде, имеющей температуру выше мартенситной точки для данной стали. При охлаждении и выдержке в этой среде закаливаемая деталь должна приобрести во всех точках сечения температуру закалочной ванны. Затем следует окончательное, обычно медленное, охлаждение, во время которого и происходит формирование структуры, т. е. превращение аустенита в мартенсит.

При ступенчатой закалке, а также при закалке в двух средах длинномерных и плоских изделий (преимущественно инструмента) проводится *правка* или *рихтовка*, т. е. устранение коробления, вызванного термическими напряжениями при быстром охлаждении. Металлы в момент мартенситного превращения обладают «аномально высокой пластичностью».

Ступенчатая закалка применяется для углеродистых сталей при диаметре деталей до 10-12 мм, а для деталей из легированных сталей диаметром до 20 – 30 мм. Потому что горячие среды не обеспечивают большой критической скорости охлаждения для более крупных деталей.

Изотермическая закалка (рис. 8, кривая 4). В отличие от ступенчатой, при изотермической закалке необходимо выдерживать сталь в закалочной среде до завершения изотермического превращения аустенита.

Обычно температура изотермического распада аустенита лежит в интервале 250—350 °С. В результате такой закалки сталь обладает меньшей твердо-

стью, чем при других способах закалки, но обычно повышенной вязкостью. Структура — бейнит.

Изотермическую закалку применяют для деталей, склонных к короблению и образованию трещин.

7.2.4. Обработка стали холодом

Сущность этого способа заключается в том, что при охлаждении стали ниже комнатной температуры, но в интервале не ниже окончания мартенситного превращения, происходит дополнительное более полное превращение остаточного аустенита в мартенсит.

Для сталей с содержанием углерода более 0,5 – 0,6% целесообразна обработка холодом при температуре ниже 0 °С. Обработка холодом – часть общего цикла термообработки, проводится немедленно после закалки (пока аустенит не стабилизировался).

Охладители:

1. Сухой лед (смесь твердой углекислоты с ацетоном).
Температура – минус 78 °С).
2. Жидкий азот (-196 °С).
3. Холодильные установки.

7.2.5. Поверхностная закалка – термическая обработка, заключающаяся в нагреве поверхностного слоя детали выше A_{c3} для доэвтектоидной и A_{c1} для заэвтектоидной стали с последующим охлаждением с целью получения мартенсита в указанном слое. Способы нагрева: индукционный ТВЧ, лазерный, пламенно-газовой горелкой.

В результате получается поверхностный слой большой твердости с сохранением вязкой сердцевины детали. Это обеспечивает износостойкость и высокую динамическую прочность деталей: шестерен (зубья закаливают), коленчатых валов (поверхность шеек) и т.д.

7.3. Отпуск стали

Отпуск стали – термическая обработка, заключающаяся в нагреве закаленного изделия ниже A_{c1} для перевода неравновесной структуры в более равновесную.

При этом:

- снижаются (устраняются) внутренние напряжения;
- уменьшается хрупкость закаленной стали;
- получается требуемая структура и механические свойства.

Различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск – нагрев до температуры не более 250 °С, выдержка и последующее охлаждение. Здесь скорость охлаждения структуру не изменяет.

При этом из раствора выделяется углерод, параметры решетки мартенсита приближаются к единице, углерод образует метастабильный карбид, отличающийся от цементита. Его обозначают ϵ - карбид, он имеет гексагональную решетку и формулу близкую к Fe_2C .

Таким образом, при низком отпуске получается так называемый *отпущенный мартенсит* (смесь пересыщенного α - раствора неоднородной концентрации и еще не обособившихся частиц карбида).

За счет уменьшения тетрагональности мартенсита частично снимаются внутренние напряжения, твердость почти не снижается (износостойкость высокая); повышается ударная вязкость и пластичность. Низкотемпературный отпуск проводят для режущего и измерительного инструмента.

Средний отпуск – предусматривает нагрев до $350 - 450$ °С и охлаждение для получения структуры *троостита отпуска*.

Избыточный углерод диффузионно полностью выделяется из α – раствора, при этом снимаются внутренние напряжения. Одновременно с этим карбид обособляется и превращается в укрупненные частицы цементита. В целом образуется мелкодисперсная смесь феррита с цементитом – *отпущенный троостит*. Твердость его ниже, чем мартенсита отпуска, но значительно повышается упругость. Так отпускают пружины, рессоры, зубила и штампы.

При отпуске углеродистых, а также некоторых легированных сталей от 300 °С, а последних ещё и от 550 °С, наблюдается снижение ударной вязкости из-за образования неоднородной структуры – это так называемая *отпускная хрупкость* (соответственно I и II рода). Отпускную хрупкость II рода можно избежать быстро охлаждая сталь от 550 °С.

Высокий отпуск – выполняют путем нагрева до 550 ± 100 °С. При такой температуре укрупняются и округляются (коагулируют) частицы феррита и цементита. Получается структура *отпущенный сорбит*.

Твердость ниже, меньше внутренние напряжения, прочность высокая, пластичность и вязкость значительно возрастают.

Благодаря такому удачному сочетанию свойств закалку с последующим высоким отпуском называют **улучшением стали**. Этой операции подвергают шатуны, коленчатые валы и другие сложно нагруженные детали.

7.4. Термомеханическая обработка

Термомеханическая обработка заключается в нагреве до температуры выше A_{c3} ; выдержке, пластической деформации аустенита и быстром охлаждении.

Различают два способа термомеханической обработки:

ВТМО – высокотемпературная термомеханическая обработка;

НТМО – низкотемпературная термомеханическая обработка.

При ВТМО пластически деформируют (на 20-30%) сталь, нагретую до аустенитного состояния и затем охлаждают (закачивают). При наклепе аустенита создается мелкоблочное строение, что позволяет получить мартенсит тонкого строения.

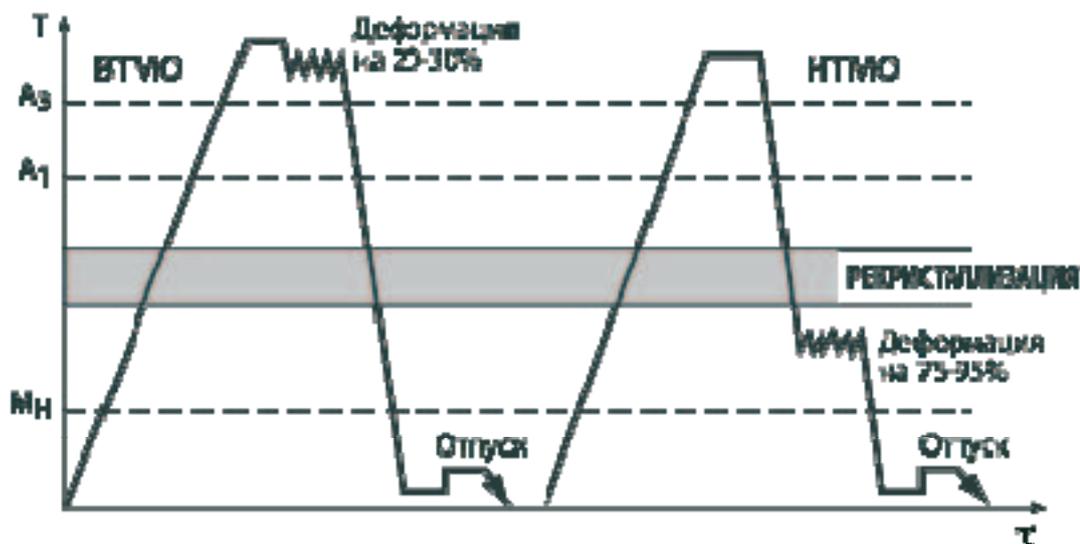


Рис.9. Схемы ТМО

При НТМО осуществляют нагрев выше температуры точки A_{c3}; охлаждение до температуры относительной устойчивости аустенита, но ниже температуры рекристаллизации; пластическое деформирование (на 75-95%), закалку.

Деформации большими обжатиями приводят к сильному увеличению плотности дислокаций в аустените, сохраняющейся и в мартенсите.

Таблица 2. Механические свойства стали 40 после термообработки

Вид обработки	σ_b , МПа	δ , %
ТО (закалка)	1400	2
ВТМО	2100-2700	5-8
НТМО	2400-2900	7-9

7.5 Основы химико-термической обработки стали

ХТО – поверхностное насыщение стали химическим элементом путем его диффузии при высокой температуре. ХТО – процесс, сочетающий тепловое и химическое воздействие на поверхностный слой.

ХТО имеет преимущества по сравнению с поверхностной закалкой (например, ТВЧ) :

- оборудование не зависит от внешней формы изделия – универсальное;
- обеспечивает большую разность между свойствами поверхности и сердцевины, но она более трудоемка (менее производительна).

При химико-термической обработке деталь помещают в среду, богатую определенным элементом, который диффундирует в металл.

В случае применения газа (наиболее часто практикуемого способа) процесс включает три элементарные стадии:

1. диссоциация - выделение диффундирующего элемента (N, C ...) в атомарном состоянии (так как только в таком виде он проникает в металл);

2. адсорбция - контактирование атомов элемента с поверхностью металла и растворение в ней;

3. диффузия атомов насыщающего элемента в глубь металла.

Глубина проникновения зависит от температуры процесса, концентрации элемента, продолжительности насыщения, скорости диффузии. В зависимости от задач обработки : повышение твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости и других свойств выбирают нужные элементы. Это могут быть : углерод, азот, хром, алюминий, кремний и другие.

Соответствующие процессы называют.

При насыщении:

азотом- азотирование ;

углеродом – науглероживание (цементация);

углеродом и азотом – цианирование.

Диффузионная металлизация (поверхностное насыщение стали металлами):

хромом – хромирование;

алюминием – алитирование;

бором – борирование;

(бороазотирование

бороалитирование

бороцианирование);

титаном – титанирование.

Насыщение неметаллами:

кремнием – силицирование;

серой – сульфидирование.

Лекция 8. Легированные стали. Порошковые твердые сплавы

- 8.1. Теория легирования.
- 8.2. Классификация и маркировка легированных сталей.
- 8.3. Конструкционные, инструментальные и стали с особыми свойствами.
- 8.4. Порошковые твердые сплавы.

8.1. Теория легирования

Легированными называют стали, которые содержат помимо обычных составляющих (C, Si, Mn, S, P) другие (легирующие элементы) либо кремний и марганец в повышенном количестве (0,6-1,2 и до 2% соответственно).

Легирование (нем. legieren – сплавлять) – сплавление стали со специальными элементами для получения особых свойств, что специально делают при производстве, вводя ферросплавы или лигатуры (вспомогательные сплавы).

Для легирования широко применяют: Cr, Ni, Si, Mn, V, W, Mo, Ti, Al, Cu. Легируют одним или несколькими элементами. При суммарном содержании таких добавок до 2,5 % сталь относят к низколегированной, от 2,5 до 10 - среднелегированной, более 10%- высоколегированной. Если композиция содержит более 50% легирующих элементов, то это будет сплав, но не сталь.

Взаимодействие легирующих элементов с железом

Металлы образуют с железом твердые растворы – т.е. сплавы, сохраняющие при переходе в твердое состояние однородность – один тип атомно-кристаллической решетки. Хотя химических элементов несколько, зерна имеют однородный состав, представляющий собой твердую фазу (однофазный раствор, в отличие от механической смеси – смеси фаз).

Таким образом, металлический легирующий элемент с железом образует комплексную решетку. В зависимости от соотношения атомных радиусов возможны различные виды растворов:

при близких значениях – растворы замещения:

неограниченные – если разница до 10%,

ограниченные – если разница 10 – 20%.

При разнице свыше 20% образуются растворы внедрения.

В растворах решетка искажается. Атомно-кристаллическая ячейка – куб приобретает неправильную форму из-за разных размеров атомов. Сильнее искажения в растворах внедрения. Искажения приводят к увеличению твердости, прочности.

Взаимодействие легирующих элементов с углеродом

Большинство из них образуют с углеродом карбиды, т.е. твердые, прочные соединения. Карбиды образуют: Mn, Cr, W, V, Mo, Ti и др. При небольшом содержании карбидообразующие элементы растворяются в цементите с образованием легированного цементита по общей формуле $(Fe, M)_3C$.

Например, $(Fe, Cr)_3C$ – если растворен хром, $(Fe, Mn)_3C$ – если растворен марганец.

При увеличении содержания карбидообразующего элемента образуются самостоятельные карбиды данного элемента с углеродом, так называемые специальные карбиды, например, VC, TiC, W₂C.

В стали имеются сложные карбиды (Cr, Fe)₇C₃.

Вольфрам и молибден при концентрациях, превышающих предел насыщения цементита образуют двойные карбиды: Fe₃W₃C (Fe₂W₂C), Fe₃Mo₃C (Fe₂Mo₂C).

Карбиды легирующих элементов обладают более высокой твердостью, чем карбид железа Fe₃C.

Вывод I: при легировании за счет искажения решетки Fe_α в твердом растворе, а также за счет образования карбидов повышается твердость и прочность сплава.

Разные легирующие элементы по разному влияют на механические свойства феррита (рис.1).

