

**Министерство сельского хозяйства  
Российской Федерации**

**Технологический институт-филиал ФГБОУ ВО  
Ульяновский ГАУ**

С.Н. Петряков  
А.В. Морозов

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЯ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
(краткий курс лекций)



**Димитровград - 2023**

**УДК 629**  
**ББК 39.3**  
**П - 31**

**Петряков, С.Н.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов / С.Н. Петряков, А.В. Морозов - Димитровград: Технологический институт – филиал УлГАУ, 2023.- 484 с.

Рецензенты: Глущенко Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования» ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

Материаловедение. Технология конструкционных материалов: краткий курс лекций предназначен для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Утверждено  
на заседании кафедры «Эксплуатация мобильных  
машин и социально - гуманитарных дисциплин»  
Технологического института – филиала  
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ,  
протокол № 1 от 4 сентября 2023г.

Рекомендовано  
к изданию методическим советом Тех-  
нологического института – филиала  
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ  
Протокол № 2 от 10 октября 2023г.

© С.Н. Петряков, А.В. Морозов., 2023

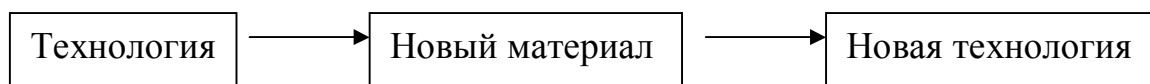
© Технологический институт – филиал ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ,  
2023

## Что изучает дисциплина «Материаловедение. Технология конструкционных материалов»

**Материаловедение** изучает различные конструкционные материалы, их состав, строение и свойства, а также способы изменения их свойств в процессе обработки.

**Технология** – это совокупность операций по изготовлению изделия или детали. Проще можно сказать: из чего, каким инструментом, на каком оборудовании и в какой последовательности изготовить нужное изделие. Сейчас все эти понятия часто обозначают английским выражением “know how” – «знать, как». В технологию входят особенности режима обработки, применение вспомогательных веществ (смазки, охлаждающие среды) и многое другое.

Существует взаимосвязь между двумя составными частями нашего курса: совершенствование технологии позволяет получить качественно новый материал, а новый материал дает новые возможности конструкторам и технологам, и возникает новая технология.



**Конструкционные** материалы предназначены для изготовления деталей и конструкций, работающих под механическими нагрузками. Основное требование к конструкционным материалам – *не разрушаться и не деформироваться* при эксплуатации. Кроме того, материалы должны быть экономичными (недорогими, недефицитными) и технологичными, т. е. из них должно быть технически возможно изготовить нужное изделие с минимальными затратами труда и энергии.

В современной технике используются следующие группы конструкционных материалов:

- 1) металлы и их сплавы;
- 2) полимеры (пластмассы);
- 3) керамика;
- 4) стекла;
- 5) композиционные материалы.

На современном этапе развития техники в наибольшей степени удовлетворяют требованиям быть прочными, надежными, долговечными – и одновременно технологичными и экономичными – металлы и сплавы. Композиционные материалы все шире используются в самых разных областях, но все же пока они дороги и технология их производ-

ства сложна. Поэтому до 80 % объема всех выпускаемых конструкционных материалов составляют металлы. В котло- и реакторостроении они являются основными материалами для машин и конструкций. Поэтому мы будем рассматривать технологию производства изделий из металлов и технологию получения самого металла.

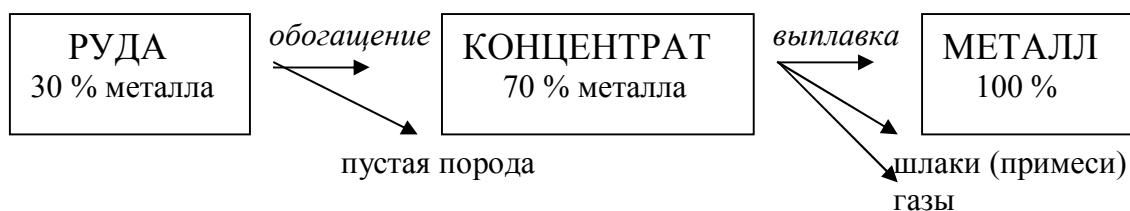
## Часть I. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Раздел I Основы металлургического производства

В земной коре металлы находятся в виде *руд* (горных пород с высоким содержанием соединений ценного металла). Только благородные металлы (золото, серебро, платина) встречаются в виде самородков. Для их извлечения из сопутствующих пород применяют *физические методы*, основанные на разной плотности. Активные металлы (железо, алюминий, титан, олово, цинк и др.) в природе встречаются только в виде соединений, из которых их извлекают различными химическими способами:

- 1) *восстановлением* неметаллами (железо восстанавливается углеродом, вольфрам – водородом);
- 2) *восстановлением* металлами (титан восстанавливают более активным магнием или бериллием);
- 3) *электролизом* растворов и расплавов (так получают алюминий и магний).

Природные руды зачастую бедные, поэтому перед выплавкой их обогащают. В цикле любого металлургического производства происходит постепенное повышение концентрации нужного металла:



Итак, *задача металлургического производства* – восстановление металлов из оксидов и других соединений.

Наиболее значимыми в технике являются черные металлы: *чугун* и *сталь*. Их получением занимается *черная металлургия*.

*Цветная металлургия* получает медь, алюминий, титан, другие цветные металлы и сплавы на их основе. Руды цветных металлов беднее

железных: в медной руде содержится от 1 до 5 % меди, в молибденовых – сотые доли процента Mo. Для их обогащения применяется больше операций; плавка идет в несколько этапов.

## Структура металлургического производства

Предприятия черной металлургии базируются на месторождениях руд и коксующихся углей, а также энергетических комплексах (рис. 1.1).

*Сырьем* для черной металлургии являются железная руда, кокс, флюсы.

*Продукция* черной металлургии: стальные и чугунные *отливки* (литые заготовки), стальной *прокат* (рельсы, балки, листы, проволока, трубы), *чугун* передельный и литейный (в чушках), *ферросплавы*.

Важнейший из этих продуктов – сталь, «хлеб промышленности».

Отсюда **основная задача черной металлургии**:

1) получение *чугуна* из руды путем восстановления железа из оксидов; производится в доменной печи;

2) получение *стали* из чугуна и скрапа (металлолома) путем окисления избытка примесей; производится в сталеплавильных агрегатах (конверторе, мартеновской печи и др.).

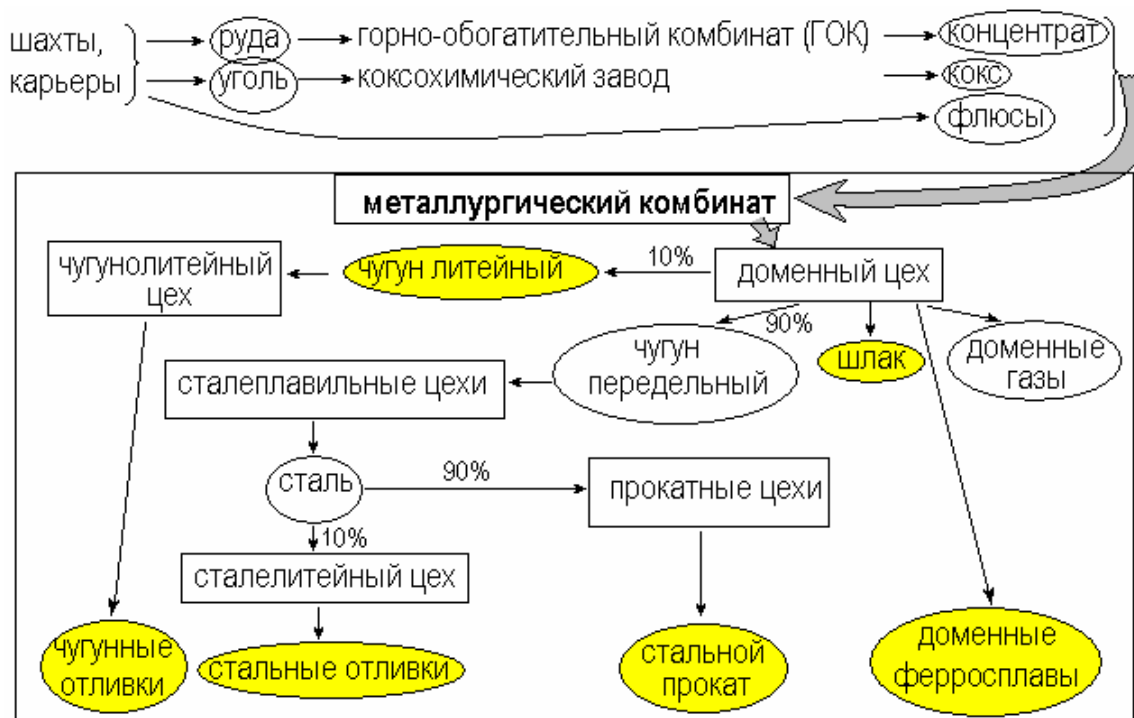


Рис. 1.1. Схема металлургического производства (чёрная металлургия)

## Получение чугуна

*Домна* – вертикальная плавильная печь шахтного типа, работает по принципу противотока: шихта загружается сверху, проплавляется и опускается, а горячий воздух и газы поднимаются вверх (рис. 1.2). *Шихтой* называют все материалы, загружаемые в печь. В доменном производстве это руда, кокс и флюсы. Все эти материалы проходят предварительную обработку: дробление крупных кусков, спекание мелких, обогащение. В домну загружается не природная руда, а обогащенный концентрат, причем в виде кусков определенной величины (10-80 мм), полученных *агломерацией* (спеканием) или *окатыванием* (из мелких фракций увлажненной шихты делаются шарики диаметром 30 мм и обжигаются).

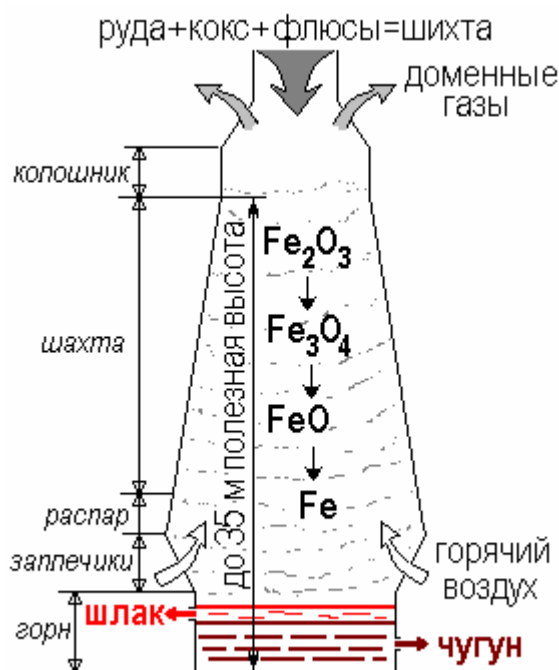


Рис. 1.2. Схема доменной печи

Домна вмещает до 7 тыс. т шихты (5 железнодорожных составов). Это печь непрерывного действия, она работает в течение 5-8 лет круглосуточно, без ремонта. Снаружи домна одета стальным кожухом толщиной 40-50 мм, шамотная кладка печи имеет толщину от 70 см в верхней части до 1,5 м в районе горна. Подогретое дутьё (воздух для горения топлива, обогащенный кислородом) подается из воздухонагревателей через фурмы. Температура дутья достигает  $1200^\circ C$ , что позволяет экономить кокс и повышает производительность. У каждой домны есть несколько воздухонагревателей, которые поочередно работают то на нагрев кирпичной насадки отходящими газами (см. рис. 1.3), то на подогрев воздуха.

Кокс сгорает с выделением большого количества тепла: температура в заплечиках достигает  $2000^\circ C$ . Продукты сгорания – газы  $CO$  и  $CO_2$  – отдают тепло шихте. На выходе их температура составляет всего  $300^\circ C$ .