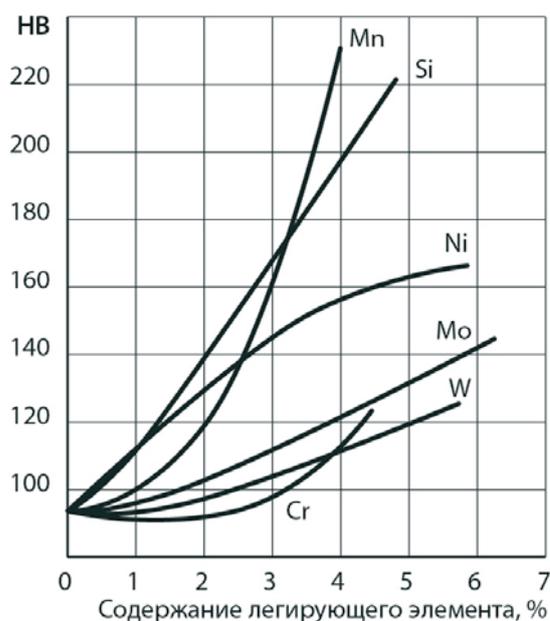


Рис.1 Влияние легирующих элементов на твердость феррита

Так, марганец и кремний значительно повышают твердость, но резко снижают ударную вязкость, молибден и ванадий незначительно повышают твердость и снижают ударную вязкость, хром мало влияет на твердость и ударную вязкость, но упрочняет сталь. Наиболее благоприятное влияние оказывает никель, который, повышая твердость, не снижает ударную вязкость.

Почти все легирующие элементы изменяют температуру полиморфных превращений железа, температуру эвтектоидной и эвтектической реакций, влияют на растворимость углерода в аустените.

По влиянию на температуру A₃ (линия GS) и A₄ легирующие элементы разбивают на две группы (рис. 2).

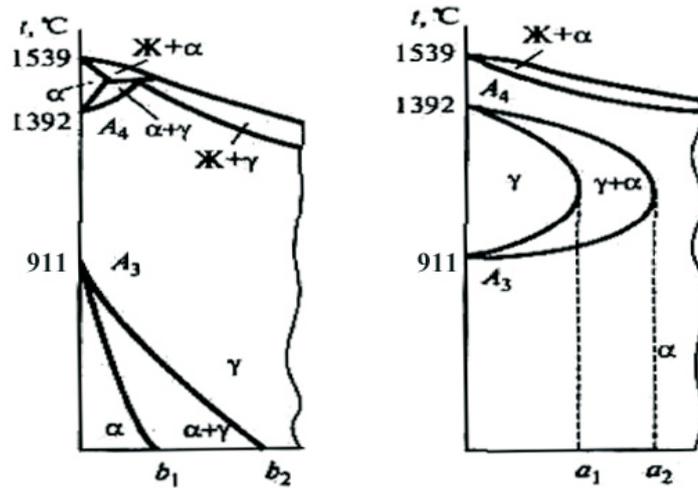


Рис. 2. Влияние легирующих элементов на температуры A_3 и A_4

Первая группа (группа никеля) – элементы, понижающие температуру A_3 и повышающие температуру A_4 (расширяющие γ -область): Ni, Co, Cu, Mn, C, N.

Вторая группа (группа хрома) – элементы, повышающие температуру A_3 и понижающие температуру A_4 (сужающие γ – область): Cr, V, W, Si, Ti, Mo.

В сплавах Fe с Ni, Mn, Co γ -область «открывается», т.е. в определенном интервале температур существует неограниченная растворимость компонентов друг в друге в твердом состоянии.

При этом температура A_3 при определенной концентрации добавки понижается ниже нуля.

Сплавы, имеющие устойчивую ГЦК решетку при температуре 20-25 °С называют *аустенитными* сталями

Элементы второй группы сужают температурный интервал устойчивости аустенита и, соответственно, расширяют интервал устойчивости Fe_α – феррита.

Все элементы этой группы образуют диаграмму с замкнутой γ -областью. Концентрация соответствующая максимальной растворимости элемента невелика и лишь для хрома простирается до 12%.

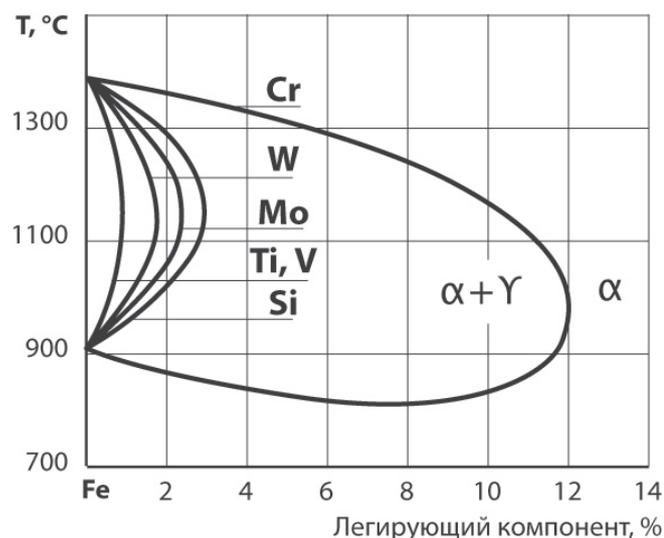


Рис. 3. Предельная растворимость элементов группы Cr в железе

«Открытая» α -область (неограниченные растворы) имеет место только для Cr и V, остальные элементы образуют с железом промежуточные фазы: образуют ограниченные растворы (двухфазная область: α + соединения).

Однофазные легированные стали с ОЦК решеткой, устойчивой при всех температурах вплоть до солидуса называют *ферритными* сталями.

Легированные элементы влияют на эвтектоидную температуру - критическая точка A_1 ; на положение точки S (содержание C % в эвтектоиде); на положение точки E (максимальная концентрация C % в Fe_γ).

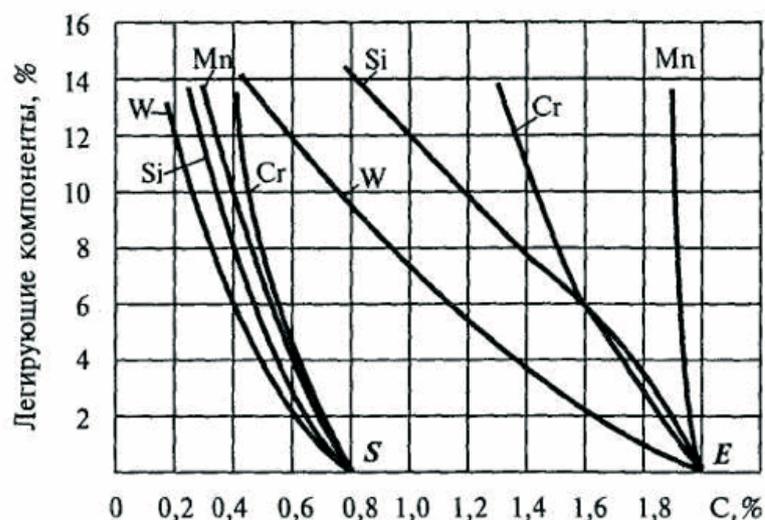


Рис. 4 Влияние легирующих элементов на положение точек S и E

Элементы, сужающие γ -область, повышают критическую точку A_1 ; элементы, расширяющие γ -область, понижают критическую точку A_1 .

Точка S сдвигается влево при любом легирующем элементе. Точка E сдвигается влево, особенно в сталях, легированных элементами, сужающими γ -область. Смещение точек E и S приводит к появлению в стали ледебурита, структуры характерной для чугунов. Однако он ковкий. Стали ледебуритного класса – высокоуглеродистые, высоколегированные сплавы.

Легированные элементы оказывают очень большое влияние на изотермический распад аустенита.

Все элементы (кроме Co, он ускоряет) замедляют изотермический распад аустенита и тем самым снижают критическую скорость закалки, это имеет огромное практическое значение, так как дает возможность применять менее интенсивный охладитель.

Для легированных сталей основным охладителем является масло. Чем больше легирующих элементов, тем сильнее укрепляется решетка аустенита, тем ниже возможная скорость закалки. Можно получить сталь, которая закаливается на мартенсит на воздухе (быстрорежущие стали – самокалы).

Легированный мартенсит в сталях, закаливаемых в масле, гораздо устойчивее мартенсита углеродистых сталей. Поэтому для него низкий отпуск обес-

печивается не при 100 – 200 °С, а при 200 – 300 °С, а иногда и при 600 °С, средний и высокий отпуск требуют еще более высоких температур.

Поэтому легированная сталь красностойка (способна сохранять твердость при высоких температурах). Например, резцы из У10, У12 при $T = 100 - 200$ °С отпускаются, а из легированной стали работают при нагреве до 600 °С.

Очевидно, замедление скорости охлаждения при закалке обеспечивает закаливаемость стали на большую глубину – прокаливаемость. Чем критическая скорость закалки меньше, тем прокаливаемость больше.

Второй вывод- **увеличение прокаливаемости** – вторая главная цель легирования.

Но преимущества легированных сталей по сравнению с углеродистыми заключаются не только в более высоких механических свойствах, легированием можно изменять и физико-химические свойства: например, добавлением Cr – получить нержавеющую сталь, Si – жаростойкую, Ni – с высоким электропроводением.

Таким образом, третья важная цель – **получение особых свойств сталей**.

8.2. Классификация и маркировка легированных сталей

8.2.1. Классификация сталей

Легированные стали классифицируются по четырем признакам:

- равновесной структуре,
- структуре после охлаждения на воздухе,
- составу,
- назначению.

Классификация по равновесной структуре:

1. доэвтектоидные стали, содержащие П + Ф
2. эвтектоидные – перлитная структура,
3. заэвтектоидные – имеющие в структуре избыточные (вторичные) карбиды,
4. аустенитные,
5. ферритные,
6. ледебуритные – имеющие первичные карбиды, выделившиеся из жидкости.

Классификация по структуре после охлаждения на воздухе.

Учитывая структуру, получаемую после охлаждения на спокойном воздухе образцов небольшой толщины, выделяют три основных класса сталей:

- перлитный,
- мартенситный,
- аустенитный.

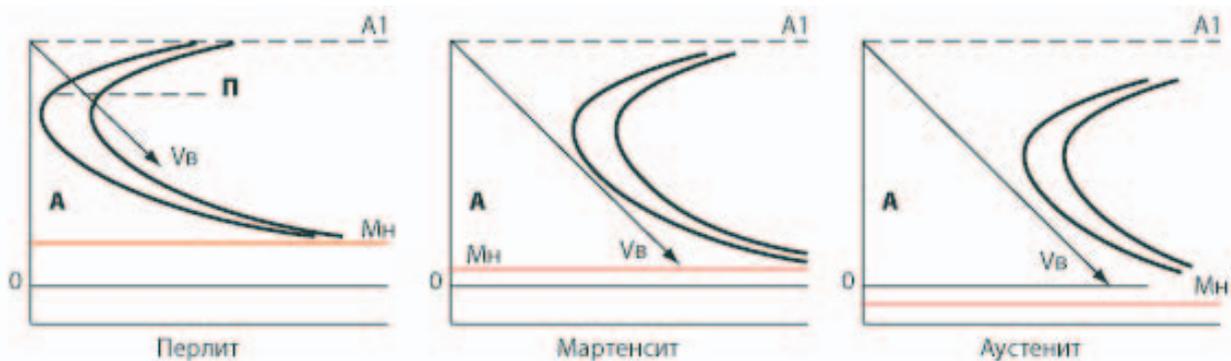


Рис. 5. Диаграмма распада аустенита легированных сталей

Получение стали различной структуры обусловлено тем, что устойчивость аустенита в перлитной области с увеличением содержания легирующих элементов возрастает, а область мартенситного превращения понижается.

Для легированных сталей перлитного класса (как и для углеродистых) кривая охлаждения на воздухе пересекает область перлитного распада и дает ферритно-цементитную смесь: перлит, сорбит или троостит.

У сталей мартенситного класса область перлитного распада сдвинута значительно вправо и скорость охлаждения на воздухе обеспечивает переохлаждение аустенита до начала мартенситного превращения. Дальнейшее увеличение содержания углерода и легирующих элементов наряду со значительным сдвигом вправо области перлитного распада, снижает точку начала мартенситного превращения, переводя ее в область отрицательных температур. В этом случае охлажденная на воздухе сталь сохранит аустенитное состояние.

Классификация по составу.

В зависимости от состава легированные стали называют:

Н – никелевые, Х – хромистые, ХН – хромоникелевые, ХВГ - хромовольфрамомарганцовистые.

Классификация по назначению.

- *конструкционная сталь* – сталь для изготовления деталей машин:

- цементируемые,
- улучшаемые.

Машиностроительные специализированные:

- шарикоподшипниковые,
- пружинные,
- автоматные.

- *инструментальные стали* – стали для изготовления режущего, измерительного и другого инструмента:

- углеродистые,
- легированные,
- быстрорежущие;
- штамповые.

- стали и сплавы с особыми свойствами – обладающие какими-то резко выраженными свойствами:

- нержавеющие,
- жаропрочные,
- износостойкие,
- с особыми магнитными свойствами,
- с особыми электрическими свойствами,
- с особыми тепловыми свойствами.

8.2.2. Маркировка легированных сталей.

В России действует буквенно-цифровая система маркировки по ГОСТ 4543 – 71, определяющая *химический состав* стали.

При этом легирующие элементы обозначаются русскими буквами:

1. Азот (N) –	А	9. Кремний (Si) –	С
2. Вольфрам (W) –	В	10. Фосфор (P) –	П
3. Молибден (Mo) –	М	11. Ванадий (V) –	Ф
4. Кобальт (Co) –	К	12. Марганец (Mn) –	Г
5. Никель (Ni) –	Н	13. Медь (Cu) –	Д
6. Титан (Ti) –	Т	14. Бор (B) –	Р
7. Хром (Cr) –	Х	15. Алюминий (Al) –	Ю
8. Цирконий (Zr) –	Ц	16. Ниобий (Nb) –	Б

Первые цифры в марке стали обозначают среднее содержание углерода в долях процента: в *сотых* – для конструкционных сталей, в *десятых* – для инструментальных.

Если цифр в начале нет (марка начинается с буквы), то углерода $\approx 1\%$.

Цифры после букв указывают на содержание данного легирующего элемента в %, а если его до 1-1,5%, то цифра не ставится.

Примеры.

Конструкционные стали:

12Г2 – марганцовистая: $\sim 0,12\%$ С, $\sim 2\%$ Mn,

08Х17Т – хромотитановая,

40Х – хромистая,

30ХГС – хромокремнемарганцевая.

Если имеется азот: 14Г2 АФ, буква А в середине марки.

Инструментальные стали:

Х – хромистая: $\sim 1\%$ С и $\sim 1\%$ Cr.

9ХФ – хромованадиевая: $\sim 0,9\%$ С.

13ХФ $\sim 1,3\%$ С

(Сравни У9)

(У13)

В конце марки конструкционной стали ставится буква «А», если она высококачественная, например, 35 ХМЮА.

Инструментальные легированные стали и с особыми свойствами всегда высококачественные и индекс А не ставится.

В некоторых марках стали в начале обозначения ставят буквы, указывающие на их применение:

А – автоматные (А20, А15),

Ш – шарикоподшипниковые (ШХ 15, ШХ9)

Э – электротехнические,

Р – быстрорежущие (Р18 - ~ 18% W; Р9; Р6М5).

8.3. Конструкционные, инструментальные и стали с особыми свойствами

Листовая сталь для холодной штамповки.

Преимущественно применяются тонколистовая сталь 08кп (С ~ 0,05 – 0,11%, Si ≤ 0,03%). И углерод и кремний снижают способность к вытяжке, поэтому допускается их низкое содержание.

Цементуемые (низкоуглеродистые) стали.

- углеродистые (сталь 10, 15, 20) применяются для деталей небольших размеров, работающих на износ при малых нагрузках (втулки, валики, оси, шпильки и др.). Термообработка: цементация, закалка в воде, низкий отпуск.

- легированные применяются для тяжело нагруженных деталей. Детали небольших и средних размеров, работающие на износ при повышенных нагрузках (втулки, валики, оси, поршневые пальцы): 20Х, 15ХФ, 12ХН2. Детали средних и больших размеров (зубчатые колеса, ролики, поршневые пальцы) - 12ХНЗА, 18ХГТ, 18Х2Н4.

Улучшаемые (среднеуглеродистые) стали.

(С ~ 0,35 – 0,45%, легирующих элементов до 3-5% в легированных сталях).

Эти стали часто улучшают (закалка + высокий отпуск), в структуре - сорбит отпущенный.

- Углеродистые (стали 35, 40, 45) – для деталей повышенной прочности (шатуны ДВС, штуцеры, пальцы рессор),

- легированные:

-хромистые (40Х, 45Х) - коленчатые валы, шестерни. Закалка в масле, высокий отпуск;

-хромомарганцевые (30ХГСА, 35ХГСА - хромонсиль), не содержат дефицитных элементов.

Если они не удовлетворяют, то применяют стали:

- хромоникелевые (40ХН, 45ХН), которые имеют высокую прочность (от хрома) и пластичность (от никеля), а также хорошую сопротивляемость ударным нагрузкам.

- хромоникельмолибденовые (40ХН2МА, 38ХН3МА), которые имеют высокую усталостную прочность, очень хорошую прокаливаемость.

Пружинно – рессорные стали.

Основное требование – высокий предел упругости, который достигается средним отпуском ($T \sim 300 - 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$) закаленных сталей определенного состава: стали 65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 65Г, 70Г – для работы при температуре до $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 55С2, 60С2, 70С3А – для изделий сечением до 18мм; 50ХФА, 50ХГФА – для работы при температуре до $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 60С2ХА - прокаливаемость сечения до 50 мм,

Шарикоподшипниковые стали.

Основные требования: устойчивость к усталостному изнашиванию (из-за циклических контактных напряжений) и истиранию. Высокое содержание углерода и хром обеспечивают получение после закалки высокой равномерной твердости, устойчивости против истирания.

Основная шарикоподшипниковая сталь ШХ 15.

Термическая обработка:

1. Отжиг сфероидизирующий на мелкозернистый перлит,
2. Закалка от $830 - 840 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в масле,
3. Отпуск при температуре $150 - 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 – 2 часов.

Структура: мелкоугольчатый мартенсит отпуска с равномерно распределенными карбидами (HRC 62 – 65).

Высокомарганцовистая износостойкая сталь Г13Л (сталь Гадфильда).

Состав: С ~ 1,0 – 1,4 %, Mn ~ 11 – 14%.

Сталь аустенитная с относительно низкой твердостью (НВ 200 – 250). При работе деталей происходит интенсивное упрочнение (рис.6) - повышается износостойкость, но сохраняется высокая вязкость и пластичность.

Изделия: гусеничные траки, детали землечерпалок и ковшей, трамвайные стрелки, которые получают литьем, затем шлифуют.

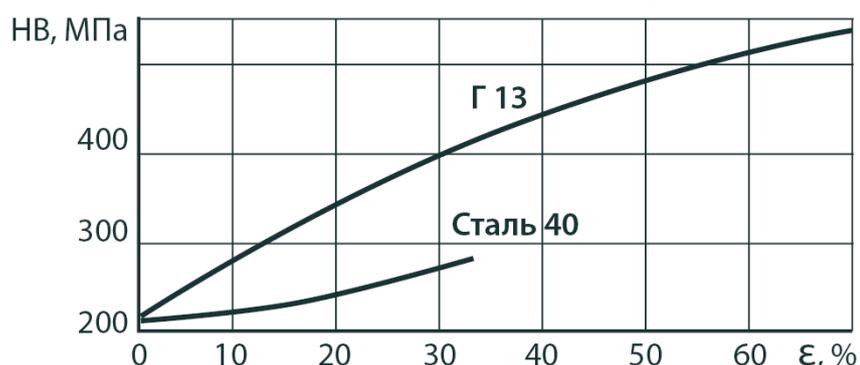


Рис.6. Влияние наклепа на твердость стали Г13 и стали 40

Термическая обработка: закалка от $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в воде. При этом задерживается выделение карбидов и образуется чисто аустенитная структура. При работе на износ с ударами (давлением) происходит наклеп аустенита двойникованием. Двойники препятствуют движению дислокаций – и потому упрочняют сталь, в то же время, двойники вызывают релаксацию внутренних напряжений, чем предотвращают образование трещин.

Инструментальные стали.

Стали для измерительных инструментов.

Основные требования: высокая твердость, износостойкость, стабильность размеров. Широко применяются доэвтектодные низколегированные стали X, ХГ, 50, 55 (закаливаемые ТВЧ), листовые стали 15, 20 15X (цементуемые).

Термообработка проводится так, чтобы затруднить процесс старения, т.е. обеспечить стабилизацию напряженного состояния, стабилизацию мартенсита и остаточного аустенита. Чтобы уменьшить (исключить) частичный распад мартенсита, обрабатывают холодом (при $T = -50 \dots -80 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Чтобы уменьшить количество остаточного аустенита закаливают с более низкой температуры.

Штамповые стали.

Основные требования к штампам холодной штамповки: высокая твердость, прочность, износостойкость, иногда вязкость.

Применяются стали инструментальные:

- углеродистые У10, У11, У12 для штампов небольших размеров ($D = 25 - 30$ мм), простой формы, для легких условий работы;
- низколегированные X, ХВГ, 9ХС, ХВСГ для штампов больших размеров ($D = 75 - 100$ мм), более сложной формы, более тяжелой работы.
- высоколегированные Х12Ф4М, Х6ВФ для штампов, работающих с большими ударными нагрузками.

Требования к штампам горячего деформирования: прочность, износостойкость, вязкость и прокаливаемость, окалиностойкость (жаростойкость) и разгаростойкость (устойчивость к образованию поверхностных трещин).

Разгаростойкость обеспечивается снижением содержания углерода в стали, что повышает пластичность, вязкость, теплопроводность. Поэтому применяют углеродистые легированные стали 5ХНМ, которые после закалки подвергают отпуску при $550 - 680 \text{ }^{\circ}\text{C}$ на структуру троостита или троостосорбита.

Стали для режущего инструмента.

Основные требования для сохранения режущей кромки: высокая твердость, износостойкость, теплостойкость (красностойкость), прочность на изгиб, вязкость – удельная работа разрушения при ударном изгибе.

Режущий инструмент изготавливают из углеродистых, легированных, быстрорежущих сталей и специальных сплавов.

Углеродистые стали: заэвтектоидные качественные У9, У10, У11, У12, У13 и высококачественные.

Основная структура – зернистый перлит (сетка Fe_3C не допускается) получается после отжига (неполного).

Для повышения твердости – закалка в воде с $770-810 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (прокаливаемость – до диаметра 10-12 мм; структура: мартенсит и цементит; HRC 60-64).

Отпуск – в зависимости от назначения инструмента, при температурах $\sim 160-210 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Режим работы не должен обеспечивать нагрев $> 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, так как теплостойкость не превышает $240 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Легированные стали:

- имеют большую прокаливаемость,
- меньший размер зерна,
- меньшую деформацию (при закалке охлаждение в масле),
- большую прочность,
- лучшие режущие свойства.

Быстрорежущие стали предназначены для режущего инструмента, работающего в тяжелых условиях. Это сложнелегированные стали, износостойкие, высокотеплостойкие (до 620 – 640 °С). Высокую теплостойкость придают ванадий и кобальт. Марки: P12, P18 и др.

8.4. Порошковые твердые сплавы

Спеченные твердые сплавы – материалы, состоящие из высокотвердых и тугоплавких карбидов вольфрама, титана, тантала, соединенных металлической связкой (кобальт).

Изготовление методом порошковой металлургии: порошки карбидов смешивают с порошком кобальта, прессуют и спекают при 1400 – 1550 °С. При спекании кобальт растворяет часть карбидов, плавится и связывает оставшиеся карбиды в плотный (пористость $\leq 2\%$) материал, состоящий на 80 – 95% из карбидных частиц.

Твердые сплавы выпускают в виде пластин, которые напаивают (обычно медью) на резцы, сверла, фрезы и др. инструменты. Они сочетают высокую твердость HRC 74 – 76 и износостойкость с высокой теплостойкостью (800 – 1000 °С).

В зависимости от состава карбидной основы спеченные твердые сплавы бывают трех групп:

- *вольфрамовая группа* системы WC – Co маркируется буквами: BK и цифрами, указывающими на процентное содержание кобальта: BK 3, BK8 – резцы для чугуна, цветных металлов, керамики (кобальта до 8% и остальное WC), BK20, BK 25.

- *титановольфрамовая* - сплавы системы TiC – WC – Co: T30K4, T15K6 (TiC ~ 15%, Co ~ 6%, остальное WC).

- *титанотанталовольфрамовая* - сплавы системы TiC – TaC – WC – Co: TT7K12, TT8K6, более прочные сплавы, меньше выкрашиваются, предназначены для наиболее тяжелых условий работы: черновое точение стальных слитков, поковок, отливок.

ЛЕКЦИЯ 9. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

9.1. Цветные металлы и их применение.

9.2. Медь и ее сплавы.

9.3. Алюминий и его сплавы.

9.4. Антифрикционные сплавы.

9.5. Электротехнические материалы.

9.1. Цветные металлы и их применение

Цветные металлы: Cu, Al, Mg, Ti, Pb, Zn, Sn обладают ценными свойствами, поэтому широко применяются в промышленности, но из-за дороговизны, когда возможно заменяются другими материалами, например, пластмассами.

Сплавы легких металлов Al, Mg, Ti могут в 2-3 раза облегчить станки и машины, в 10 раз сократить расходы на ремонт.

Цветные металлы применяются:

- в чистом виде,
- в виде сплавов,
- для покрытия других материалов.

Способы покрытия: диффузионный, гальванический, горячий (нанесение тонкого слоя легкоплавких металлов, например, лужение оловом, оцинкование железа и т.д.), термомеханическое покрытие (получение биметаллов совместной горячей прокаткой, например, сталь защищают медью, алюминием – наиболее надежный способ защиты от коррозии).

Относительная стоимость металлов

Fe - 1	Cu - 8	W - 120
Pb - 2,5	Mg - 8	Ag - 500
Zn - 3	Ni - 17	Au - 11000
Al - 6	Ti - 90	Pt - 27000

9.2. Медь и ее сплавы

Медь используется человеком очень давно – после каменного века, так как встречается в самородном виде. В земной коре ее немного (около 1%), но в рудах содержится до 5%. Человек научился обрабатывать самородную медь, а затем бронзу, отсюда истоки металлургии,ковки и литья.

По своим свойствам медь близка к серебру и золоту – полублагородный металл. Цвет- красновато-розовый, плотность $\gamma = 8,9 \text{ г/см}^3$, пластичный, коррозионностойкий, электро- и теплопроводный, предел прочности $\sigma_b = 220 \text{ МПа}$, НВ35 (Fe имеет НВ80), $\delta = 60\%$. Кристаллическая решетка ГЦК, мономорфна (не меняет формы).

Технологические свойства: хорошо прокатывается (ленты, листы, проволока), хорошо паяется и сваривается.

Марки чистой меди и ее назначение

Марка Cu, %	M00 99,99	M0 99,95	для проводников тока	
Марка Cu, %	M1 99,9	M2 99,7	M3 99,5	для деформируемых сплавов

Наличие примесей снижает пластичность, коррозионную стойкость, электро- и теплопроводность. Прокат из меди M1- для обмоточных проводов, кабелей- в отожженном состоянии; для подвесных (троллы и др.) и контактных проводов, коллекторных пластин – нагартованный.