В домне идет *косвенное* (газами  $CO$  и  $H_2$ ) и *прямое* (твердым углеродом кокса) восстановление железа, последовательно от старших оксидов к младшим:



Кроме того, восстанавливаются примеси – кремний, марганец, фосфор; железо активно растворяет углерод и серу. Сплав, насыщенный углеродом до  $\approx 4\%$ , плавится, стекает в горн, и дальнейшее науглероживание становится невозможным: слой жидкого чугуна прикрыт сверху слоем жидкого шлака, состоящего из оксидов и более легкого, чем металл.

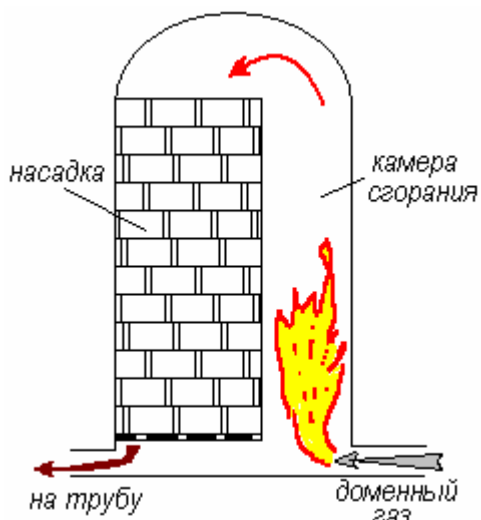


Рис. 1.3. Воздухонагреватель работает на нагрев насадки

Сплав железа с углеродом, марганцем, кремнием, фосфором и серой называется **доменным чугуном**. Он подразделяется на *литейный* чугун, который разливают в слитки весом 45 кг (чушки) или получают из него отливки, и *передельный* чугун, который идет на передел в сталь. Передельный чугун из чугуновозных ковшей сливают в миксер – огнеупорную емкость, обогреваемую горячим газом, вместимостью до 2 тыс. т жидкого чугуна. В миксере происходит усреднение состава чугуна из разных плавок, что важно для правильной работы сталеплавильных агрегатов.

Чугун и доменные *ферросплавы*, применяемые для раскисления и легирования стали, – это основная продукция доменного производства, а шлак и доменный газ – побочная.

Технико-экономические показатели работы домны:

- 1) коэффициент использования полезного объема КИПО =  $V/P$  [ $\text{м}^3/\text{т}$ ], где  $V$  – полезный объем,  $P$  – суточная производительность;
- 2) удельный расход кокса  $K = A/P$ , где  $A$  – расход кокса в сутки.

Понятно, что чем меньше эти показатели, тем эффективнее работает доменная печь. У лучших печей оба эти показателя имеют величину  $\approx 0,4$ .

## Лекция 2

### Получение стали

Исходные материалы для получения стали – передельный чугун и *скрап* (металлолом).

Состав чугуна: 4 % C, 1 % Mn, 1 % Si, 0,3 % P,  $\leq 0,1\%$  S.

Состав стали 40: 0,4 % C, 0,5 % Mn, 0,3 % Si,  $\leq 0,05\%$  P,  $\leq 0,03\%$  S.

Следовательно, чтобы получить сталь, содержание всех примесей в чугунае надо уменьшить примерно в 10 раз. Для этого примеси окисляют и переводят в шлак.

Выплавку стали производят в сталеплавильных печах различной конструкции, ёмкости и производительности.

#### *Агрегаты для выплавки стали*

Самая крупная сталеплавильная печь – *мартеновская* (рис. 1.4). Эта пламенная регенеративная печь может вмещать до 900 т жидкой стали. Печь представляет собой ванну из огнеупорных материалов. Сверху имеется свод, в передней стенке расположены окна для завалки шихты, в нижней части задней стенки – летка для выпуска стали. В боковых стенах имеются головки для подачи топлива и отвода продуктов сгорания. Источником тепла является факел, в котором сгорает природный газ или мазут. Газы, образованные при горении, проходят через один из регенераторов (воздухонагревателей), отдавая тепло кирпичной насадке. Воздух для горения топлива подается через нагретый регенератор. Затем с помощью задвижки поток газов направляют так, чтобы остывший регенератор нагревался, а нагретый работал на подогрев дутья.

Для ускорения плавки через свод печи пропущены фурмы для вдувания кислорода.

Производительность печи оценивают величиной съема металла с 1 м<sup>2</sup> пода. Этот показатель достигает 10 т/м<sup>2</sup>; более крупные печи с площадью пода до 100 м<sup>2</sup> работают более производительнее. Печь выдерживает от 400 до 600 плавков (примерно 8 месяцев), после этого ставится на ремонт. Продолжительность плавки в мартеновской печи от 6 до 12 часов. Выплавляют стали обыкновенного качества, углеродистые и легированные.

Доля мартеновской стали составляет около 50 % от всей выплавляемой в мире стали. В последние десятилетия эта доля снижается, так как новых мартеновских печей больше не строят.

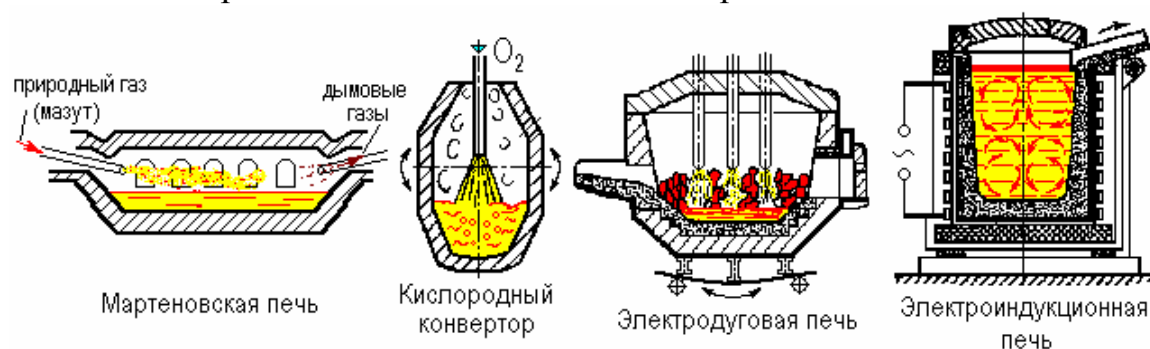


Рис. 1.4. Сталеплавильные печи



*Кислородный конвертор* – второй по величине сталеплавильный агрегат. Он представляет собой грушевидный сосуд (реторту) из огнеупорного кирпича, покрытый снаружи стальным кожухом и подвешенный на опорах. Конвертор может поворачиваться на цапфах, наклоняясь для выпуска стали и шлака. Емкость конверторов – до 400 т жидкой стали, обычно 300 т. Размеры: высота до 9 м, диаметр – до 7 м.

В конверторе окисление имеющихся в чугуне примесей идет за счет продувки жидкого чугуна чистым кислородом (через фурму сверху). Химические реакции окисления протекают с выделением огромного количества теплоты, поэтому ванна очень быстро разогревается. Под фурмой температура расплава достигает 2400 °С. Плавка продолжается всего 40 минут: это самый высокопроизводительный сталеплавильный агрегат. В конверторах выплавляют только углеродистую и низколегированную сталь (содержание легирующих добавок не более 3 %). Слишком высокие температуры способствуют выгоранию ценных легирующих элементов, поэтому иногда легирование производят уже в ковше, после выпуска стали из конвертора. Доля конверторной стали растет; конверторный способ вытесняет мартеновский.

*Электродуговая сталеплавильная печь* имеет емкость до 300 т. Это камера из огнеупорного кирпича со съёмным сводом. Для загрузки флюсов и легирующих элементов имеется окно; загрузка шихты производится сверху при снятом своде. Для выпуска стали печь имеет огнеупорный желоб. Она может наклоняться благодаря специальному механизму.

Тепло для химических реакций получается от горения трех электрических дуг между графитовыми электродами и шихтой. Печь питается трехфазным током с напряжением 600 В; сила тока до 10 кА. В электродуговой печи можно создать любую атмосферу или вакуум. Электрические параметры легко поддаются регулированию, поэтому в печи можно создать любую температуру.

В электропечах выплавляют высококачественные легированные стали. Плавка длится 6-7 часов; на тонну стали расходуется примерно 600 кВтч электроэнергии и около 10 кг электродов.

*Электроиндукционная печь* – самый маленький агрегат для выплавки стали. Ее емкость не превышает 25 т. Такие печи часто строят на машиностроительных предприятиях для переплавки собственных отходов.

Электроиндукционная печь – это огнеупорный тигель, помещенный в индуктор. Индуктор выполнен в виде витков медной трубки, через которую под давлением прокачивается вода для охлаждения. Индуктор подключен к генератору переменного тока высокой частоты (от

500 до 2000 Гц). Ток создает переменное электромагнитное поле. Под действием этого поля в кусках шихты, находящейся в тигле, наводятся вихревые токи, или токи Фуко. За счет сопротивления металла прохождению тока шихта разогревается и плавится; расплав интенсивно перемешивается.

В этой печи также можно создать любую атмосферу. Здесь не слишком высокая температура, поэтому нет угара легирующих элементов. Нет графитовых электродов, как в дуговой печи, поэтому лишний углерод не попадает в расплав. В индукционных печах выплавляют высококачественные легированные стали и сплавы, в том числе безуглеродистые.

#### ***Этапы выплавки стали***

В любой сталеплавильной печи плавка происходит в несколько этапов:

- 1) *плавление шихты и нагрев ванны*; в этот период окисляются железо и примеси, и удаляется фосфор;
- 2) *«кипение» ванны*: лишний углерод удаляется в виде пузырьков СО, и кажется, что сталь кипит; в это же время идет удаление серы;
- 3) *раскисление* – восстановление железа из оксида FeO с помощью более активных элементов (марганца, кремния, алюминия);
- 4) *легирование* – добавление необходимых элементов для получения легированной стали; производится в конце плавки или прямо в ковше.

По степени раскисления стали подразделяют на *спокойные* (полностью раскисленные – ферромарганцем, ферросилицием и алюминием), *кипящие* (раскисленные только ферромарганцем, они «кипят» в изложнице – это выделяется оксид СО в виде пузырьков) и *полуспокойные* (раскислены марганцем и кремнием).

Слиток спокойной стали плотный, в верхней части имеется усадочная раковина. В слитке кипящей стали остаются пузырьки газа, усадочной раковины нет. Эта сталь не содержит неметаллических включений и более пластична, так как в ней меньше кремния.

#### ***Разливка стали***

Выплавленную сталь выпускают в разливочный ковш и разливают в *изложницы* (чугунные формы) для получения слитков нужного веса и формы. Используется стопорный ковш. Изложницы заполняются *сверху* или *снизу* (*сифонная разливка*). При сифонной разливке одновременно заполняются сразу несколько изложниц. Потери металла в этом случае больше, но качество слитка выше, так как заполнение формы расплавом идет спокойно, без брызг. Застывшие брызги образуют на поверхности слитка твердые частицы – «корольки», затрудняющие его дальнейшую

обработку. Углеродистые стали обыкновенного качества разливают сверху, а легированные, качественные – сифоном.

Наиболее экономичным является способ *непрерывной разливки стали* (рис. 1.5). Металл из ковша выпускается в промежуточное разливочное устройство, а оттуда поступает в медный кристаллизатор. Кристаллизатор имеет двойные стенки, между которыми прокачивается вода, отводящая тепло от расплава. Проходя через отверстие кристаллизатора, расплавленный металл начинает затвердевать.