Широко применяются медные сплавы: латуни и бронзы. Сплавы меди с цинком называются латунями, сплавы с любым другим металлом -бронзами.

9.2.1. Латуни

Цинк растворяется в меди и повышает ее прочность, но латуни хорошо обрабатывается резанием. Однородный α – твердый раствор замещения при $454 \text{ }^\circ\text{C}$ имеет концентрацию цинка до 39 %, при $905 \text{ }^\circ\text{C}$ цинка около 32 %

(рис. 1, а). Латунь однофазная – деформируемый сплав. Однофазные латуни при 30% цинка имеют максимальную пластичность ($\delta = 60\%$).

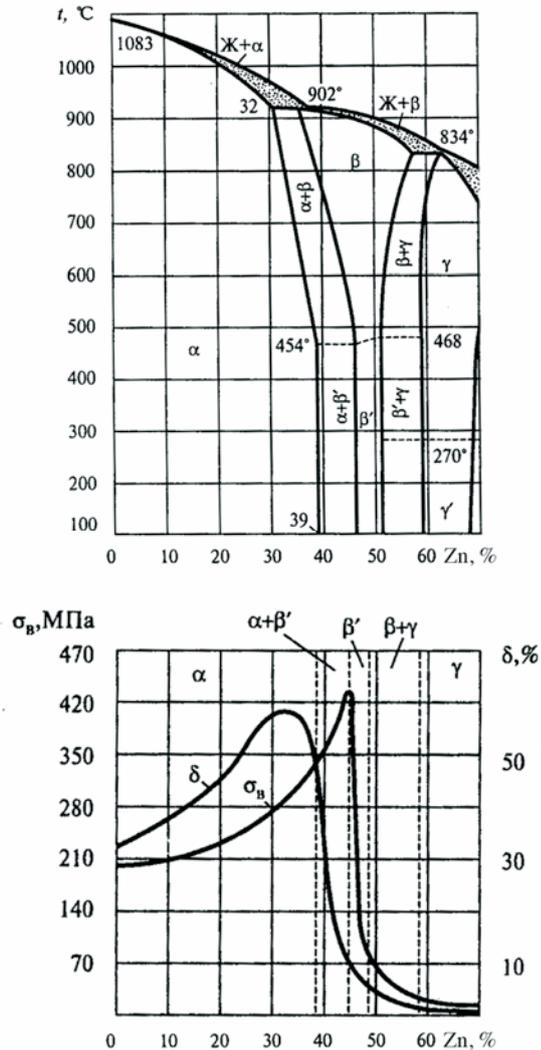


Рис. 1. Диаграмма состояния сплавов Cu-Zn и механические свойства литой латуни

Находят применение также латуни из смеси $\alpha+\beta$ кристаллов - двухфазные латуни (литейные сплавы) при содержании цинка от 39 до 45%.

В интервале 46-51% цинка в меди образуется β - твердый раствор на базе электронного соединения CuZn (соединение относительно малой пластичности, при 46% цинка $\delta = 7\%$ и $\sigma_B = 40\text{МПа}$).

Медноцинковые латуни в соответствии с ГОСТ 17711 – 80 выпускают марок: Л96, Л90 (томпак) Л85, Л80, Л75, Л70 (патронные), Л68...Л59. В марке указано процентное содержание меди, цинк – остальное. Томпак

(франц.-медь) имеет цвет золота, используется для ювелирных работ. Это простые двойные сплавы.

Латунь Л60 обрабатывается давлением только в горячем состоянии, остальные двойные – как с нагревом так и без него.

Многокомпонентные (специальные) сплавы применяются в зависимости от назначения. Компоненты обозначают следующими буквами:

А- алюминий,

О- олово,

Б- бериллий,

С –свинец,

К-кремний,

Ф – фосфор,

Мц - марганец,

Ц – цинк,

Н- никель,

Ж – железо.

Х- хром,

Например: ЛА 77-2 алюминиевый сплав (77% Cu, 2% Al, остальное Zn),

ЛО 70-1 – оловянистая латунь. Гайская латунь для чеканки монет 10 и 50 коп. ЛМц 58-2. Для высоко нагруженных изделий используют латуни и бронзы с кадмием и бериллием.

В таблице 1 указаны марки, механические свойства и назначение некоторых многокомпонентных деформируемых латуней.

Таблица 1 Свойства и назначение некоторых латуней

Марка сплава	σ_v , МПа	δ ,%	НВ	Примерное назначение
ЛА77-2	400	55	600	Конденсаторные трубы
ЛО70-1	350	60	590	Детали часов, автомобилей и тракторов
ЛС74-3	350	50	570	
ЛАЖМц66-6-3-2	650	7	1600	Литые массивные червячные винты
ЛКС80-3-3	350	20	920	Литые подшипники и втулки

В марках литейных латуней указывается содержание цинка и количество каждого легирующего элемента непосредственно за соответствующей буквой, например, ЛЦ40Мц3А. В литейных латунях обычно больше содержится цинка и других компонентов.

9.2.2. Бронзы

Применяют бронзы: алюминиевые, оловянистые (оловянные), бериллиевые (самые прочные), никелевые, свинцовистые, кремнистые.

Бронзы прочнее, устойчивее против коррозии, чем чистая медь, поэтому еще в древности из них изготавливали оружие, инструмент, сосуды, украшения. Они имеют хорошие литейные свойства – очень малую усадку (<1% для оловянистой бронзы, у чугунов и латуней около 1%, у сталей более 2%), поэтому очень сложные отливки как и художественное литье - из бронз. Лучшие художественные бронзы содержат 80-90% Cu, 3-8% Sn и 1-3% Pb.

Маркировка включает в себя буквы Бр, условное обозначение компонентов и их количество в % (содержание меди не указывается):

деформируемые БрОЦ 4-3 (Sn \approx 4%, Zn \approx 3%, остальное медь – оловянная бронза), БрБ 2 (Be \approx 2% - бериллиевая бронза); БрА5, БрАЖ9-4 – алюминиевые;

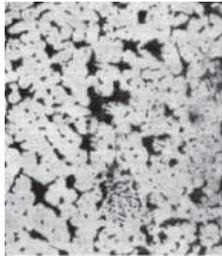


Рис. 2. Микроструктура литой бронзы БрС30 (светлые зерна Cu, темная эвтектика Cu + Pb)



Рис.3. Микроструктура литой бронзы БрБ2 (светлый α – твёрдый раствор и тёмные включения эвтектоида)

литейные БрОЦС4-4-2,5 – оловянная (с цинком и свинцом), БРС30 – свинцовистая - это подшипниковые бронзы. Микроструктура некоторых бронз показана на рис. 2 и 3.

В бронзы вводят: цинк для удешевления, заменители олова Al, Fe, Mn (сплав дешевле, но свойства хуже); свинец – для улучшения обрабатываемости резанием, фосфор для раскисления.

Бронза С30 имеет мягкую медную основу (светлый фон) с еще более мягкими включениями преимущественно свинца.

В оловянных бронзах мягкие дендриты α -фазы, богатые медью, способствуют приработываемости подшипников, а стойкость при истирании обеспечивают твердые междендритные включения с участками эвтектоида.

Бериллиевая бронза обладает высокой пластичностью и умеренной прочностью в закаленном состоянии ($\sigma_v=400-500$ МПа, $\delta=30-40\%$). Это состояние позволяет обрабатывать материал давлением (холодная прокатка лент, прессование тонкостенных пружинных деталей, изготовление искробезопасных контактов и т. д.)

После дисперсионного твердения при старении готовые детали приобретают высокие упругие свойства и прочность ($\sigma_{упр}=750-770$ МПа, σ_v свыше 1000 МПа, НВ до 400)

9.2.3. Медноникелевые сплавы

Двойные сплавы.

МН 95-5 (Ni+Co \approx 5%, остальное Cu),

МН 25 (Ni+Co \approx 25%) - листы, ленты, трубы, монеты.

Сплавы системы Cu-Ni-Al (куниали)

МНА 6-1,5 (Ni+Co \approx 6%, Al \approx 1,5) – электротехника: пружины и другие детали,

МНА 13-3 - машиностроение, детали повышенной прочности.

Сплавы системы Cu-Ni-Zn и Cu-Ni-Zn-Pb

МНЦ 15-20 (Ni+Co \approx 15%, Zn \approx 20, остальное Cu) – столовые приборы,

медицинский инструмент,

МНЦ 18-20 – проволока, пружины реле, столовые приборы,

МНЦС 16-29-1,8 - детали часовой промышленности.

Гайский сплав МН Мц 10-5 - монеты 1 и 2 руб.

Сплавы системы *Cu-Ni-Fe- Mn* (мельхиоры)

МНЖ 5-1 - листы, прутки, трубы, электротехнические детали.

МНЖ Мц 30-1-1 -пластины теплообменников, кондиционеры, опреснители; аппаратостроение.

9.3. Алюминий и его сплавы

9.3.1. Общие сведения.

Алюминий относится к группе материалов с малой плотностью, которые широко применяются в авиации, ракетной и космической технике, в автомобилестроении и транспортном машиностроении.

Алюминий – металл серебристо-белого цвета. В России в прошлые века его называли «глиний», так как он входит в состав глины. Предположение о наличии металла в глине высказал в 1808 г. англичанин Дэви, он и назвал его алюминием, а получил впервые датчанин Эрстед в 1825 г.

Небольшая плотность ($\gamma = 2,7 \text{ г/см}^3$), низкая температура плавления $T_{\text{пл}}=660 \text{ }^\circ\text{C}$, высокая пластичность и малая прочность: отожженный прокатанный алюминий высокой чистоты имеет следующие свойства: $\sigma_{\text{в}}=58 \text{ МПа}$, $\text{НВ } 25$, $\delta = 40\%$.

Алюминий как и медь имеет ГЦК решетку, не имеет аллотропических модификаций, обладает высокой тепло- и электропроводностью (65% от электропроводности меди). При равных значениях проводимости провод из алюминия легче медного.

Чистый алюминий применяется в быту (посуда), из него изготавливают фольгу пищевую и тару, электропроводники, рефлекторы и другие изделия.

Постоянные примеси (Fe, Si, Mn, Ti, Cu, Zn) понижают физико-химические характеристики и пластичность алюминия.

Таблица 2. Маркировка алюминия

Группа	Особой	Высокой	Технической чистоты
Алюминий, %	99,999	99,995...99,95	99,85; 99,8...99,0
Марка	A999	A995, A99, A97, A95	A85, A8, A7, A6, A5, A0

То есть в марке указывается число, стоящее после запятой (отделяющей от 99 целых) – тысячные, сотые, десятые доли процента – содержание алюминия.

Алюминий выпускается в виде чушек, слитков, из которых получают листы, профили, прутки, проволоку.

Сплавы алюминия более прочны и имеют хорошие технологические и эксплуатационные свойства.

Алюминиевые сплавы делят на две основные группы по следующим признакам:

- по технологии изготовления: деформируемые, литейные, спеченные;
- по способности к термической обработке: упрочняемые, не упрочняемые (рис 4.)

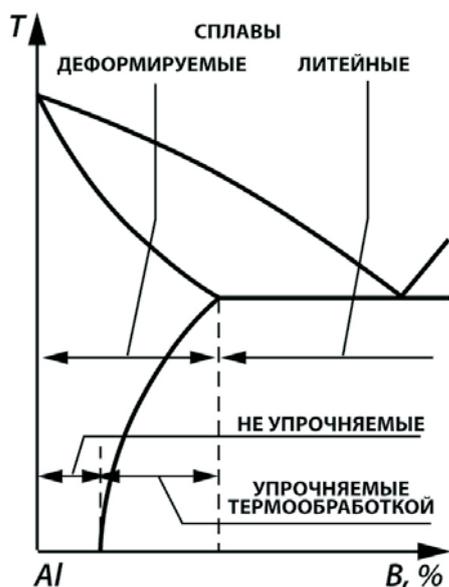


Рис 4 Классификация алюминиевых сплавов по диаграмме состояния алюминий - легирующий элемент

В зависимости от уровня прочности, технологических свойств, назначения алюминиевые сплавы подразделяют на сплавы высокой, средней и пониженной прочности; свариваемые, заклепочные, коррозионостойкие, криогенные, со специальными свойствами и другие.

Более подробная классификация сплавов представлена в таблице 3/9/.

Таблица 3. Основные группы алюминиевых сплавов

По технологии получения заготовок	Основные характеристики (свойства) сплавов	Состав	Марки
Деформируемые	Коррозионностойкие повышенной плотности	Al -Mn Al- Mg Al -Mg- Si	АМц АМг АВ, АД 33
	Среднепрочные	Al- Cu -Mg	Д 1, Д16
	Высокопрочные	Al -Zn -Mg -Cu	В 95
	Жаропрочные	Al-Cu-Mg-Fe-Ni Al-Cu-Mn	АК 4-1 Д 20, Д21
Литейные	Герметичные	Al-Si Al-Si-Cu-Mg	АЛ2, Ал4, АЛ9, АЛ4М, АЛ32
	Высокопрочные и жаропрочные	Al-Cu-Mn Al-Si-Cu-Mg	АЛ 19, АЛ3, АЛ5
	Коррозионностойкие	Al- Mg Al- Mg-Zn	АЛ8, АЛ27 АЛ24
Спеченные	Жаропрочные	Al- Al ₂ O ₃	САП-1, САП-2
	Высокопрочные	Al-Zn-Mg-Cu	ПВ 90
Композиционные	Армированные борным волокном	АД1 – Б.В. АД33 – Б.В.	ВК-1, ВК-2
	Армированные стальной проволокой	Основа: АД 1, АВ, проволока 18Х15Н5АМ3	КАС-1, КАС-1А

9.3.2. Деформируемые сплавы

Структура сплавов – однофазный твердый раствор (α) высокой пластичности.

Слитки подвергают горячей и холодной обработке давлением (прессованию, ковке, прокатке). Упрочнение и изменение свойств достигается нагартовкой, термомеханической и термической обработкой.

Маркировка деформируемых сплавов применяется в основном смешанная буквенно-цифровая, введена в стандарты и применяется для новых и ограничено для остальных сплавов цифровая система.

Примеры:

АК – ковочные сплавы (АК6, АК8),

АМц – сплавы с марганцем (АМц),

АМг – сплавы с магнием (АМг5, АМг6),

В – высокопрочные (В95, В96),

Д- дюралюмины.

Деформируемые не упрочняемые термообработкой сплавы легированы марганцем (АМц) и магнием – *магналии* (АМг). Цифра в марке – содержание соответствующего компонента (например, сплав АМг2 содержит около 2, АМг 3 около 3% магния и т.п.).

Сплавы с марганцем применяют для мало- и средненагруженных изделий, получаемых глубокой вытяжкой и сваркой (сварные баки и трубопроводы для бензина и масла, радиаторы тракторов и автомобилей, строительные конструкции).

Магналии:

сплавы АМг2 и АМг3 используют чаще в виде листов в сварных коррозионно устойчивых изделиях; из сплавов АМг5 и АМг 6 получают сварные емкости в том числе для криогенных условий.

Термически упрочняемые сплавы системы Al-Mg-Si:

АД31 – оконные витражи, дверные рамы, автомобильные детали;

АД33 – в судостроении, строительстве, авиации;

АВ – детали самолетов, двигателей, лопастей вертолетов.

Конструкционные сплавы типа дуралюмин

Широко применяемые сплавы системы Al-Cu-Mg - дур... или дюралюмины обозначают буквой Д с номером сплава Д1, Д16, Д18 и др.

Сплавы указанной группы применяют в строительстве, транспортном машиностроении и особенно в авиации (лонжероны, лопасти воздушных винтов, болты).

9.3.3. Термическая обработка дюралюминия.

В этих сплавах содержится 3,5-4,9 % Cu (в некоторых – от 2,2%), от 0,2 до 2,6 % Mg и другие элементы.

Максимальная растворимость меди в алюминии составляет 5,7% при 548°C (рис.5). Любой сплав с содержанием меди более 0,2% после нагрева и быстрого охлаждения можно перевести в однофазный пересыщенный раствор. В таком неустойчивом растворе происходят изменения, приводящие к выделению соединения CuAl_2 и снижению содержания меди до 0,2 % - количества соответствующего равновесной системе. Этот процесс называется старением.

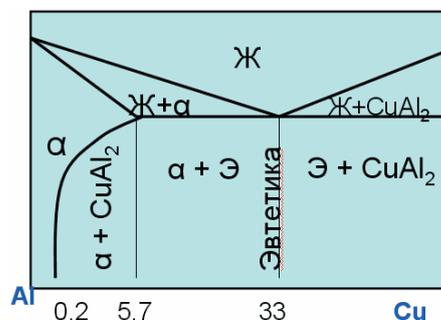


Рис. 5. Диаграмма состояния сплавов Al - Cu

Процесс, происходящий при комнатной температуре, называется *естественным* старением, при повышенной температуре – *искусственным*.

Вывод: Термическая обработка алюминиевых сплавов состоит из закалки и старения.

Кривая упрочнения (рис.6) при естественном старении сплава (Al + 4% Cu) показывает, что сразу после закалки предел прочности несколько выше, чем в отожженном состоянии (250 МПа против 200).

Вначале наблюдается весьма слабое повышение прочности. Этот период (2-3ч) имеет важное технологическое значение (можно проводить гибку, отбортовку закаленных деталей, расклепу заклепок). Затем способность пластически деформироваться резко уменьшается - эти операции становятся неосуществимыми. Прочность (при 20 °С) становится максимальной через 4-5 суток.

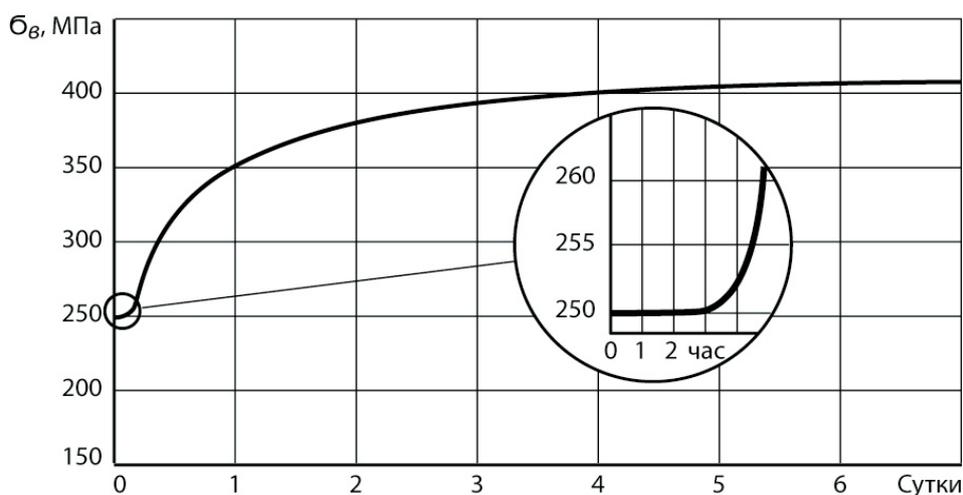


Рис. 6. Изменение прочности дюралюминия при естественном старении

С повышением температуры процесс старения ускоряется, однако максимальный предел прочности получается тем ниже, чем выше температура, при $T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдаются разупрочнение сплава.

При закалке цветных сплавов как и при закалке стали получается нестабильный пересыщенный твердый раствор с включениями другой фазы (химические соединения или элементы). Различие состоит в том, что твердый раствор при закалке стали имеет твердость максимальную, а твердые растворы цветных сплавов – минимальную.

В процессе естественного старения дюралюминия происходят подготовительные процессы к выделению 2-го компонента – интерметаллида.

I стадия: в пересыщенном твердом растворе атомы меди (расположенные в случайных местах) собираются в определенных местах кристаллической решетки в зоны повышенной концентрации - в кристалле возникают зоны Гинье-Престона (дискообразные скопления толщиной до 1 нм и диаметром до 10 нм).

В этих зонах параметр решетки иной, чем в местах обеденных медью. Это создает большие напряжения в кристалле и пластическую деформацию, которая дробит блоки мозаики, что приводит к повышению твердости сплава.

II стадия: дальнейшее развитие процесса старения заключается в увеличении зон Гинье-Престона (в 3-4 раза увеличиваются линейные размеры) и повышении содержания меди в них до стехиометрического соотношения. Этот процесс называется *зонным старением*.

Повышение температуры приводит к выделению промежуточной, а затем и окончательной стабильной фазы (CuAl_2), кроме того, зоны Гинье-Престона рассасываются и прочность получается ниже.

В простых сплавах Al-Cu с 3-5% меди (или в таких же сплавах с небольшим содержанием магния) процесс зонного старения протекает при комнатных температурах и приводит к максимальному упрочнению.

Дюралюминий - наиболее распространенный из алюминиевых сплавов, применяемых в деформированном виде и упрочняемых при термической обработке. Дюралюминий - первый промышленный сплав на основе алюминия. Название расшифровывается как «твердый сплав» (*dur* - твердый, *франц.*).

Если алюминий имеет предел прочности $\sigma_b = 40-60\text{ МПа}$, то дюралюминий – больше 350 МПа. Дюралюминий имеет незначительную коррозионную стойкость. Поэтому часто его плакируют чистым алюминием – покрывают поверхность термомеханическим способом при прокатке, прессовании. Толщина слоя – 4-8% от толщины листа или диаметра проволоки.

9.3.4. Литейные алюминиевые сплавы.

Маркировка литейных сплавов по ГОСТ 1583-93: буква **A** (основа Al), обозначения компонентов (К-кремний, Кд-кадмий, М-медь, Мг-магний, Мц - марганец и т. д.) и цифры (содержание компонентов).

Например, АК5М (Si \approx 5, Cu до 1,5%). При этом оставлена и старая маркировка АЛ (алюминиевый литейный сплав) с порядковым номером:

АЛ2 или АК12 – нормальный силумин;

АЛ5 (АК5М);

АЛ9М - (Si \approx 8%, Cu до 0,8 %);

АЛ34 (АК8) – с присадкой магния около 0,5%.

В качестве литейных алюминиевых сплавов применяются сплавы с Cu, Zn, Mg, но наибольшее распространение получили силумины. Силумины - сплавы с большим содержанием кремния.

Высокремнистые сплавы слабо упрочняются в результате закалки и старения. Механические свойства их можно повысить модифицированием.

Сплавы Al - Si имеют эвтектическую концентрацию 11,6%. Силумины с 12-13% кремния будут заэвтектическими (рис.7). Их структура (рис.8,а): грубая игольчатая эвтектика Al – Si и крупные иглы Si. Модифицирование сплава натрием (\approx 1%) сдвигает эвтектическую концентрацию до 14%. Тогда силумин с 12-13% кремния станет доэвтектическим. Структура его измельчается, так как снижается эвтектическая температура, и будет состоять из мелкозернистой эвтектики (темное поле) и первичных кристаллов Al (белые зерна на рис.8,б).

Таким образом, благодаря модифицированию повышают механические свойства силумина.

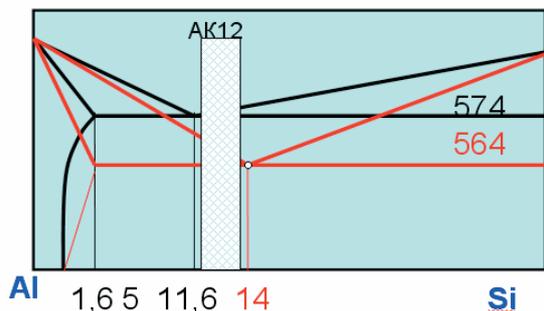


Рис. 7. Диаграмма состояния сплавов Al-Si

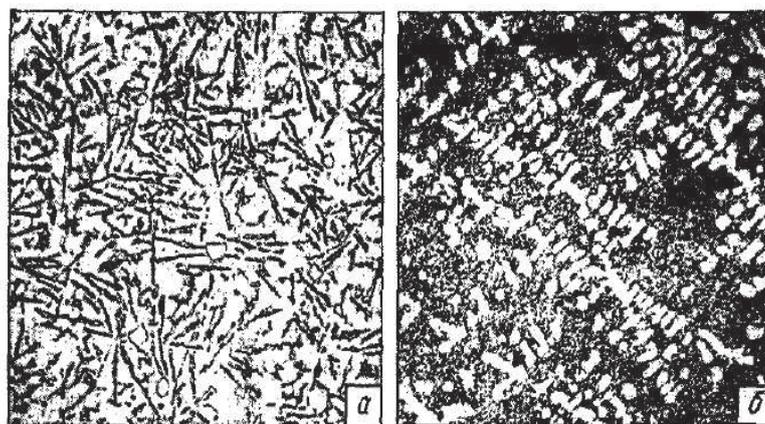


Рис. 8. Микроструктура силумина:

а) немодифицированного;

б) модифицированного

Таблица 4. Структура и свойства силумина АК-12

Показатели	Немодифицированный	Модифицированный
Содержание Si в эвтектике, %	11,6	~ 14
Сплав на диаграмме состояния Al-Si	Эвтектический или заэвтектический	Доэвтектический
Структура: сплава,	Si + ($\alpha + Si$)	$\alpha + (\alpha + Si)$
Si в эвтектике,	Иглы (пластины)	Разветвленные тонкие волокна
избыточной фазы	Твёрдые игольчатые кристаллы кремния	Пластичный мягкий α – раствор : Al(Si)

Модифицирование сплава АК12 повышает предел прочности σ_b от 120 до 200 МПа и относительное удлинение от 2 до 13%.

9.4. Антифрикционные сплавы

Антифрикционные сплавы предназначены для изготовления деталей трущихся поверхностей машин и механизмов (подшипник - вал или ось).

Требования к материалу:

- минимальный износ вала;
- минимальный собственный износ;
- способность удерживать смазку;
- низкий коэффициент трения.

Этот комплекс свойств могут обеспечивать сплавы, состоящие из относительно мягкой основы, в которой распределена вторая достаточно твердая фаза. Пластичная, вязкая основа быстрее изнашивается, а вал в основном лежит на твердых опорных включениях, в изнашивающихся местах пластической основы удерживается смазка. Если основа слишком мягкая - материал вкладыша будет выдавливаться валом, наволакиваться. Количество твердых включений не должно быть слишком велико, так как подшипник будет плохо прирабатываться.

Для подшипников применимы многофазные сплавы: баббиты, медные, цинковые, алюминиевые сплавы, антифрикционные чугуны, металлокерамические подшипниковые сплавы.

Баббиты - антифрикционные сплавы на основе олова (Sn) или свинца (Pb). Температура плавления $T_{пл} = 350 - 450$ °С, имеют хорошую прирабатываемость.

Лучшими антифрикционными свойствами обладают баббиты Б83 (Sn \approx 83%) и Б89, которые применяются только в особо ответственных узлах, в машинах большой мощности (рис.9).

Олово слишком мягко, чтобы получить нужный сплав, в него вводят упрочняющие элементы - сурьму (Sb) и медь (Cu).

Сурьма до 7,5% растворяется в олове и дает более прочную тройную эвтектику: твердый раствор сурьмы и меди в олове и кристаллы SnSb и Cu_6Sn_5 (вязкая серая основа). Микроструктура включает также химическое соединение SbSn высокой твердости (светлые зерна) и химическое соединение Cu_6Sn_5 – твердые белые иглы, образующие «каркас».