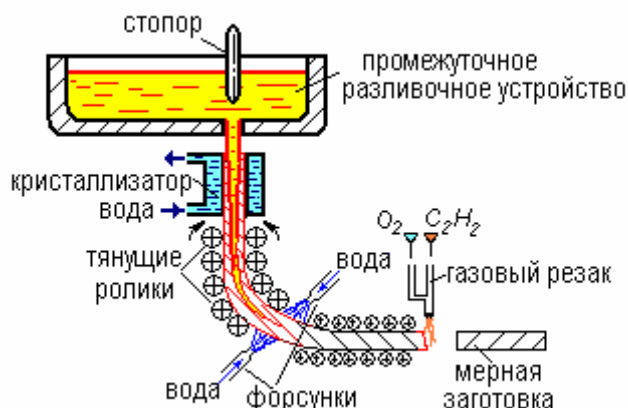
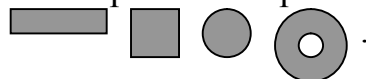


Рис. 1.5. Непрерывная разливка стали

На выходе частично затвердевший слиток захватывается тянущими роликами и направляется на дополнительное охлаждение водой из форсунок. Скорость вытягивания составляет примерно 1 м/мин. Окончательно затвердевший профиль разрезается на мерные куски с помощью ацетилен-кислородного резака.

Установки непрерывной разливки стали (УНРС) бывают радиального, горизонтального и вертикального типов (по направлению вытягивания слитка). Выход годного продукта при этом способе составляет до 98 %. Слиток имеет плотное, мелкозернистое строение. Может быть получено сечение любой формы:



**Повышение качества стали**

**Повысить качество стали** означает уменьшить в ней количество вредных примесей: серы, фосфора и газов.

Способы повышения качества стали:

1) *Обработка синтетическим шлаком* в ковше. Расплавленный шлак специального состава заливается на дно ковша, затем туда выпускается сталь. Более тяжелый жидкий металл опускается на дно, а шлак всплывает, при этом его частички захватывают неметаллические включения и газовые пузырьки. Кроме того, компоненты шлака связывают серу.

2) *Вакуумная дегазация* в ковше (или при переливании в изложницу, в другой ковш, в промежуточном разливочном устройстве). При понижении давления над расплавом пузырьки газов поднимаются вверх и уносят с собой оксиды и другие неметаллические примеси.

3) *Двойной переплав: электрошлаковый, вакуумно-дуговой, плазменно-дуговой и др.* В каждом из этих способов слиток постепенно рас-

плавляется, и расплав проходит по капле через жидкую среду (шлак) или вакуум. Сталь очищается от газов и неметаллических включений. Затем металл снова кристаллизуется. Двойному переplаву подвергают только легированные стали, особо высококачественные.

### Внедоменное получение железа из руды

Это наиболее перспективное направление в развитии черной металлургии. Традиционный двойной передел нужно заменить более рациональным процессом. Причины:

- 1) Запасы коксующихся углей истощаются.
- 2) Два вспомогательных производства – получение агломерата и кокса – по капиталоемкости, сложности, вреду выбросов значительно превосходят основное – доменное производство.
- 3) Необходимы перевозки сырья на все большие расстояния, к мощным металлургическим комплексам, вокруг которых запасы выработаны. (Только КМК и ЗСМК требуют 15 млн т руды в год.) При этом в металлургических центрах нарушена экология.

Выход: постепенная замена доменного и сталеплавильного производства прямым получением стали из руды; а затем – непрерывным металлургическим процессом руда – прокат.

Пока эта задача полностью не решена: есть установки для получения металлизированных окатышей из руды вне домны и есть способы непрерывной разливки и прокатки стали. Дело за «малым» – научиться производить непрерывную выплавку стали. Скорость химических реакций в существующих печах не позволяет это сделать.

Томская область имеет гигантские возможности стать центром добычи железорудного сырья, а возможно – и выплавки стали. Запасы Бакчарского месторождения оцениваются в 12 млрд т. Их хватит на 700 лет добычи. Предполагается разработка методом скважинной гидродобычи; размытая струей воды порода (*пульпа*) будет подаваться на металлургический завод по пульпопроводу.

Одна из успешно работаю-

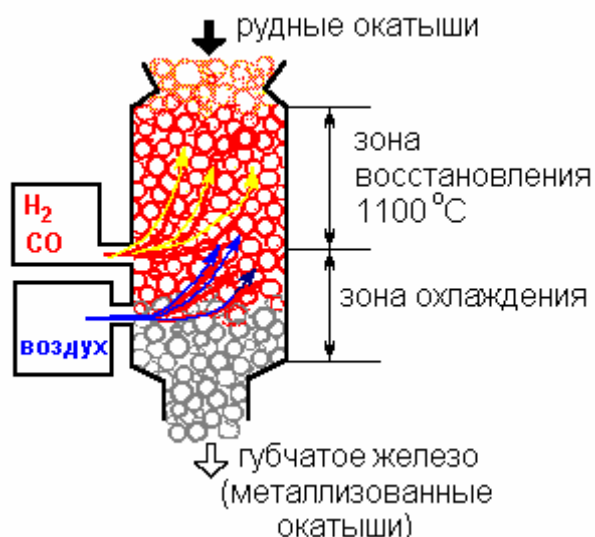


Рис. 1.6. Схема получения железных окатышей в шахтной печи противотока

щих установок для внедоменного получения железа – *шахтная печь противотока* (рис. 1.6, стр.12). Печь имеет вид шахты, в которую сверху загружаются рудные окатыши. Верхняя часть печи – это зона восстановления. Она нагревается до 1100 °С. В нее подаются газы CO и H<sub>2</sub> – продукты конверсии природного газа. Они восстанавливают железо из оксидов, входящих в состав окатышей. Нижняя часть печи – зона охлаждения, куда подается холодный воздух. На выходе из печи получается губчатое железо в виде металлизированных окатышей. Они содержат до 95 % железа, остальное – примеси (марганец, сера, фосфор). Из них в электропечах выплавляют сталь. В такой стали содержится до 0,2 % С.

Есть и другие способы внедоменного получения железа: восстановление в кипящем слое, в капсулах (в виде концентрических слоев).

### Лекция 3

## Раздел II Обработка металлов давлением

**Обработка металлов давлением** (ОМД) – это процессы получения заготовок и деталей машин из металлов методами пластического деформирования.

До 90 % металлических изделий в процессе изготовления подвергаются обработке давлением. Уровень использования обработки давлением в машиностроении определяет уровень этой отрасли в целом.

Продукция кузнечно-прессового производства включает как самые тяжелые и сложные изделия – роторы турбогенераторов, гребные винты морских судов, корпуса реакторов АЭС – так и мелкие товары повседневного спроса: гвозди, крепеж, аэрозольные баллончики, заклепки и пуговицы.

Все это объясняется преимуществами ОМД перед другими видами обработки:

- 1) при обработке давлением расход металла минимален;
- 2) производительность высокая (особенно важно в массовом производстве – автомобилей, сельхозтехники, товаров народного потребления);
- 3) достаточно высокая точность размеров и качество поверхности;
- 4) обработка давлением улучшает структуру и повышает механические характеристики металла.

Ответственные детали – колеса и оси железнодорожных вагонов, роторы турбин – обязательно подвергаются обработке давлением.



Уже за 8 т. лет до н.э. применяласьковка из самородных металлов. Примером мастерства древних кузнецов является железный столб в столице Индии – Дели. Эта цилиндрическая кованая колонна диаметром около 42 см на протяжении многих веков не подвергается коррозии.

## Физические основы ОМД

Обработка металлов давлением возможна благодаря уникальной способности металлов к пластической деформации, то есть к изменению формы металла без разрушения.

Под действием нагрузки в металле возникают напряжения. *Напряжением* в механике называют отношение силы  $P$  к площади сечения  $F$ , на которое она действует:

$$\sigma = \frac{P}{F}.$$

Растущее напряжение вызывает в металле вначале упругую деформацию, затем пластическую и, наконец, разрушение.

*Упругая деформация* – обратимая. Атомы смещаются из положений равновесия, а после снятия нагрузки возвращаются на свои места. Упругая деформация исчезает после снятия нагрузки.

*Пластическая деформация* остается после снятия нагрузки. Атомы смещаются на значительные расстояния и занимают новые устойчивые положения. Слои металла смещаются относительно друг друга, идет скольжение слоев.

При достижении некоторой величины напряжения происходит разрыв межатомных связей, зарождается и растет трещина – происходит *разрушение*.

В процессе обработки металлов давлением необходимо достичь напряжения, достаточного для начала пластической деформации, но ни в коем случае не превысить величину напряжения, при котором начинается разрушение. Для каждого металла и сплава напряжение пластического течения свое. Оно называется *пределом текучести* и обозначается  $\sigma_T$ , или  $\sigma_{02}$ . Максимальное напряжение, которое металл выдерживает, не разрушаясь, называется *пределом прочности* и обозначается  $\sigma_B$ . Обе эти величины приводятся в справочниках. Рабочие напряжения в процессе ОМД должны быть выше предела текучести, но ниже предела прочности:  $\sigma_T < \sigma < \sigma_B$ .

### *Законы пластической деформации*

1) Закон постоянства объёма: Объём тела до деформации равен его объёму после деформации (рис. 1.7, б). Используется для определения размеров заготовок.

2) Закон наименьшего сопротивления: Каждая точка деформируемого тела перемещается в направлении наименьшего сопротивления. Используется для определения формы изделия после обработки давлением (рис. 1.7, а).

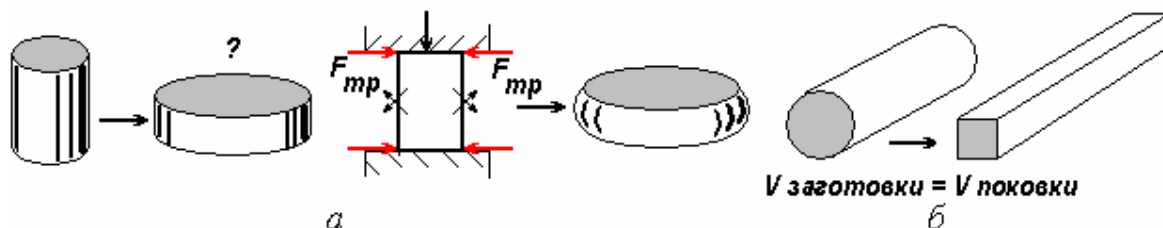


Рис. 1.7. Бочкообразная форма поковки объясняется действием сил трения между заготовкой и бойками молота (а); объёмы поковки и заготовки равны (б)

3) Закон сдвигающего напряжения: Пластическая деформация начнется только тогда, когда сдвигающие напряжения в деформируемом теле достигнут определенной величины, зависящей от природы тела и условий деформирования. Используется при расчетах необходимого усилия, или мощности оборудования.

#### *Холодная и горячая пластическая деформация*

При нагреве сопротивление металла деформации значительно снижается, т. е. уменьшается предел текучести. Для успешной обработки давлением необходимо точно знать, до каких температур нагревать металл.

Существует определённая температура, своя для каждого металла и сплава, называемая *температурой рекристаллизации*  $T_p$ . Она тоже имеется в справочниках, но её можно определить, зная температуру плавления  $T_{пл}$ , по формулам:

$$T_p = 0,4 \cdot T_{пл} - \text{для металлов,}$$

$$T_p = (0,6 \div 0,7) \cdot T_{пл} - \text{для сплавов.}$$

Обратите внимание:  $T_{пл} = t_{пл} + 273$ . ( $T$  – температура в кельвинах,  $t$  – в градусах Цельсия.)

Температура рекристаллизации является границей между областями горячей и холодной деформации. Деформация при температурах ниже  $t_p$  называется *холодной*, а выше  $t_p$  – *горячей*.

Значения  $t_p$  для некоторых материалов:

- чистое железо – 450 °С,
- углеродистая сталь – 550-650 °С,
- медь – 270 °С,
- свинец – –33 °С.

В результате холодной пластической деформации искажается кристаллическая структура металла; зёрна, из которых он состоит, вытягиваются в одном направлении; возрастает прочность и снижается пла-

стичность. Это явление называется *наклёп*. Деформировать наклепанный металл труднее, нужны *большие* усилия, более мощное оборудование. Поэтому холодная пластическая деформация применяется реже, только для самых пластичных металлов или заготовок малого сечения (листы, проволока). Волочение и листовая штамповка обычно осуществляются в холодную. При этом достигается высокая точность размеров и чистота поверхности. Есть возможность влиять на свойства изделия за счёт разной степени наклепа.

При горячей пластической деформации наклёп не возникает, т. е. металл не упрочняется. Сопротивление металла при горячей пластической деформации примерно в 10 раз меньше, чем при холодной. Поэтому можно получить большую величину деформации. Но в процессе нагрева на металле образуется окалина (слой оксидов), что снижает качество поверхности и точность размеров. Прокатка, ковка, прессование, объёмная штамповка обычно выполняются как горячая обработка давлением.

#### *Температурный режим ОМД*

Для осуществления горячей деформации надо и начинать, и заканчивать обработку выше температуры рекристаллизации. В процессековки или прокатки металл непрерывно остывает, и важно не дать ему остыть ниже  $t_p$ . Поэтому для каждого металла и сплава определяют *температурный интервал обработки давлением*: температуру начала и окончания горячей деформации.

*Температура начала деформации* должна быть на 100-200° ниже температуры плавления. При нарушении этого правила (завышении температуры) возможен брак: *перегрев* – рост зерна в металле заготовки сверх допустимых значений, и даже *пережог* – окисление границ зерен. Последний вид брака не исправим.

*Температура окончания деформации* должна на 50-100° превышать температуру рекристаллизации, чтобы не допустить упрочнения.

Температурные интервалы ОМД:  
углеродистые стали – 1200-900 °С,  
медь – 1000-800 °С,  
бронза – 900-700 °С.

Заготовки, особенно крупные, должны нагреваться медленно, чтобы напряжения, возникающие из-за разности температур в центре и на поверхности, не привели к появлению трещин. (Слиток весом 40 т греют 24 часа!)

Иногда, чтобы избежать образования окалины, нагрев ведут в защитных атмосферах.



## Устройства для нагрева заготовок

1) Старейшим нагревательным устройством является *горн*. Металл в нем нагревается в непосредственном контакте с топливом (коксом, древесным или каменным углем). Сейчас горны применяют только в ремонтных мастерских.

2) *Камерная пламенная печь* (рис. 1.8) имеет одинаковую температуру во всем рабочем пространстве. Источник тепла – факел, получаемый при сгорании природного газа или мазута.

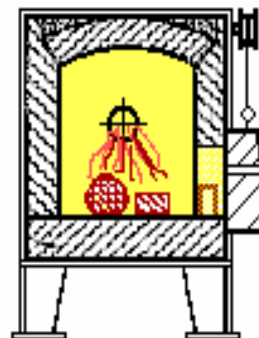


Рис. 1.8. Камерная печь

3) *Методическая пламенная печь* (рис. 1.9) состоит из нескольких зон с постепенно повышающейся температурой. Заготовки в печи продвигаются с помощью толкательных механизмов или конвейера.

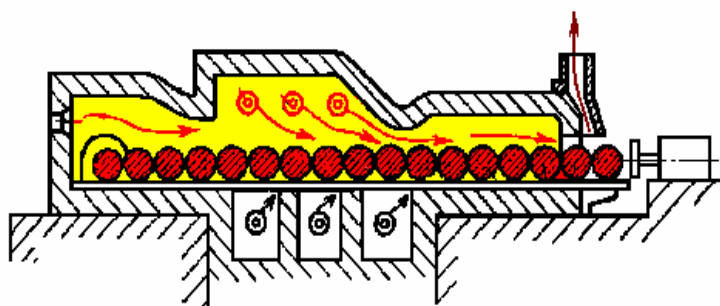


Рис. 1.9. Методическая печь

Для очень крупных заготовок используют печи с выдвижным подом. Загрузку и выгрузку производят с помощью кран-балки. Для нагрева слитков весом десятки тонн в прокатных цехах применяются печи-колодцы.

Их рабочее пространство расположено под полом цеха, а крышка – на уровне пола.

4) *Электрические печи сопротивления* имеют нагреватели в виде лент или спиралей

вдоль всего рабочего пространства. Температурный режим поддерживается автоматически. По конструкции они могут быть как камерными, так и методическими. Окарины в них образуется меньше, чем в пламенных печах.

5) *Электронагревательные устройства* – это установки индукционного или контактного нагрева (рис. 1.10). Они используются для нагрева больших партий одинаковых заготовок, обычно простой геометрической формы.

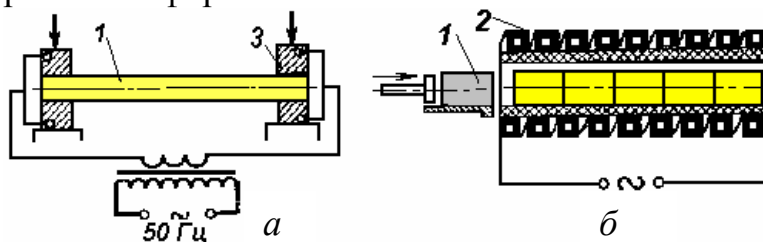
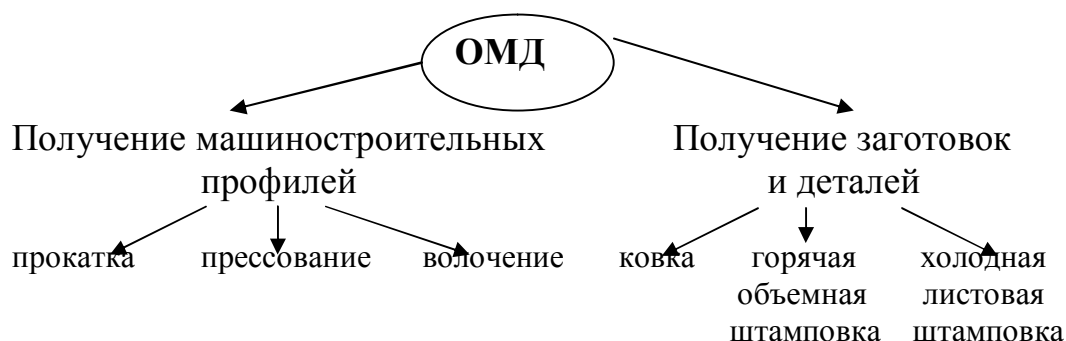


Рис. 1.10. Устройства индукционного (а) и электроконтактного (б) нагрева заготовок: 1 – заготовка; 2 – индуктор; 3 – медный контакт

## Классификация видов обработки металлов давлением



*Машиностроительный профиль* – это длинномерное изделие с определенной формой поперечного сечения. Длина профиля значительно больше поперечных размеров. Примеры профилей: рельсы, балки, прутки, трубы, проволока.

### Прокатное производство

**Прокатка** – способ получения изделий при пластическом деформировании нагретой заготовки между вращающимися валками. При этом силы трения между валками и заготовкой втягивают ее в межвалковый зазор, а нормальные силы, перпендикулярные к поверхности валков, производят работу деформации.

#### Схемы прокатки

1) *Продольная прокатка*: заготовка движется поступательно, перпендикулярно осям валков, валки вращаются в разные стороны (рис. 1.11, а).

2) *Поперечная прокатка*: оси валков и заготовки параллельны, валки вращаются в одну сторону, а заготовка – в противоположную (рис. 1.11, б).

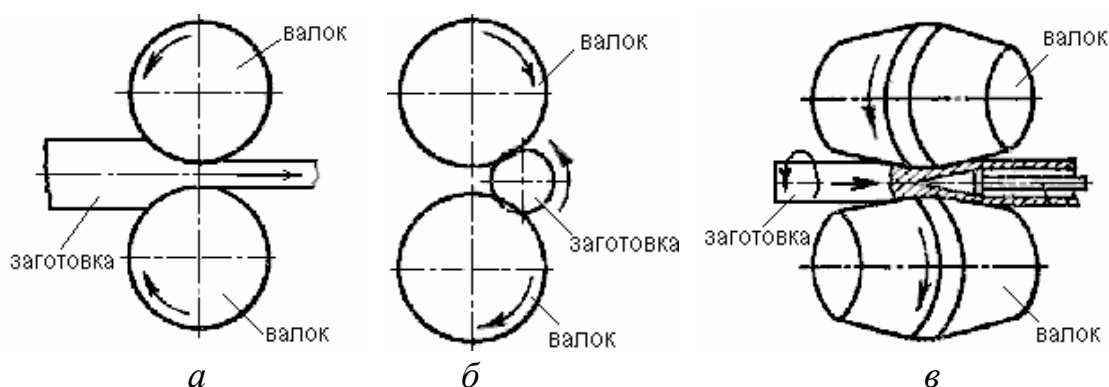


Рис. 1.11. Схемы прокатки:

а – продольная; б – поперечная; в – поперечно-винтовая

3) *Поперечно-винтовая прокатка*: валки вращаются в одну сторону, заготовка одновременно вращается в противоположном направлении и движется поступательно между валками (рис. 1.11, в).

#### *Деформация и силы при прокатке*

Объем металла, в котором в данный момент происходит пластическая деформация, называется *очагом деформации*.

На рис. 1.12 показано сечение  $ABCD$  очага деформации плоскостью чертежа. По мере вращения валков очаг деформации перемещается по прокатываемому металлу.

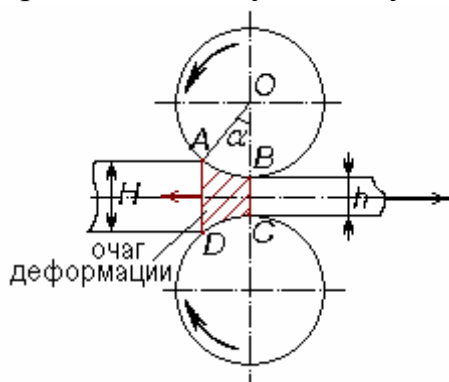


Рис. 1.12. Очаг деформации при прокатке

Дуга  $AB$ , по которой валок соприкасается с металлом заготовки, называется *дугой захвата*, а угол  $\alpha$  между радиусами валка, опирающийся на дугу захвата, – *углом захвата*.

На заготовку действует сила трения  $T$ , направленная по касательной к окружности валка, – она втягивает заготовку в зазор (см. рис. 1.13). Нормальная реакция опоры  $N$ , направленная по радиусу, выталкивает заготовку. Для того чтобы за-

готовка втягивалась в зазор, должно выполняться условие  $T_x > N_x$ , т. е.

$$T \cdot \cos \alpha > N \cdot \sin \alpha;$$

сила трения  $T = N \cdot k_{тр}$ , следовательно

$$N \cdot k_{тр} \cdot \cos \alpha > N \cdot \sin \alpha;$$

$$k_{тр} > \operatorname{tg} \alpha.$$

*Условие захвата металла валками*: коэффициент трения между валками и заготовкой должен превышать тангенс угла захвата.

Тогда силы трения будут втягивать заготовку в межвалковый зазор, и прокатка пойдет. В противном случае валки будут отталкивать заготовку.

При горячей прокатке стали угол захвата составляет от 15 до 24°, а при холодной – от 3 до 8°. Это значит, что при горячей прокатке можно уменьшить высоту заготовки  $H$  на большую величину, чем при холодной, так как силы трения при горячей деформации больше.

Деформацию при прокатке определяют двумя величинами: относительным обжатием  $\epsilon$  и коэффициентом вытяжки  $\mu$ .

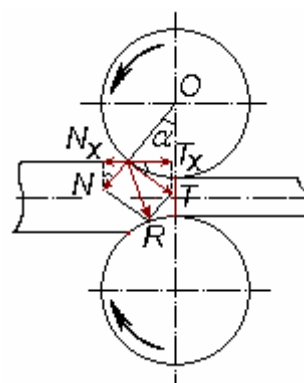


Рис. 1.13. К расчету условия захвата

Относительное обжатие определяется как  $\varepsilon = \frac{H - h}{H} \cdot 100\%$ , где  $\Delta H = H - h$  – абсолютное обжатие, мм;

коэффициент вытяжки  $\mu = \frac{l}{l_0} = \frac{F_0}{F}$ , где  $l_0$  и  $F_0$  – длина и площадь

поперечного сечения заготовки до прокатки, а  $l$  и  $F$  – после.

При прокатке величина обжатия составляет обычно 40–60 %, а вытяжка  $\mu = 1,2$ –2,0.