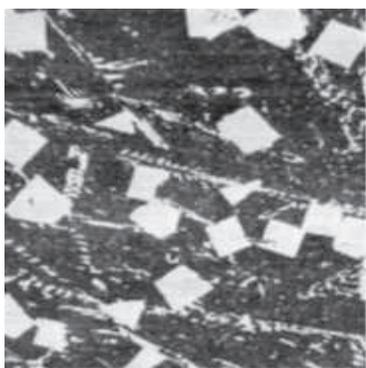


Рис. 9. Микроструктура баббита Б83 на оловянистой основе (α - твердый раствор - темная основа; светлые зерна - SnSb; светлые дендриты Cu_6Sn_5)

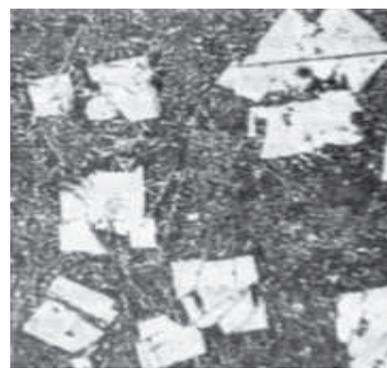


Рис. 10. Микроструктура баббита Б16 на свинцовой основе (светлые кристаллы SnSb; игольчатые Cu_2Sb в мягкой эвтектике Pb + SnSb)

Свинцовооловянистые баббиты (примерный состав, %)

	Sn	Sb	Cu		Pb, остальное
Б16	16	16	2		66
Б6	6	15	3	2% Cd	74
БТ	10	15	1	0,2% Te	74
БН	10	14	2	1% Ni	72

Теллур повышает пластичность, кадмий, никель, мышьяк – твердость и прочность основы.

Свинцовооловянистые баббиты имеют более высокий коэффициент трения, менее износостойки и хрупки по сравнению с Б83.

БТ и БН применяются для подшипников ДВС, в том числе тракторов и автомобилей, Б16 - в электродвигателях, паровых турбинах, Б6 – для нефтяных двигателей, металлообрабатывающих станков.

Антифрикционные бронзы и чугуны

Из сплавов на основе меди наилучшими антифрикционными свойствами обладают свинцовистая бронза БрС30 (и оловянистая, содержащая до 10% Sn).

Свинец растворяется в меди при температуре больше 950 °С, при охлаждении сплава сначала кристаллизуется медь в виде дендритов (см. рис. 2 – светлые зерна) и при температуре меньше 326 °С затвердевает свинец –

мягкие темные поля. Поскольку и прочность и твердость такой бронзы невысоки, ее используют в качестве наплавки вкладышей (на стальных лентах или трубах). Биметаллические подшипники с таким материалом дешевы, легко заменяемы.

Бронза ОСН 10-2-3 обладает высокой стойкостью против истирания благодаря включениям твердого эвтектоида.

Антифрикционные чугуны высокоизносостойки, но имеют повышенный коэффициент трения. Применяются в тихоходных узлах трения. В серых чугунах роль мягкой составляющей выполняют включения графита.

Для работы при значительных давлениях и малых скоростях скольжения используют серые чугуны СЧ15, СЧ20 и легированные антифрикционные чугуны.

Спеченные антифрикционные материалы

Металлокерамические на железной, медной или бронзовой, на алюминиевой основе с графитной добавкой (1-4%) не содержат дефицитных металлов (Sn, Sb, Pb), могут работать в условиях сухого трения при больших скоростях и температуре выше 350 °С.

9.5. Электротехнические материалы

К электротехническим материалам относят проводники, магнитные, электроизоляционные, полупроводниковые материалы, обеспечивающие работу электротехнических установок. К ним относят также некоторые изделия: провода, изоляторы, конденсаторы и другие.

Проводники - чистые металлы и сплавы с низким сопротивлением (в пределах соответственно 0,015-0,105 мкОм•м и 0,3 - 1,8 мкОм•м).

Серебро – обладает наименьшим электросопротивлением. Применение (контакты, фольга, монтажные провода и другие изделия) ограниченное из-за очень высокой стоимости.

Медь: провода, кабели, шины, контакты. Дорогой металл.

Алюминий имеет электропроводимость в полтора раза ниже, чем медь, но он гораздо легче. Поэтому широко распространен.

Свинец: пластины аккумуляторов, вставки предохранителей, защитные оболочки кабелей.

Сталь используют как несущий элемент сталеалюминиевых проводов, защитных оболочек кабелей, как заземляющие элементы и детали конструкций.

Вольфрам – тяжелый, тугоплавкий металл с высоким электросопротивлением. Служит для изготовления спиралей электроламп, для неплавящихся электродов, высоко нагруженных контактов.

Материалы с высоким электросопротивлением.

Сплавы для электронагревателей:

Нихром Х20Н80;

Фехраль Х13Ю4(состав: Cr \approx 13, Al \approx 4%, остальное – железо);

Хромаль Х23Ю5.

Реостатные сплавы:

Константан МНМц 40 – 1,5 (Ni \approx 40, Mn \approx 1,5 остальное - медь);

Копель МНМц 43-0,5;

Манганин МНМц 3-12.

Сплавы для термопар

Алюмель (Al \approx 2%, остальное Ni);

Хромель (Cr \approx 10%, остальное Ni);

Копель;

Платина;

Платина с 10% родия.

Лекция 10. Порошковые, композиционные и неметаллические материалы

10.1. Порошковые сплавы: получение, состав, назначение.

10.2. Композиционные материалы.

10.3. Пластмассы и резины.

10.1. Порошковые сплавы

10.1.1. Общая характеристика

Порошки – частицы материалов размером от 0,1 до 1 мм.

Из них прессованием и спеканием получают изделия, не имеющие ликвации, текстуры, усадочных дефектов, трещин.

Материалы: один металл, металлы, металлы с неметаллическими материалами.

Изделия: обычного состава (дешевые),
особого состава, структуры и свойств.

10.1.2. Получение порошков

Способы получения порошков на металлургических заводах.

Восстановлением металлов из оксидов и солей, которые получают из руд. Восстановители (сажа, газы, кокс) позволяют получать порошки любых металлов.

Распылением струи металла сжатым воздухом, азотом или аргоном над поверхностью воды.

Механическим дроблением:

- на шаровых мельницах дробят стружку, мелкие отрезки;
- на вихревой мельнице. В корпусе вращаются навстречу два пропеллера с частотой 3000 мин⁻¹ что позволяет дробить кусочки проволоки путем соударений.

Электролитическим осаждением.

При электролизе из раствора получают на катоде осадок:
рыхлый или плотный (счищают и измельчают).

10.1.3. Технология изготовления порошковых изделий

- Сортировка, очистка, отжиг порошков.
- Дозировка порошков и получение шихты.
- Перемешивание.
- Прессование в пресс-формах холодное ($P=30-1000\text{МПа}$) или горячее.
- Прессование выдавливанием (мундштучное) для получения длинномеров.

Прокатка. Продукция: многослойные изделия, лист, ленты (толщиной от 0,02 до 3 мм и шириной до 300мм), а также различного профиля прутки и проволока (диаметром от 0,25 мм).

- Шликерное литье. Это литье смесью порошка с жидкостью (вода, парафин расплавленный и др.), которая удаляется из формы после завершения операции. Изготавливают небольшие изделия сложной формы.

10.1.4. Спекание

Спекают порошковые «прессовки», получаемые в пресс-формах для повышения прочности.

Режимы спекания.

- Спекание твердых фаз при $T=(0,7-0,9) T_{пл}$. легкоплавкого компонента;
- Спекание за счет жидкой «связки при $T>T_{пл}$ указанного компонента.

Оборудование. Электрические печи с T_p от 1100 до 2500 °С.

Атмосфера. Восстановительная (H, CO) или нейтральная (N, Ar).

10.1.5. Классификация порошковых материалов по назначению

Конструкционные

для изготовления втулок, муфт, шестерен и других малонагруженных деталей из углеродистых и легированных сталей и сплавов с пористостью до 1,0-2,0%.

Пористые для изготовления фильтров и некоторых других изделий. Порошки из бронзы, титана, железа, нихрома и т.д. Пористость до 50-60%. Фильтры для очистки газов и воздуха от пыли, жидкостей – от твердых частиц.

Антифрикционные – для подшипников скольжения.

Композиции: медный, алюминиевый, железный порошок, пропитанный маслом, с добавками графита (1-4%) или сульфида молибдена.

Фторопластовые и др.

Фрикционные. Композиции из железного, медного порошка с добавками свинца, никеля, а также асбеста, кварца и других материалов (с высоким коэффициентом трения). Для тормозных устройств машин, самолетов.

Термостойкие для жаропрочных деталей.

Инструментальные – для изготовления пластинок: из твердых материалов (с алмазом, эльбором и др.); минералокерамических (на основе оксида алюминия).

Электротехнические - для магнитов, электроконтактов (смеси W, Mo, с Cu или Ag), электрощеток (композиции графита с медью или серебром).

10.2. Композиционные материалы

Композиционные материалы (композиты) – материалы со сплошной металлической или неметаллической основой (матрицей) и усиливающими (армирующими) элементами с резко отличающимися свойствами. При этом они не должны между собой взаимодействовать химически, но иметь близкие по значению коэффициенты теплового расширения.

Композиты значительно превосходят металлические и полимерные материалы по удельной прочности и жесткости, сопротивлению усталости, жаропрочности и другим свойствам.

По способу получения различают искусственные и естественные композиты.

10.2.1. Естественные композиты

Естественные композиты (или НКЭ-сплавы) – материалы, получаемые направленной кристаллизацией сплавов эвтектического или близкого к нему состава.

При определенных условиях охлаждения расплава получают материал с ориентированной структурой (рис.1) и лучшими свойствами. А именно, в твердом растворе (матрице) образуются кристаллы более прочной фазы (волокна или пластины карбидов, интерметаллидов или др. соединений).



а)



б)

Рис. 1 Материалы с ориентированной структурой:
а- НКЭ – сплав; б – монокристалл ЖСЗ6

Пример. Сплав $Al+Al_3Ni$ однородной структуры имеет $\sigma_{в}$ около 90МПа.

При кристаллизации этого сплава со скоростью 6 см/ч частицы Al_3Ni образуют «усы» (объем которых составляет 11%). Это обеспечивает повышение прочности до 330МПа.

10.2.2. Искусственные композиты

Искусственные композиты – получаемые промышленным способом материалы с комбинированной структурой.

Структура: матрица из металла, сплава, полимера;

армирующие наполнители: дисперсные, волокнистые или слоистые.

Укладка наполнителей:

- линейная (волокна, кристаллы...);
- плоская (маты, фольга, волокна...);
- трехмерная (равномерное по объему распределение наполнителя).

Дисперсно-упрочненные композиты.

Матрица из металла (Al, Ni, Co, Be, Mg) или сплава (Ni – Cr; Co-Zn).

Наполнители – дисперсные частицы (микроскопические – 0,01 – 0,1 мкм, или мелкие – 1-50мкм) тугоплавких оксидов, нитридов, боридов, карбидов.

Пример.

Спеченные алюминиевые пудры (САП), упрочняемые оксидными частицами (при 8% частиц имеют $\sigma_{\text{в}} = 300 \text{ МПа}$, а при 15% $\sigma_{\text{в}} = 400 \text{ МПа}$). По прочности они сопоставимы с алюминиевым сплавом Д20 ($\sigma_{\text{в}} = 420 \text{ МПа}$), но последний разупрочняется при нагреве, а САП могут работать при T до 300-500 °С. Из них изготавливают лопатки компрессоров, вентиляторов и турбин; поршневые штоки и т.п.

Очень стойкие в агрессивных средах композиты, получаемые спеканием металлических и керамических порошков называют **керметами**.

Керметы. Металлическая основа их порошки Ni, Co, Fe, Cr, W, Mo, Nb.

Наполнители: высокоогнеупорные бориды TiB_2 , VB_2 ;

силициды: VSi_2 , TiSi_2 ; окислы Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2 ; нитриды; карбиды.

Изделия: металлорежущий инструмент, детали авиационных двигателей, турбин и другие, работающие при высоких температурах, повышенных нагрузках, в агрессивных средах.

Волокнистые композиционные материалы.

Матрица: полимерная (чаще других), металлическая, углеродная.

Волокна: стеклянные, органические (полиамиды, углерод), металлические, из нитевидных кристаллов («усов»).

Формы армирующих компонентов: волокна, жгуты, ткани.

Волокно должно иметь более высокий, чем у матрицы модуль упругости, равномерно распределяться по объему композита. Способ укладки волокон (рис. 2), а также расположение их относительно действующего усилия (рис. 3) являются также важными факторами.