#### Инструмент для прокатки

Инструмент для прокатки – это валки (рис. 1.14). Рабочая часть валка называется бочкой, шейки служат для опоры на подшипники, фасонный выступ, называемый трефой, – для передачи валку вращения от привода. Валки – парный инструмент: клеть прокатного стана состоит из двух или более валков (но не одного).

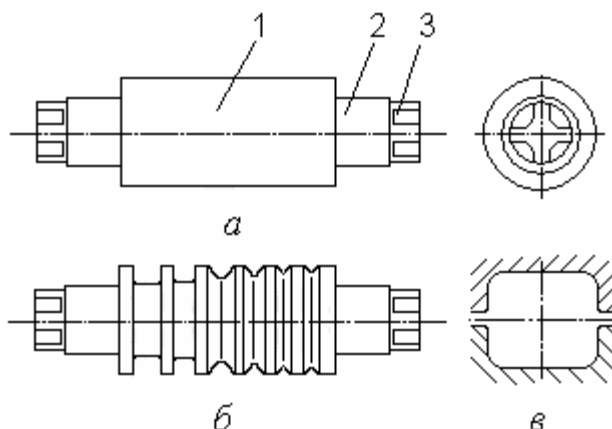
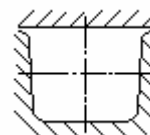


Рис. 1.14. Валки: гладкий (а) и ручьевого (б):  
1 – бочка; 2 – шейка; 3 – трефа; в – калибр

В зависимости от формы рабочей части валки могут быть гладкими (рис. 1.14, а), ступенчатыми и ручьевыми (рис. 1.14, б). Гладкие валки служат для прокатки листа. У ручьевых валков на боковой поверхности имеются вырезы – ручки. При смыкании пары валков их ручки образуют просвет определенной формы – калибр (рис. 1.14, в). Поперечное сечение прокатываемой заготовки принимает форму калибра. Такие валки служат для получения сортового проката.

Изображенный на рис. 1.14, в, калибр называется открытым, так как линия разъема валков проходит через калибр; в противном случае (линия разъема валков вне калибра) калибр закрытый.



#### Оборудование для прокатки

Комплект валков со станиной образует рабочую клеть. Рабочая клеть с передаточным механизмом и электродвигателем – это рабочая линия прокатного стана (см. рис. 1.15). Передаточный механизм состоит из редуктора, шестеренной клетки, шпинделей и муфт. Редуктор понижает число оборотов электродвигателя, шестеренная клетка передает вращение с одного вала на два шпинделя, чтобы привести в движение

оба валка. Нажимное устройство позволяет регулировать положение верхнего валка, т. е. величину зазора.

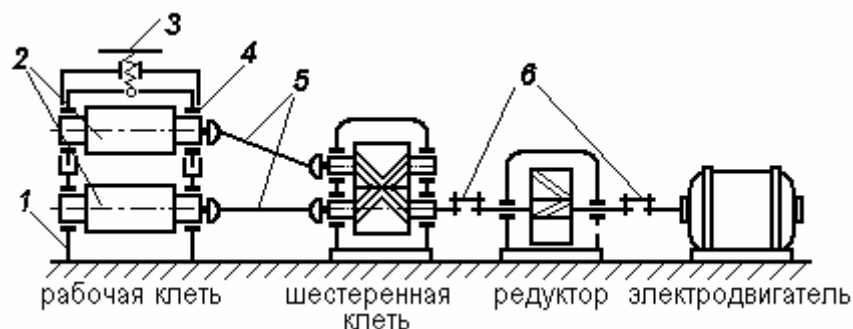


Рис. 1.15. Одноклетьевого прокатный стан:

1 – станина; 2 – валки; 3 – нажимное устройство; 4 – подшипники;  
5 – шпиндели; 6 – муфты

По количеству валков клетки прокатных станов могут быть *двухвалковые (дуо)*, *трёхвалковые (трио)*, *четырёхвалковые (кварто)* и *многовалковые* (рис. 1.16).

В трёхвалковой клетке заготовка прокатывается вначале между нижним и средним валками, а потом – в обратном направлении, между средним и верхним.

В случае четырёх валков в клетке два из них являются рабочими, а два других, большего диаметра, – опорными. Они нужны, чтобы уменьшить деформацию рабочих валков.

Во многовалковых клетках рабочие валки – бесприводные, вращение им передается от приводных валков, а те, в свою очередь, опираются на большие опорные валки. Таким способом достигается минимальная деформация рабочих валков и высокая точность размеров прокатываемой заготовки.

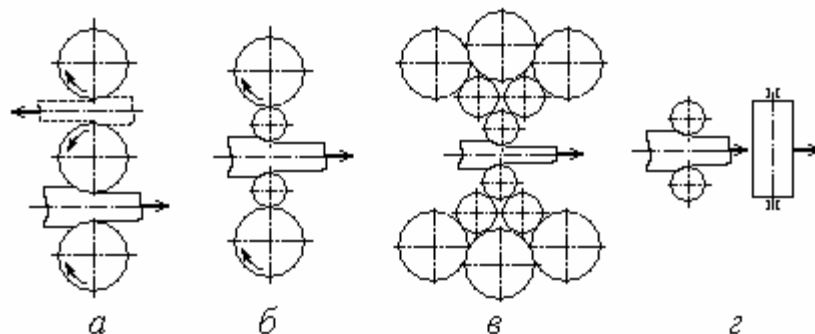


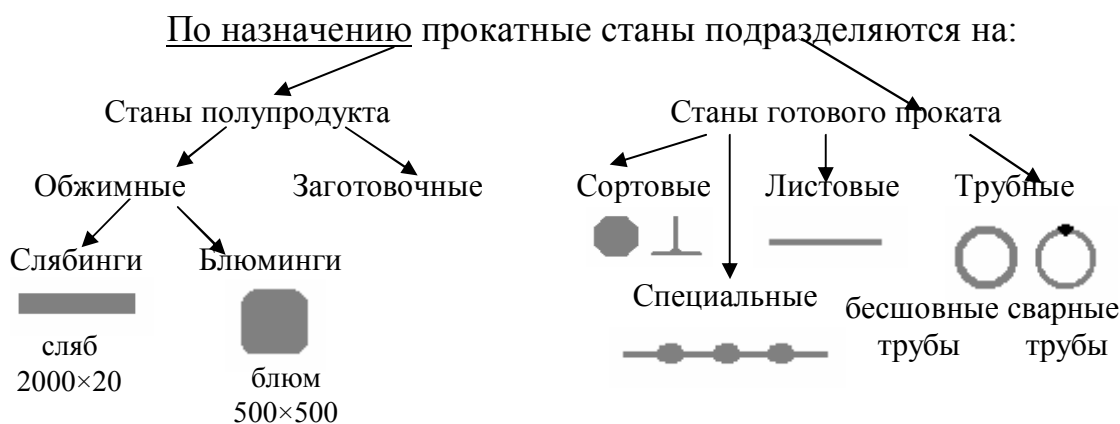
Рис. 1.16. Клетки прокатных станов:

а – клетка трио; б – клетка кварто; в – многовалковая; г – универсальная

*Универсальные клетки* с двумя парами валков, расположенных одна горизонтально, другая – вертикально, позволяют обрабатывать и боковые стороны заготовки. Это нужно для толстых листов, плит, широкополочных балок.

В самых мощных прокатных станах – блюмингах и слябингах – клетки *реверсивные*: направление вращения валков меняется после каждого прохода.

По числу рабочих клеток станы могут быть одно- и многоклетьевыми. Наиболее современные – *многоклетьевые непрерывные* станы. На них полоса металла одновременно прокатывается в нескольких клетях.



Исходной заготовкой для получения всех видов проката служат слитки, которые на обжимных станах прокатываются на блюмы или слябы. Затем блюмы поступают на заготовочные станы, а оттуда – на сортовые или трубные станы. Из слябов на листовых станах прокатывают листы. Периодический прокат изготавливают из полупродуктов соответствующего сечения, а штучные заготовки (кольца, колеса) – из отдельных литых или штампованных заготовок. Шары получают из прутков.

**Продукция прокатного производства**

Все многообразие профилей проката называется *сортаментом*. Сортамент делится на четыре группы:

1. *Сортовой прокат* – простые и фасонные профили (рис. 1.17).

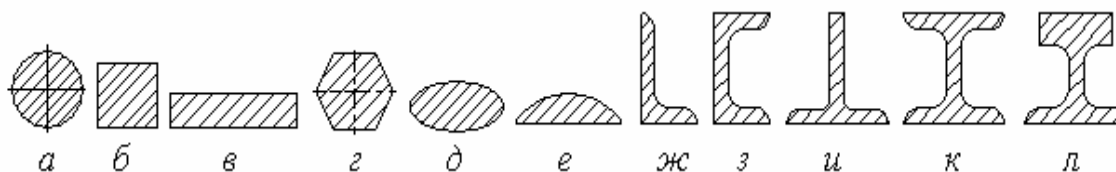


Рис. 1.17. Профили сортового проката – простые (а–е) и фасонные (ж–л): а – круг; б – квадрат; в – полоса; г – шестигранник; д – овальная сталь; е – сегментная сталь; ж – уголок; з – швеллер; и – тавровая балка; к – двутавровая балка; л – рельс

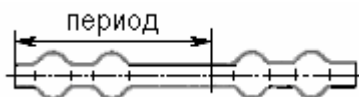
2. *Листовой прокат* – толстый лист (толщиной свыше 4 мм), тонкий лист (менее 4 мм) и фольги (менее 0,2 мм). Максимальная толщина может составлять 160 мм (броневые плиты).

По назначению листовой прокат делится на автотракторную листовую сталь, электротехническое, трансформаторное железо, кровельную жечь и т. д. Листы могут быть покрыты цинком, оловом, алюминием, пластиком.



3. *Трубы* – бесшовные (диаметр от 30 до 650 мм, толщина стенки от 2 до 160 мм) и сварные (диаметр от 5 до 2500 мм, толщина стенки от 0,5 до 16 мм).

4. *Специальные виды проката*: кольца, шары, шестерни, колеса, периодический прокат. Периодический прокат используют для получения штампованных поволоков и обработки деталей резанием с минимальными отходами.



## Лекция 4

### Прессование

**Прессование** – процесс получения изделий путем выдавливания нагретого металла из замкнутой полости (контейнера) через отверстие инструмента (матрицы). Существуют два способа прессования: прямой и обратный. При *прямом прессовании* (рис. 1.18, *а*) металл выдавливается в направлении движения пуансона. При *обратном прессовании* (рис. 1.18, *б*) металл движется из контейнера навстречу движению пуансона.

Исходной заготовкой для прессования является слиток или горячекатаный пруток. Для получения качественной поверхности после прессования заготовки обтачивают и даже шлифуют.

Нагрев ведется в индукционных установках или в печах-ваннах в расплавах солей. Цветные металлы прессуются без нагрева.

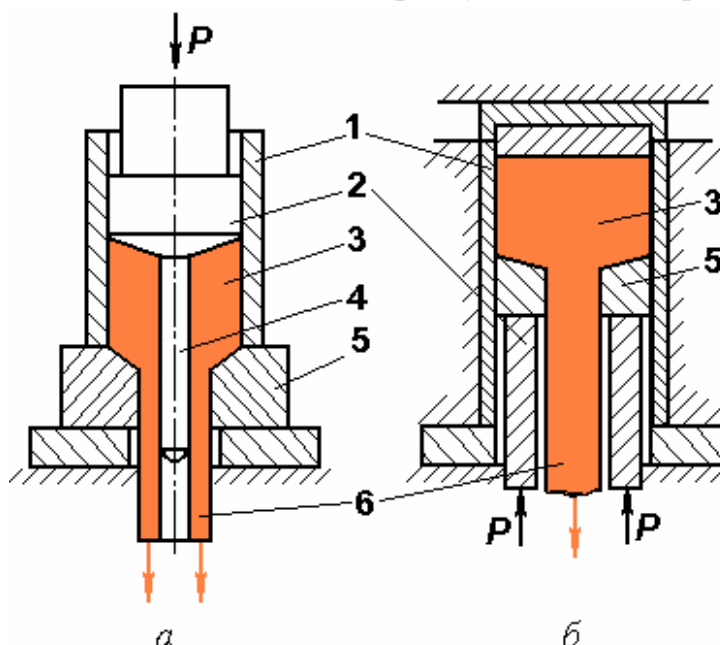


Рис. 1.18. Прессование прямое (*а*) и обратное (*б*):  
1 – контейнер; 2 – пуансон; 3 – заготовка; 4 – игла; 5 – матрица; 6 – профиль

### ***Деформация при прессовании***

При прессовании реализуется схема всестороннего неравномерного сжатия, при этом нет растягивающих напряжений. Поэтому прессовать можно даже стали и сплавы с низкой пластичностью, например, инструментальные. Даже такие хрупкие материалы как мрамор и чугун поддаются прессованию. Т. е. прессованием можно обрабатывать материалы, которые из-за низкой пластичности другими методами деформировать невозможно.

Коэффициент вытяжки  $\mu$  при прессовании может достигать 30-50.

### ***Инструмент для прессования***

Инструмент – это контейнер, пуансон, матрица, игла (для получения полых профилей). Профиль получаемого изделия определяется формой отверстия матрицы; отверстия в профиле – иглой. Условия работы инструмента очень тяжелые: большие контактные давления, истирание, нагрев до 800-1200 °С. Его изготавливают из высококачественных инструментальных сталей и жаропрочных сплавов.

Для уменьшения трения применяют твердые смазки: графит, порошки никеля и меди, дисульфид молибдена.

### ***Оборудование для прессования***

Это гидравлические прессы, с горизонтальным или вертикальным расположением пуансона.

### ***Продукция прессования***

Прессованием получают простые профили (круг, квадрат) из сплавов с низкой пластичностью и профили очень сложных форм, которые нельзя получить другими видами ОМД (рис. 1.19).

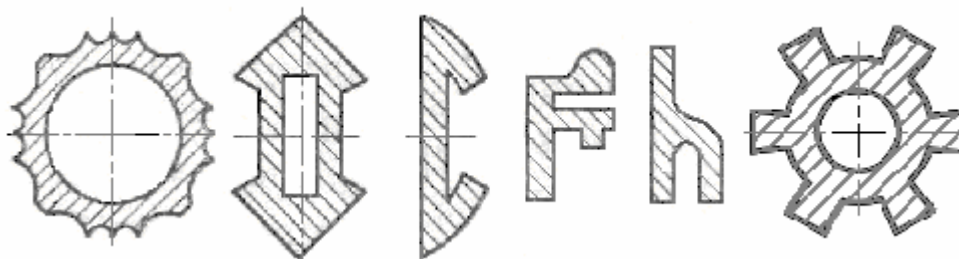


Рис. 1.19. Прессованные профили

### ***Преимущества прессования***

Точность прессованных профилей выше, чем прокатанных. Как уже говорилось, можно получать профили самых сложных форм. Процесс универсален с точки зрения перехода с размера на размер и с одного типа профиля на другой. Смена инструмента не требует больших затрат времени.



Возможность достижения очень высоких степеней деформации делает этот процесс высокопроизводительным. Скорости прессования достигают 5 м/с и более. Изделие получается за один ход инструмента.

#### **Недостатки прессования**

Большой отход металла в *пресс-остаток* (10-20 %), так как весь металл не может быть выдавлен из контейнера; неравномерность деформации в контейнере; высокая стоимость и большой износ инструмента; необходимость мощного оборудования.

## **Волочение**

**Волочение** – изготовление профилей путем протягивания заготовки через постепенно сужающееся отверстие в инструменте – *волоке*.

Исходной заготовкой для волочения является пруток, толстая проволока или труба. Заготовка не нагревается, т. е. волочение – это холодная пластическая деформация.

Конец заготовки заостряется, его пропускают сквозь волоку, захватывают зажимным устройством и протягивают (рис. 1.20).

#### **Деформация при волочении**

При волочении на заготовку действуют растягивающие напряжения. Металл должен деформироваться только в сужающемся канале волоки; за пределами инструмента деформация недопустима. Обжатие за один проход небольшое: вытяжка  $\mu = 1,1 \div 1,5$ . Для получения нужного профиля проволока протягивается через несколько отверстий уменьшающегося диаметра.

Так как осуществляется холодная деформация, то металл наклепывается – упрочняется. Поэтому между протягиваниями через соседние волокна выполняется *отжиг* (нагрев выше температуры рекристаллизации) в трубчатых печах. Наклеп снимается, и металл заготовки снова становится пластичным, способным к дальнейшей деформации.

#### **Инструмент для волочения**

Инструмент – это *волока*, или *фильера*, представляющая собой кольцо с профилированным отверстием. Изготавливают волокна из твердых сплавов, керамики, технических алмазов (для очень тонкой проволоки, диаметром менее 0,2 мм). Трение между инструментом и заготов-

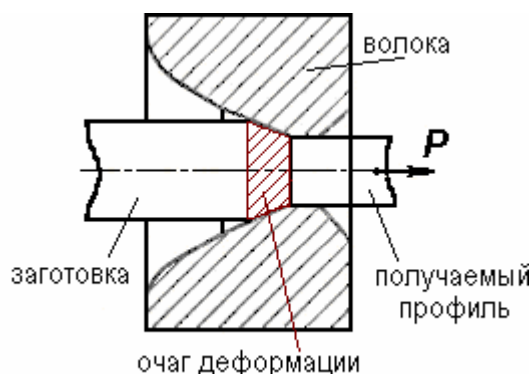


Рис. 1.20. Схема волочения

кой уменьшают с помощью твердых смазок. Для получения полых профилей применяют оправки.

Рабочее отверстие волоки имеет по длине четыре характерные зоны (рис. 1.21): I – входная, или смазочная, II – деформирующая, или рабочая, с углом  $\alpha = 8 \div 24^\circ$ , III – калибрующая, IV – выходной конус.

Допуск на размер проволоки в среднем составляет 0,02 мм.

#### Оборудование для волочения

Существуют волочильные станы различных конструкций – барабанные, реечные, цепные, с гидравлическим приводом и др.

**Барабанные станы** (рис. 1.22) применяют для волочения проволоки, прутков и труб малого диаметра, которые можно сматывать в бунты.

Барабанные станы многократного волочения могут включать до 20 барабанов; между ними располагаются волоки и печи для отжига. Скорость движения проволоки находится в пределах 6–3000 м/мин.

**Цепные волочильные станы** (рис. 1.23) предназначены для прутков и труб большого сечения. Длина получаемого изделия ограничена длиной станины (до 15 м). Волочение труб выполняют на оправке.

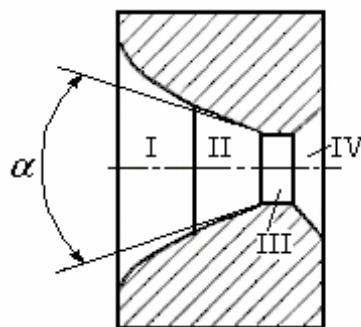


Рис. 1.21. Волока

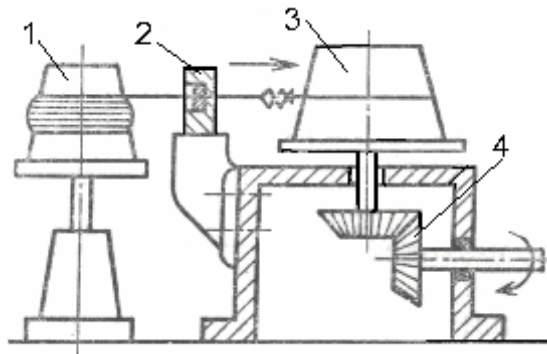


Рис. 1.22. Барабанный волочильный стан: 1 – вертушка с бунтом проволоки; 2 – волока; 3 – барабан; 4 – зубчатая передача

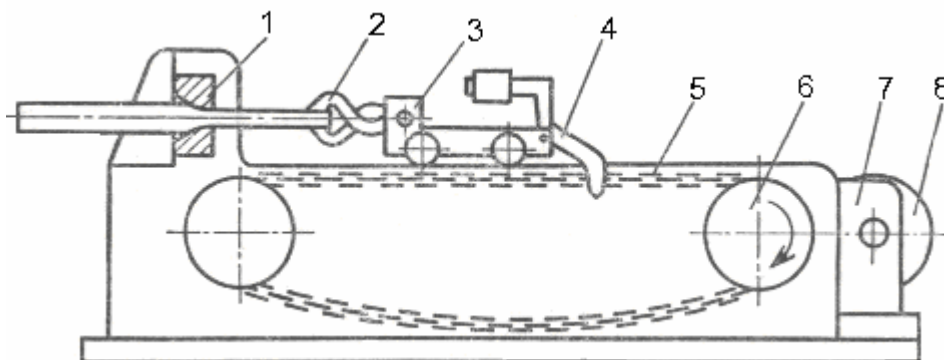


Рис. 1.23. Цепной волочильный стан: 1 – волока; 2 – клещи; 3 – каретка; 4 – тяговый крюк; 5 – цепь; 6 – ведущая звездочка; 7 – редуктор; 8 – электродвигатель

### **Продукция, получаемая волочением**

Волочением получают проволоку диаметром от 0,002 до 5 мм, а также прутки, фасонные профили (различные направляющие, шпонки, шлицевые валики) и трубы (рис. 1.24).

### **Преимущества волочения**

Это высокая точность размеров (допуски не более сотых долей мм), малая шероховатость поверхности, возможность получать тонкостенные профили, высокая производительность, малое количество отходов. Процесс универсален (просто и быстро можно заменить инструмент), поэтому широко распространен.



Рис. 1.24. Профили, получаемые волочением

Важно также, что можно изменять свойства получаемых изделий за счет наклепа и термообработки.

### **Недостатки волочения**

Неизбежность наклепа и необходимость отжигов усложняет процесс. Обжатие за один проход невелико.

## **Ковка**

**Ковкой** называют получение изделий путем последовательного деформирования нагретой заготовки ударами универсального инструмента – *бойков*. Получаемую заготовку или готовое изделие называют *поковкой* (рис. 1.25).

Исходной заготовкой служат слитки или блюмы, сортовой прокат простого сечения. Нагревают заготовки обычно в печах камерного типа.

### **Деформация при ковке**

Деформация в процессековки идет по схеме свободного пластического течения между поверхностями инструмента. Деформирование может выполняться последовательно на отдельных участках заготовки, поэтому её размеры могут значительно превышать площадь бойков.

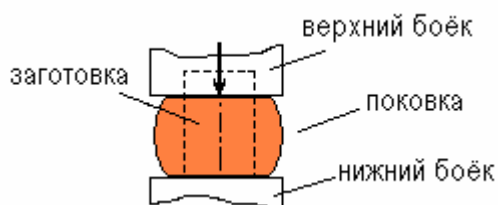


Рис. 1.25. Схемаковки (осадка)

Величину деформации выражает *уковка*: 
$$U = \frac{F_{\max}}{F_{\min}}$$

где  $F_{\max}$  и  $F_{\min}$  – начальная и конечная площадь поперечного сечения заготовки, причем берется отношение большей площади к меньшей, поэтому уковка всегда больше 1. Чем больше значение уковки, тем лучше прокован металл. Некоторые из операцийковки показаны на рис. 1.26.