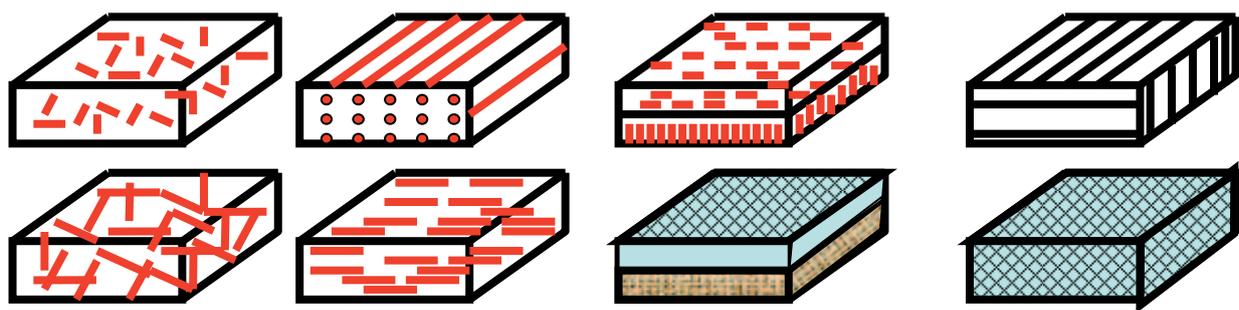


Рис 2 Распределение волокон в КМ:

а- хаотичное ;б- одномерное; в – двухмерное; г – пространственное

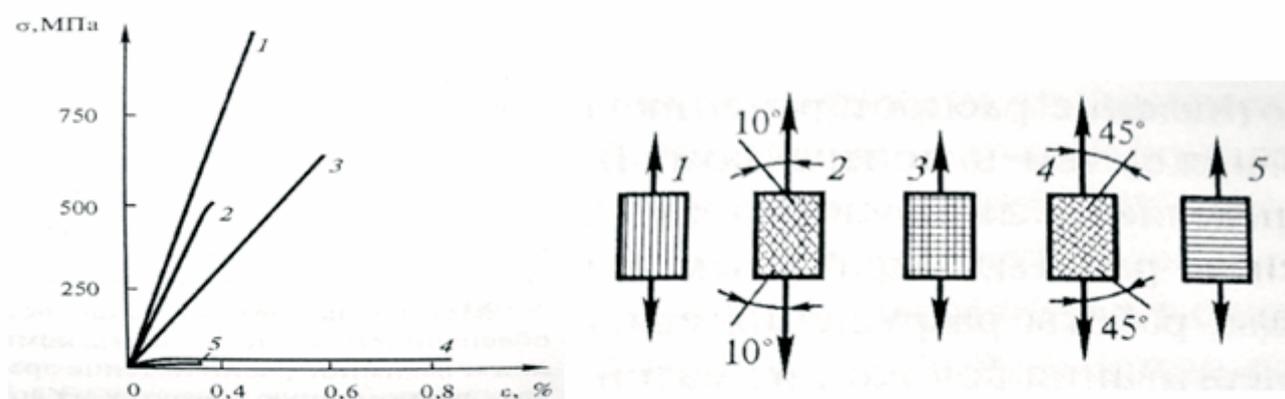


Рис 3. Зависимости прочности композита от схемы расположения волокон

Вместе с тем, предел прочности композита определяется и объемной долей волокна V^B . Для однонаправленной схемы укладки волокна и действующей вдоль него нагрузке прочность композита до некоторого критического значения $V_{кр}$ снижается, т.к. определяется пределом прочности матрицы σ_B^M (рис. 4) – из-за быстрого нагружения и разрушения волокон. При увеличении объемной доли V^B от $V_{кр}$ до 0,8-0,9 прочность композита растет как суммарная прочность волокон и матрицы $\sigma_c^k = \sigma_c^B \cdot V^B + \sigma_c^M (1 - V^B)$. Но затем волокна разрушаются и разрушается матрица /7/.

Волокнистые композиты получают твердофазным, жидко-газопарофазным способами, а также методами осаждения металлических покрытий на волокна и кристаллы.

При *твёрдофазном* способе листы, фольгу, проволоку прессуют и спекают. Например, горячим прессованием пакета, состоящего из чередующихся слоев фольги алюминиевого сплава АД1 и одинаково направленных волокон бора (до 50% по объему) получают композит ВКА – 1 с пределом прочности σ_B до 1200 МПа, - вдвое превышающем σ_B высокопрочных сплавов алюминия.

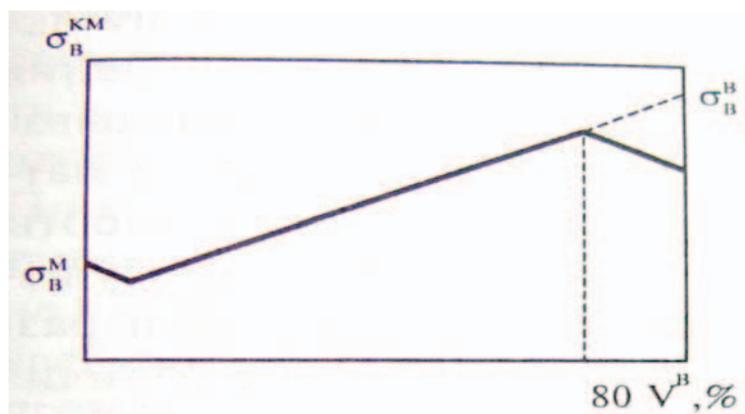


Рис. 4. Зависимость прочности композита от объемной доли волокна

Армирование сплава АД1 стальной проволокой ВНС-9 ($V^B = 25-30\%$) повышает предел прочности композита σ_B до 1450 (1750) МПа.

Некоторые показатели широко используемых армирующих материалов представлены в таблице 1/9/.

При жидкофазном способе наполнители пропитывают расплавом за счет вакуума или избыточного газового давления. Так, композит с углеродным волокном получают заливкой (пропиткой) волокнистого каркаса расплавом силумина АЛ2. Этот композит имеет прочность σ_B до 1000 МПа и теплостойкость до 500 °С.

Композиты с углеродной матрицей производят карбонизацией и осаждением углерода из газовой фазы.

В индукционной печи при температуре 900-1100 °С в вакууме происходит пиролиз (разложение) углеводородного газа (метана и др.) и последующее осаждение его на волокна композита, что обеспечивает постепенное формирование матрицы.

Таблица 1. Свойства некоторых армирующих материалов

Материал	Температура расплавления, °С	Плотность, г/см ³	Предел прочности σ_B , МПа
Волокно:			
борное	2040	2,63	2500-3500
углеродное	3000	1,70	1960-2960
оксид алюминия	2050	3,96	2100-2600
Проволока:			
бериллиевая	1284	1,8	15760
вольфрамовая	3400	19,3	2070
стальная	1300	7,8	2560
Нитевидные кристаллы:			
нитрид алюминия	2400	3,3	15000
карбид кремния	2650	3,21	37000
нитрид кремния	1900	3,18	15000

Для получения более термостабильного материала проводят дополнительную графитизацию путем выдержки при 3000 °С. Композит с волокнами углерода в углеродной матрице выдерживает температуру до 2000°С.

Поразительные перспективы открывают **нанотехнологии** в совершенствовании имеющихся и создании новых материалов.

Считают возможным создание в близком будущем электрических магистральных кабелей на углеродных нанотрубках, способных проводить ток высокого напряжения лучше медных проводов и весить в пять – шесть раз меньше.

Планируется (учрежден нанотехнологический комплекс в Санкт-Петербурге) создание композиционных материалов за счет поверхностного

(объемного) модифицирования наночастицами металла, керамики, полимеров для получения высоких магнитных, каталитических характеристик, термо- и химически стойких, с высокой прочностью и пластичностью, эффективно экранирующих и поглощающих электромагнитные волны.

Нанотехнологические направления по конструкционным материалам:

- металлматричные композиции на основе легких металлов (Al, Ti, Mg);
- сверхпрочные стали;
- сверхтвердые нанокompозиты;
- жаропрочные наноматериалы;
- сварочные материалы, модифицированные нанокompозитами.

10.3. Пластмассы и резины

10.3.1. Пластмассы (пластики)

Пластмассы и другие неметаллические материалы (стекло, резины, клей, краски и т.д.) широко применяют в различных отраслях техники.

Многие научные проблемы по неметаллическим материалам были решены нашими соотечественниками. Так **Бутлеров А.М.** разработал структурную теорию химического строения органических соединений (Суть: порядок связей атомов в молекулах определяет свойства вещества).

Петров Г.С. заложил основы промышленного производства пластмасс. В 1913 г. была получена первая отечественная пластмасса - карболит.

Блестящие исследования академика **С.В. Лебедева** обеспечили получение синтетического каучука (1932г.)

Пластмассы- материалы на основе полимеров, способные при нагревании формоваться под давлением в изделия заданной формы.

Полимер - вещество, состоящее из макромолекул, включающих большое число повторяющихся элементарных звеньев (мономеров).

По структуре макромолекулы бывают: линейные (лестничные), разветвленные, сетчатые (рис. 5). От формы молекулы, плотности упаковки, зависят свойства полимера.

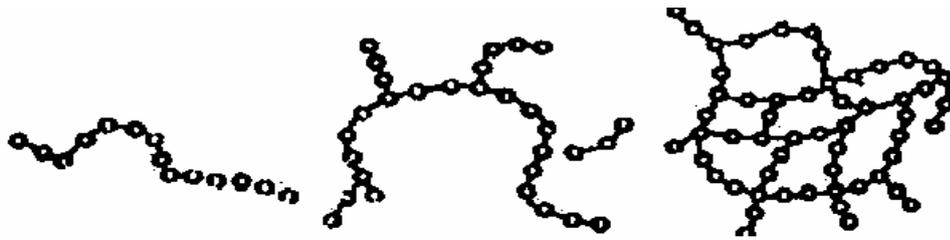


Рис.5. Форма макромолекул

Длина цепочки мономеров определяет агрегатное состояние вещества.

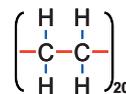
Газ этилен: химическая формула C_2H_4 ,

структурная формула (6 молекул)



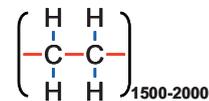
Жидкий полиэтилен

цепочка из 20 звеньев



Твердый полиэтилен:

цепочка из 1500-2000 звеньев



Таким образом, полиэтилен это продукт полимеризации газа этилена, у которого разрушена двойная связь между атомами углерода.

Фторопласты - пластики на основе политетрафторэтилена $(-CF_2-CF_2-)_n$.

Эти макромолекулы имеют форму зигзагообразной спирали с высокой энергией связи между атомами С и F, что обеспечивает повышенную термостойкость пластика. Например, "фторопласт-4" - диэлектрик, работающий длительно при T до 250 °С.

Наряду с рассмотренными широко используются:

оргстекло

полипропилен – $(CH_2-CHCH_3)_n$;

полистирол – $(-CH_2-CHC_6H_5)_n$ и другие

По влиянию температуры на свойства пластмасс выделяют две группы:

- термопласты, имеющие линейные или разветвленные макромолекулы и способные многократно размягчаться при нагревании;

- реактопласты (термореактивные пластики), имеющие исходную линейную структуру, превращающуюся при введении отвердителя необратимо в сетчатую.

Смолы – связующие для реактопластов:

- эпоксидная (теплостойкость 200 °С);
- феноло-формальдегидная (до 260 °С);
- кремнийорганическая (260-370 °С).

По составу пластики бывают *простые и сложные*. Последние содержат до 40-70% наполнителя.

Группы пластиков по виду наполнителя представлены в табл. 2/13/.

Таблица 2. Классификация пластмасс по виду наполнителя

Структура наполнителя	Вид наполнителя по происхождению	Вид пластмасс
Без наполнителя	-	Ненаполненные (простые) пластмассы. Состоят из полимера и добавок. Например, фторопласт - 4, полиэтилен
Порошкообразный	Органические и неорганические вещества	Пресс-порошки и литьевые пластмассы
Волокнистый	Органические волокна	Волокниты
	Асбестовые волокна	Асбоволокниты
	Стекловолоконные волокна	Стекловолоконниты
Листовой	Бумага	Гетинаксы
	Хлопчатобумажная ткань	Текстолиты
	Асбестовая ткань	Асботекстолиты
	Стеклоткань	Стеклотекстолиты
	Древесный шпон	Древесно-слоистые пластики (ДСП)
Газообразный	Воздух, CO ₂	Пенопласты
		Поропласты

Гетинакс - сложный пластик, получаемый горячим прессованием нескольких слоев бумаги, пропитанной феноло-формальдегидной смолой. Применение: детали электрических машин, радиоаппаратов; декоративный листовой материал.

В сложные пластики также вводят:

пластификаторы – повышающие пластичность, обрабатываемость, морозостойкость;

стабилизаторы – вещества, укрепляющие структуру молекул;

красители;

отвердители.

10.3.2. Резины

10.3.2.1. Общие сведения

Резины – продукт химической переработки каучуков - особой группой полимеров - эластомеров, имеющих зигзагообразные (спиралевидные) макромолекулы с витками и петлями и образующих редкосетчатую структуру. Такие макромолекулы под нагрузкой сначала распрямляются, а уж затем вытягиваются. Поэтому упругая деформация резин достигает 700-1000%.

Наряду с эластичностью резины несжимаемы, газо- и водонепроницаемы, стойки к истиранию и имеют низкую плотность.

Резины получают вулканизацией каучуков в смеси с вулканизатором (сера, селен) и другими добавками – нагревом до 130-150 °С.

При введении серы до 5% образуется редкая сетка и получается мягкая, эластичная резина. С увеличением содержания серы сетка густеет, а материал твердеет и при 30% S получается эбонит.

Макромолекулы каучука наряду с одинарными связями в цепочках углерода имеют некоторое количество связей двойных. Сера, вступая в реакцию, разрывает их и, встраиваясь в структуру, образует поперечные атомные связи.

10.3.2.2. Состав и свойства резины

Основу резин, как отмечено выше, составляют каучук и вулканизатор, дополнительно в них вводят различные ингредиенты:

- наполнители:
 - активные (сажа, окись цинка и другие), в частности, упрочняющие материал;
 - инертные (мел, тальк, регенерат – измельченная старая резина);
- пластификаторы – вещества, повышающие эластичность и морозостойкость, облегчающие переработку;
- противостарители (антиоксиданты), тормозящие окисление макромолекул каучука и их разрыв;
- красители – несущие декоративную функцию и снижающие световое старение.