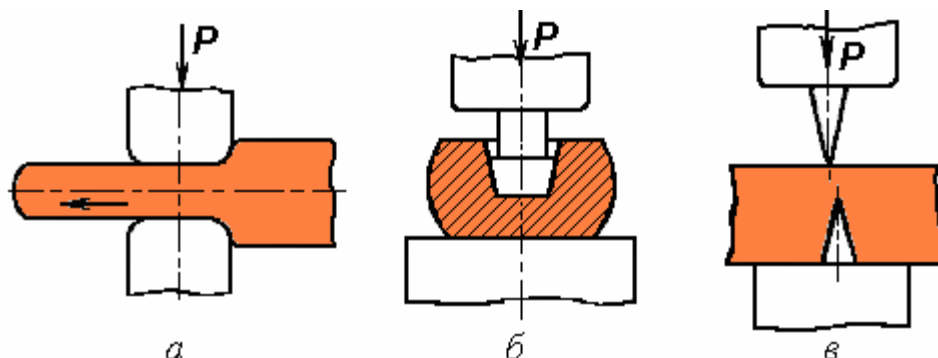


Рис. 1.26. Операцииковки:

$a$  – протяжка;  $b$  – прошивка (получение отверстия);  $c$  – рубка (разделение на части)

#### **Инструмент дляковки**

Инструмент является универсальным (применимым для самых разных по форме поковок): бойки плоские или вырезные и набор подкладного инструмента (оправок, прожимок, прошивней и т. д.).

#### **Оборудование дляковки**

Применяются машины динамического, или ударного, действия – молоты и машины статического действия – гидравлические прессы.

Молоты подразделяются на *пневматические*, с массой падающих частей до 1 т, и *паровоздушные*, с массой падающих частей до 8 т. Молоты передают заготовке энергию удара за доли секунды. Рабочим телом в молотах является сжатый воздух или пар.

Гидравлические прессы с усилием до 100 МН предназначены для обработки самых тяжелых заготовок. Они зажимают заготовку между бойками в течение десятков секунд. Рабочим телом в них является жидкость (водная эмульсия, минеральное масло).

#### **Применениековки**

Ковка чаще всего применяется в единичном и мелкосерийном производстве, особенно для получения тяжелых поковок. Из слитков весом до 300 т можно получить изделия только ковкой. Это валы гидрогенераторов, турбинные диски, коленчатые валы судовых двигателей, валки прокатных станов.

#### **Преимуществаковки**

Это, прежде всего, универсальность процесса, позволяющая получить самые разнообразные изделия. Дляковки не требуется сложного инструмента. В ходековки улучшается структура металла: волокна в

поковке расположены благоприятно для того, чтобы выдерживать нагрузку при эксплуатации, литая структура измельчается.

#### **Недостаткиковки**

Это, конечно, низкая производительность процесса и необходимость значительных припусков на механическую обработку. Поковки получаются с низкой точностью размеров и большой шероховатостью поверхности.

### **Горячая объемная штамповка**

**Горячая объёмная штамповка** – процесс получения изделий пластическим деформированием нагретой заготовки с помощью специального инструмента – *штампа*. При этом течение металла ограничено углублениями, выполненными в половинках штампа, которые, смыкаясь, образуют единую замкнутую полость – *ручей*.

Исходная заготовка для штамповки – раскroенный прокат простого профиля. Получаемое изделие называется *штампованной поковкой*.

Применяется штамповка в открытых и закрытых штампах. У *открытого штампа* (рис. 1.27, *а*) по всему периметру ручья есть зазор – *облойная канавка*, куда вытесняется излишек металла (до 20 %). Поверхность разъема штампа плоская. При штамповке не требуется высокая точность раскроя заготовки. Объем заготовки больше объема поковки на величину облоя, который затем обрезается. Узкий мостик облойной канавки гарантирует заполнение всей полости штампа металлом, так как он создает наибольшее сопротивление течению металла.

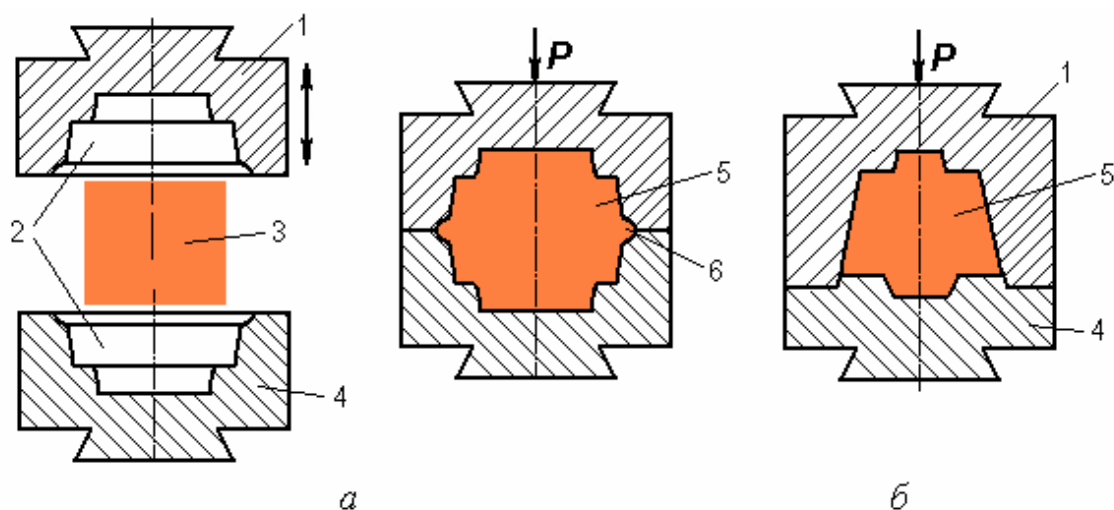


Рис. 1.27. Схема открытой (*а*) и закрытой (*б*) объемной штамповки:

- 1 – верхняя половина штампа; 2 – полости; 3 – заготовка;
- 4 – нижняя половина штампа; 5 – ручей; 6 – облойная канавка

При штамповке в *закрытых штампах* (рис. 1.27, б) объем заготовки равен объему поковки, так как облойной канавки нет. Необходимо точно выдерживать размеры заготовки и устанавливать ее строго по центру штампа, иначе половинки штампа не сомкнутся, не будет заполнения всей полости. Поверхность разъема штампа более сложная, с направляющей конической частью.

Закрытая штамповка имеет преимущества перед открытой: экономится металл (нет облоя), и волокна расположены более благоприятно, обтекая контур поковки, они не перерезаются при удалении облоя.

Но конструкция закрытых штампов сложнее, изготовление их дороже, а стойкость ниже.

#### *Деформация при штамповке*

Деформация осуществляется одновременно по всей поверхности заготовки, нельзя деформировать только ее часть. Поэтому величина уковки редко превышает 2-3.

#### *Инструмент для штамповки*

Инструмент специальный – штамп. Для каждой поковки разрабатывается чертеж, и изготавливается свой штамп. Обязательно предусматриваются припуски на механическую обработку и на усадку при охлаждении. Для свободного извлечения поковки из штампа назначаются уклоны (3-10°). Поверхности сопрягаются по радиусам.

В штампе с одним разъемом нельзя получить сквозное отверстие, оно только намечается. После штамповки надо в специальных штампах обрезать облой и пробивать пленки.

Штамп крепится к ползуну штамповочного молота или прессы с помощью выступа, называемого «ласточкин хвост», и клиньев.

#### *Оборудование для штамповки*

1) *Паровоздушные штамповочные молоты* подобны ковочным. Молоты совершают 3-5 ударов для заполнения полости штампа металлом заготовки.

2) *Кривошипные штамповочные прессы* (КШП, рис. 1.28) имеют более высокую производительность, чем молоты. Штамповка ве-

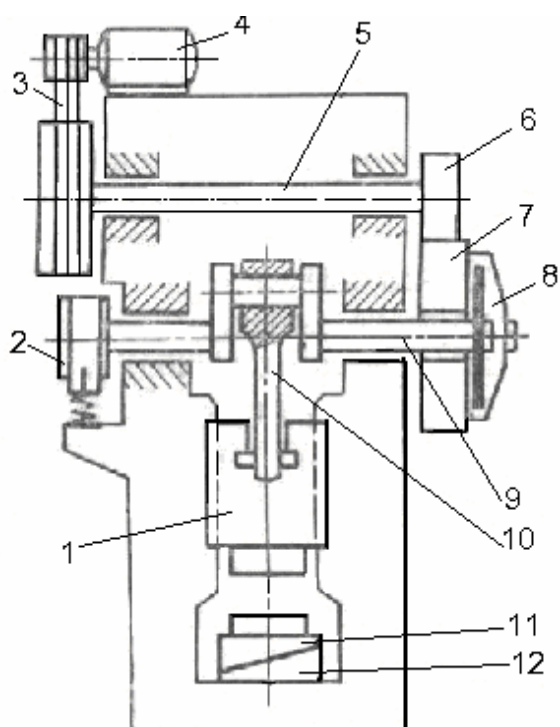


Рис. 1.28. Кривошипный штамповочный пресс



дется за один удар, так как длина хода ползуна строго регламентирована. Прессы дороже.

От электродвигателя 4 движение передается клиновыми ремнями на шкив 3 и вал 5. Зубчатые колеса 6 и 7 с помощью фрикционной дисковой муфты 8 могут быть сцеплены с кривошипным валом 9. Вал передает движение шатуну 10, шатун преобразует вращательное движение в возвратно-поступательное движение ползуна 1. Тормоз 2 нужен для остановки вращения кривошипного вала. Высоту стола 11 можно регулировать клином 12, устанавливая штамп в нужное положение.

3) *Горизонтально-ковочные машины* (ГКМ, см. рис. 1.29) применяются для штамповки изделий типа стержень с фланцем, стакан, кольцо. На них можно получать сквозные отверстия, так как штамп состоит из трех частей: подвижной и неподвижной матрицы и пуансона.

4) *Гидравлические прессы* применяют для самых тяжелых поковок (до 3 т).

#### **Применение штамповки**

В крупносерийном производстве поковок.

#### **Преимущества штамповки**

По сравнению с ковкой, штамповка обеспечивает большую производительность и более высокую точность (припуски в 2-3 раза меньше).

#### **Недостатки штамповки**

Высокая стоимость инструмента и необходимость большой мощности оборудования. Штамповка не позволяет деформировать очень тяжелые заготовки (весом десятки и сотни тонн).

Существует и *холодная объемная штамповка*. Это процессы *холодного выдавливания* (подобно прессованию) для получения баллонов и тубиков из пластичных металлов, *холодной высадки* (изготовление гвоздей, болтов, заклепок) и *чеканки* (чеканят монеты, медали, значки).

### **Холодная листовая штамповка**

*Холодная листовая штамповка* – это получение плоских и пространственных изделий из заготовки в виде листа, полосы, ленты.

Исходная заготовка обычно имеет толщину не более 10 мм.

Операции листовой штамповки делятся на *разделительные* (заготовка разрушается) и *формообразующие* (разрушение недопустимо).

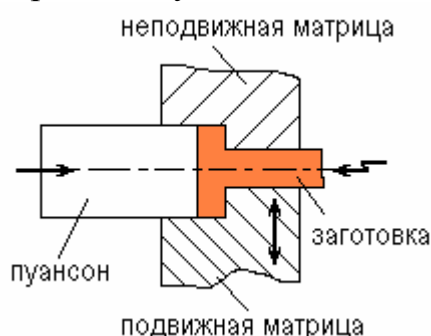


Рис. 1.29. Схема штамповки на горизонтально-ковочной машине

Примерами разделительных операций являются вырубка и пробивка. Они выполняются по одной схеме (рис. 1.30, *а*), но *вырубка* формирует внешний периметр заготовки, а *пробивка* – внутренний. Штамп состоит из пуансона и матрицы. От их острых кромок начинается развитие трещин. Трещины встречаются, и часть заготовки отделяется.

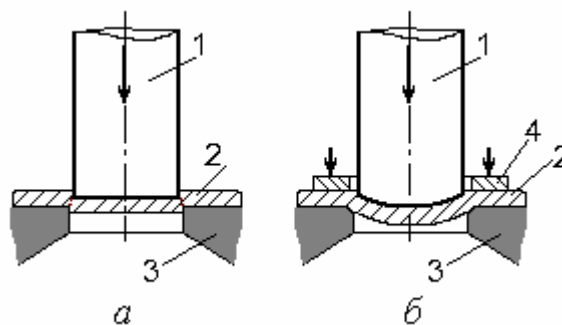


Рис. 1.30. Схема пробивки (*а*) и вытяжки (*б*):  
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица;  
4 – прижим

Примером формообразующей операции является *вытяжка* – получение объемного изделия из плоской заготовки (рис. 1.30, *б*). Пуансон и матрица для вытяжки имеют скругленные кромки. Прижим исключает образование складок на фланце. При вытяжке можно уменьшать толщину стенки примерно в 2 раза, но дно изделия останется такой же толщины.