Каучуки.

Натуральный (НК) – мягкий эластичный материал, обеспечивающий резинам высокую прочность и эластичность, высокие электроизоляционные свойства. Изделия: шины, ремни, транспортерные ленты, детали вакуумной техники.

Бутадиеновый (СКБ) – получают полимеризацией углеводорода бутадиена. Он имеет пониженную прочность при растяжении, растворим в неорганических растворителях, но хорошо совмещается с натуральным и бутадиен-стирольным каучуками и придает резинам повышенную износостойкость, эластичность и морозостойкость. Изделия: шины, резино-технические изделия, обувь и др.

Бутадиен-стирольные каучуки (СКС, СКМС). Резины на их основе эластичны, износостойки, имеют удовлетворительную морозо- и теплостойкость. Используются в шинной, обувной, кабельной промышленности. СКС-10 морозостоек (до -77°C).

Изопреновые каучуки (СКИ). Так, СКИ-3 по составу и свойствам близок к

НК. Для изготовления напорных рукавов, транспортерных лент, шин, амортизаторов.

Бутадиен-нитрильный каучук (СКН) получают совместной полимеризацией бутадиена и нитрила акриловой кислоты. Он стоек в бензине и нефтепродуктах (превосходит найрит, а по теплостойкости – НК), но у него низкие электроизоляционные свойства. Резины для топливных и масляных шлангов, прокладок и уплотнителей.

Синтетический теплостойкий каучук (СКТ) благодаря наличию прочной силоксановой связи (-Si-O-) в основной цепи макромолекул придает резинам повышенную теплостойкость, диэлектрические свойства. Изделия: изоляция электрокабелей, герметизирующие прокладки.

Полиуретановый каучук (СКУ) – обеспечивает резинам высокую прочность, сопротивление износу, эластичность, маслбензостойкость. Изделия: автомобильные шины, транспортерные ленты и др.

Таблица 3. Физико-механические свойства резин /7/

Назначение	Каучук	Плотность, кг/м ³	$\sigma_{в}$, МПа	Температура, °С	
				рабочая	хрупкости
Общее	НК	920	30	80÷130	-40÷-62
	СКБ	920	15	80÷150	-42÷- 68
	СКС	920	25	80÷130	-48÷ -77
	СКИ	920	30	130	-58
Специальное: -бензомасло- стойкие	Найрит	1225	25	100 ÷ 130	-34
	СКН	960	до 30	100 ÷ 180	-48
	Тиокол	1350	3,5	60 ÷ 130	-40
- теплостойкие	СКТ	1850	До 80	250÷325	-74
-химически стойкие	Бутил - каучук	920	до 24	до 130	-30 ÷ -70
- износостойкие	СКУ	-	до 60	130	-21 ÷ -50

10.3.2.3. Технология изготовления резины и резиновых изделий /6/.

1. *Пластикация* (размягчение) каучука, разрезанного на куски, путем пропускания его через червячную машину при температуре 40-50 °С (рис.6)

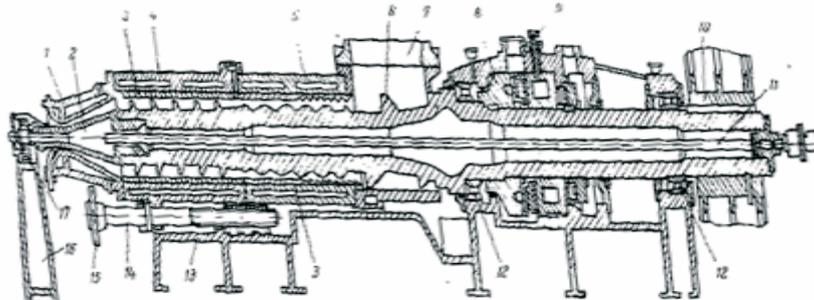


Рис. 6. Червячный пластикатор

2. *Приготовление смеси* каучука с порошкообразными ингредиентами в специальных смесителях (рис.7)

Вводят сначала противостарители, а последними – вулканизаторы. Получают пластичную и малоупругую массу.

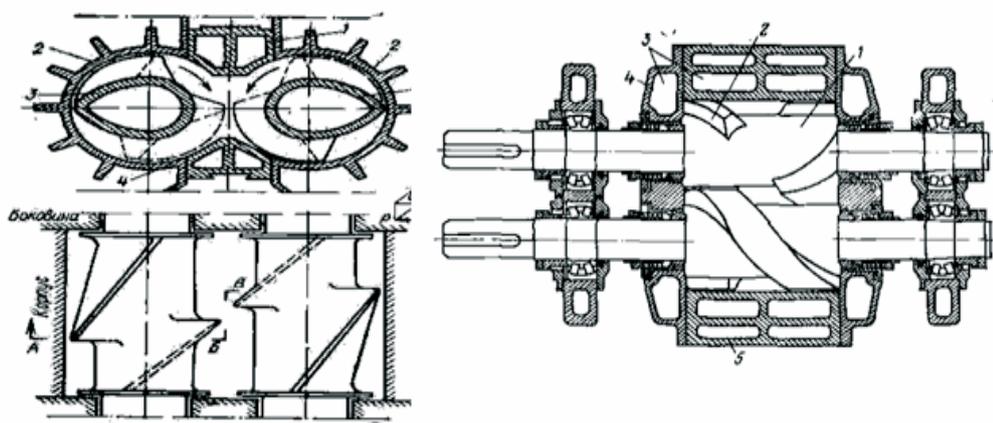


Рис.7. Смеситель каучука с ингредиентами

3. *Каландрование* – обработка массы на каландрах – трех- или четырехвалковых машинах (рис. 8). Процесс идет при определенной температуре, которая устанавливается и поддерживается за счет подводимых в полные валки (длиной до 2,5 м и диаметром до 0,8 м) пара и холодной воды. Получают *листовую сырую резину* с гладкой поверхностью и постоянной толщины.

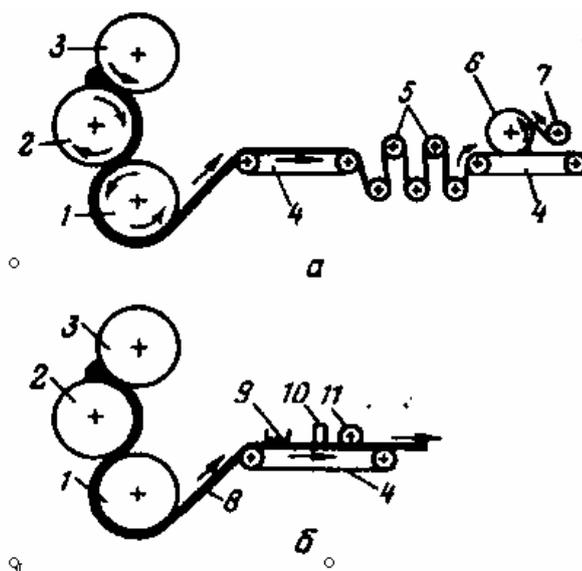


Рис. 8. Схемы каландрования

На каландрах выполняют также промазку тканей и нанесение покрытия на ткани. В частности, при получении ремней, покрышек на корд, белтинг и другие ткани наносят разбавленную глицерином резиновую смесь.

4. Получение полуфабрикатов и деталей.

Вырубкой или формованием из листов нужной толщины получают заготовки. Детали изготавливают прессованием (рис. 9) или литьем (рис.10)

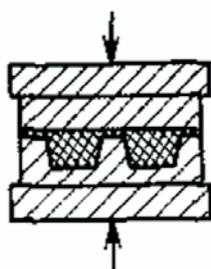
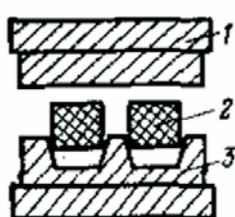


Рис. 9. Схемы прессования

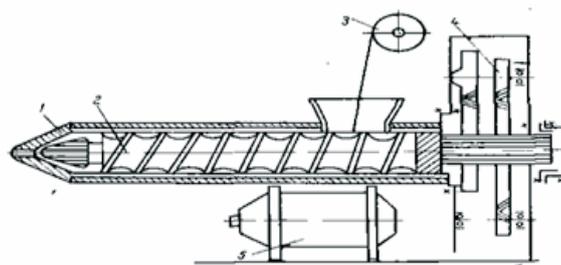


Рис. 10. Схема литьевого агрегата

5. Вулканизация

Готовые детали проходят завершающую операцию в вулканизаторах (специальных камерах) при температуре 120-150 °С в атмосфере насыщенного водяного пара.

При этом образуется сетчатая структура и получается менее пластичная, но более прочная и стойкая резина.

Многие изделия получают в металлических формах давлением при повышенной температуре, т.е. на стадии вулканизации.

Автомобильные шины.

Из полученной на экструдере трубы вырезают заготовку нужной длины, собирают и формуют на барабане. Вулканизируют в стальных рифленых формах.

Процесс изготовления автопокрышек (шин) отражен на рис.11 – 14.

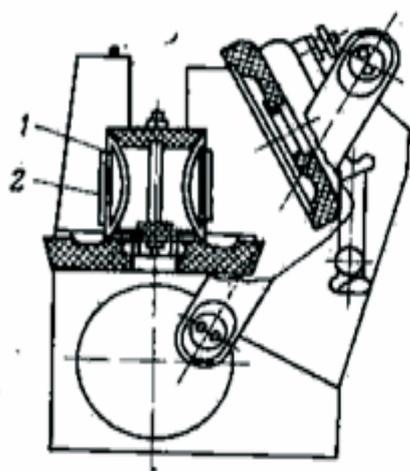


Рис.11. Форматор-вулканизатор с не вулканизированной покрышкой

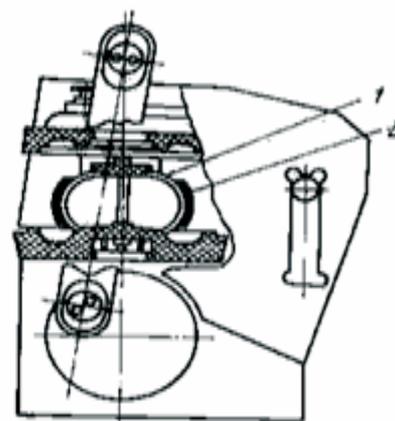


Рис. 12. Формование покрышки

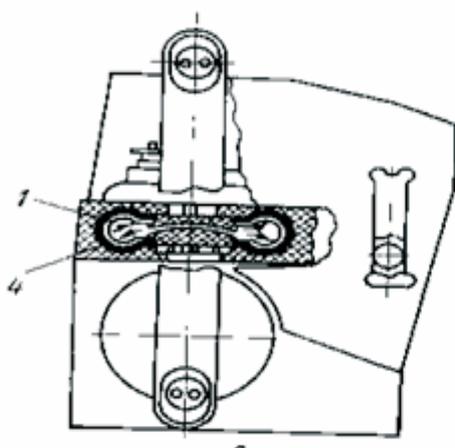


Рис. 13. Вулканизация Покрышки

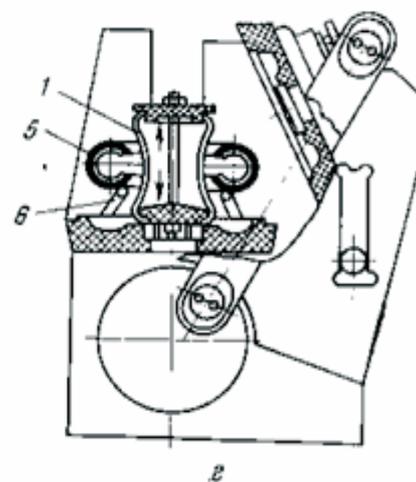


Рис. 14. Извлечение готовой покрышки

б. *Экструзия* - процесс формования из резиновой смеси труб, шлангов, камер пневмошин, протекторов шин на *экструдерах* – машинах с цилиндрическим нагревающим стальным корпусом, шнеком, загрузочным устройством.

Невулканизированная смесь шнеком продвигается через сменный формирующий инструмент. При этом получается нужная заготовка, (к примеру шина) которая дорабатывается и вулканизируется.

Некоторые изделия (небольшие трубки, прокладки и др.), получаемые на экструдерах, являются деталями и подвергаются только вулканизации.

Литература

1. Алаи, С.И. и др. Технология конструкционных материалов.
– М.: Просвещение, 1986.
2. Болховитинов, Н.Ф. Металловедение и термическая обработка.
– М.: Машгиз, 1961.
3. Геллер, Ю.А., Рахштадт, А.Г. Металловедение.
– М.: Металлургия, 1989.
4. Гуляев, А.П. Металловедение.– М.: Металлургия, 1986.
5. Колачев, Б.А., Елагин, В.И., Ливанов, В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов.
– М.: «МИСИС», 2001.
6. Кошелев, Ф.Ф. Общая технология резины.– М.: Химия, 1978.
7. Металловедение./под ред. Ю.М. Соломенцева.
– М.: Высш. шк., 2005.
8. Металловедение./под ред. Б.Н. Арзамасова.
– М.: Машиностроение, 1986.
9. Металловедение и технология металлов./под ред. Г.П. Фетисова.
– М.: Высш. шк., 2001.
10. Металлы и сплавы: справочник.– С.-Пб.: Профессионал, 2003.
11. Мозберг, Р.К. Металловедение.– М.: Высш. шк., 1991.
12. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов.
– М.: Металлургия, 1986.
13. Технологические процессы в машиностроении./под ред. С.И. Богодухова.
– Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2005.
14. Фиргер, И.В. Термическая обработка сплавов: справочник.
– Л.: Машиностроение, 1982.