#### ***Деформация при холодной листовой штамповке***

Холодная деформация приводит к упрочнению металла, поэтому иногда приходится делать отжиги. Холодная листовая штамповка применима только к пластичным металлам и сплавам: низкоуглеродистым сталям, сплавам алюминия, меди, титана.

#### ***Инструмент для холодной листовой штамповки***

Инструмент специальный для каждой операции и размера изделия. Это матрицы и пуансоны соответствующей формы.

#### ***Оборудование для холодной листовой штамповки***

Используются кривошипные прессы и гидравлические прессы (для толстых листов). Разработаны методы высокоскоростной листовой штамповки с использованием энергии взрыва или электрического разряда.

#### ***Применение холодной листовой штамповки***

Для получения изделий малой массы, но большой прочности и жёсткости. Широко используется в авиастроении, в производстве автомобилей и тракторов.

Краткая характеристика способов обработки металлов давлением дана в табл. 1.1.



Таблица 1.1

## Способы ОМД

Название	Где происходит деформация	Инструмент	Оборудование	Заготовка	Нагрев	Величина деформации	Получаемые изделия
<b>Получение профилей</b>							
<i>Прокатка</i>	В зазоре между валками	Валки	Прокатный стан	Слиток, блюм, сляб, полупродукт	Обычно горячая деформация	$\mu \leq 2$	Сортовой прокат, листы, трубы, специальные виды проката
<i>Волочение</i>	В отверстии волоки	Волока	Волоочильный стан	Пруток, труба, горячекатаная проволока	Холодная деформация	$\mu \leq 1,5$	Проволока, калиброванные прутки и трубы, фасонные профили
<i>Прессование</i>	В отверстии матрицы	Матрица, игла	Гидравлический пресс	Слиток, горячекатаный пруток	Обычно горячая деформация	$\mu = 30 \div 50$	Простые и сложные профили, инструмент
<b>Получение заготовок и деталей</b>							
<i>Ковка</i>	Между бойками	Бойки, подкладной инструмент	Молоты и прессы	Слиток, блюм, сортовой прокат простого сечения	Горячая деформация	$U \leq 20$	Широкий ассортимент поковок весом до 300 т
<i>Объемная штамповка</i>	В полости штампа	Штамп	Молоты и прессы, КШП, ГКМ	Прокат простого сечения	Чаще горячая деформация	$U \leq 2 \div 3$	Поковки серийного производства весом до 3 т
<i>Холодная листовая штамповка</i>	В зазоре между пуансоном и матрицей	Матрица и пуансон	КШП, гидравлический пресс	Лист, полоса, лента	Холодная деформация	-	Объемные и плоские детали с малой массой и большой прочностью

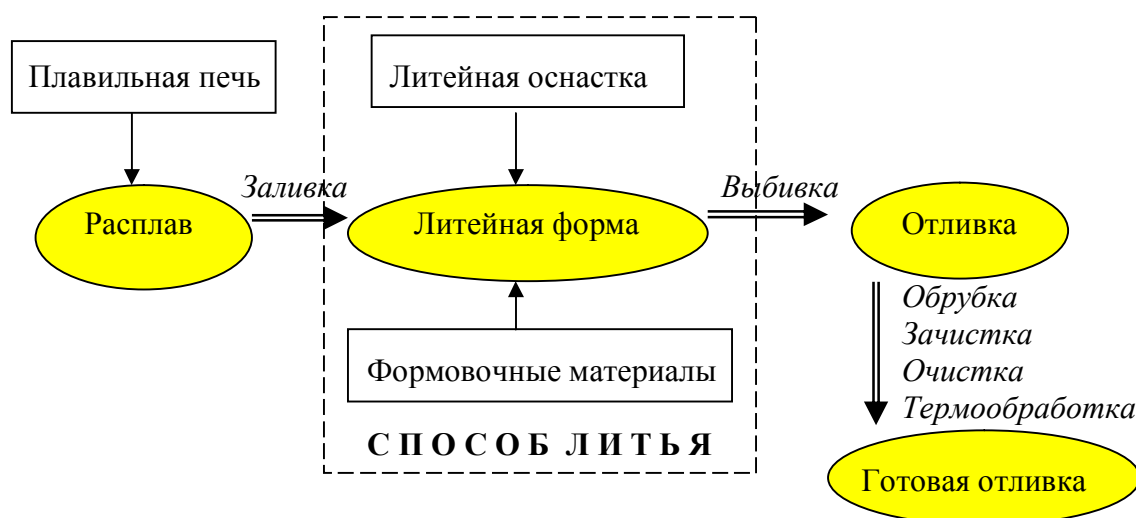
## Раздел III Литейное производство

Задача *литейного производства* – получение заготовок и деталей машин путем заливки расплавленного металла в литейную форму, полость которой имеет очертания заготовки. После затвердевания металл сохраняет форму полости. Получаемые заготовки называются *отливками*.

Отливки могут иметь самую различную массу и размеры. Самые тяжелые отливки весят до 300 т; максимальная длина – 20 м, толщина стенок до 500 мм.

Существует множество способов литья, различаемых по материалу формы, операциям для её изготовления, вариантам заливки жидкого металла в форму и другим признакам.

### Схема техпроцесса получения отливок



### Литейные свойства сплавов

Есть сплавы, из которых изделия получают методами пластического деформирования (обработкой давлением), а есть литейные, из которых выгоднее отливать детали. Есть сплавы, пригодные и для литья, и для обработки давлением, например, некоторые бронзы. Чугуны являются чисто литейными сплавами.

Литейные сплавы должны обладать следующими свойствами: хорошей жидкотекучестью, малой линейной и объёмной усадкой, не иметь склонности к образованию трещин и газовых раковин и пор.

1. *Жидкотекучесть* – способность сплава в жидком состоянии течь по каналам формы, заполнять все ее полости и точно воспроизводить контуры отливки.

Определяется жидкотекучесть заливкой технологической спиральной пробы (рис. 1.31). Мера жидкотекучести – длина заполненной части спирального канала в мм. Есть сплавы, текущие по каналам формы легко, как вода, а есть – вязкие, текущие медленно, как мёд.

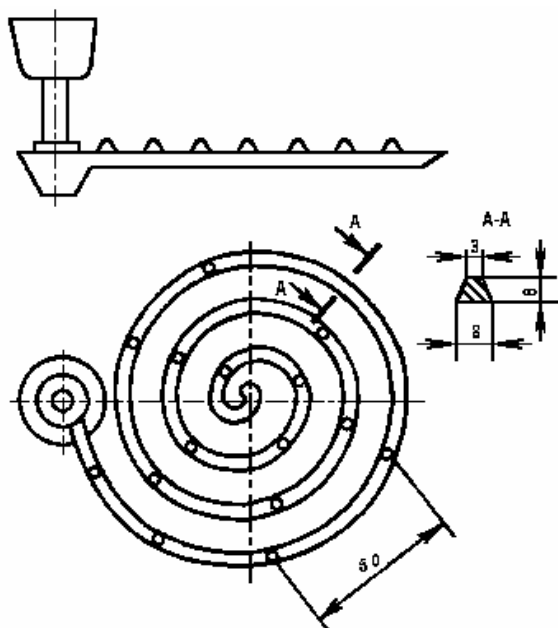
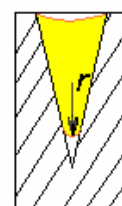


Рис. 1.31. Технологическая проба для определения жидкотекучести

У лучших литейных сплавов – серых чугунов – жидкотекучесть достигает 1500 мм; у магниевых сплавов – всего 200 мм.



Для оценки жидкотекучести при художественном литье выполняют клиновую пробу: чем меньше  $r$ , тем лучше.

Чтобы повысить жидкотекучесть, можно сильно перегреть сплав перед заливкой или подогреть форму.

2. *Усадка* – уменьшение линейных размеров и объёма сплава при охлаждении.

Все металлы (кроме  $V_i$ ) уменьшают объём при кристаллизации; при охлаждении, как известно, твёрдые тела сжимаются

(уменьшаются средние межатомные расстояния). Усадка – явление неизбежное, поэтому важно правильно учитывать эти изменения размеров при проектировании литейной оснастки.

Выражается усадка в относительных единицах:

$$\text{линейная усадка } \varepsilon_{об} = \frac{l_{\phi} - l_o}{l_o} \cdot 100\%,$$

где  $l_{\phi}$  и  $l_o$  – линейные размеры формы и отливки при 20 °С;

$$\text{объёмная усадка } \varepsilon_{об} = \frac{v_{\phi} - v_o}{v_o} \cdot 100\%,$$

где  $v_{\phi}$  и  $v_o$  – объём формы и отливки при 20 °С.

Объемную усадку обычно не подсчитывают, так как можно считать, что  $\varepsilon_{об} \approx 3\varepsilon_{л}$ .

Хорошие литейные сплавы – силумины, чугуны – дают усадку чуть меньше 1 %, стали и медные сплавы – 2,5-3 %.

Усадка увеличивается при большом перегреве металла перед заливкой и за счет большой теплопроводности формы.

Усадка может приводить к возникновению дефектов: усадочных раковин, трещин, коробления.

*Усадочная раковина* – крупная полость, образуется в той части отливки, которая затвердевает последней (рис. 1.32, а).

Иногда возникает не одна крупная раковина, а множество мелких – *усадочная пористость* (рис. 1.32, б).

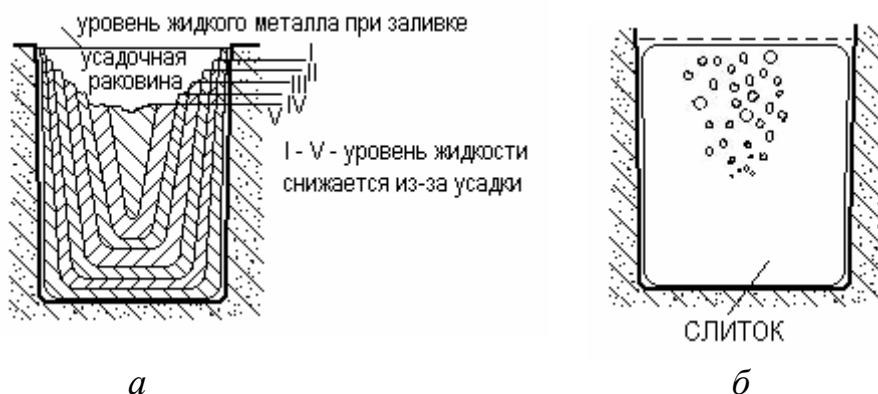


Рис. 1.32. Усадочная раковина (а) и усадочная пористость (б)

Чтобы предотвратить образование усадочных раковин, применяют *прибыли* – массивные резервуары с расплавленным металлом, питающие отливку до окончания кристаллизации (рис. 1.33).

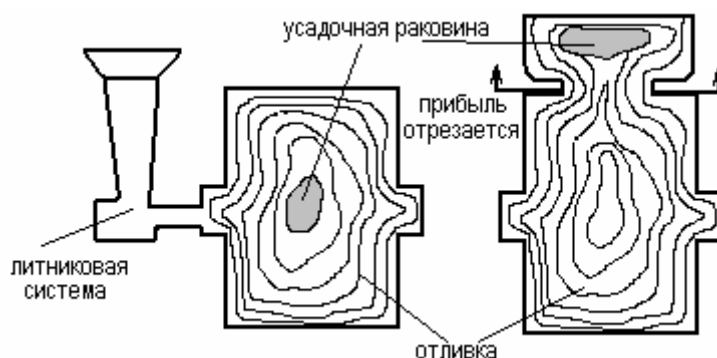


Рис. 1.33. Усадочная раковина сосредотачивается в прибыли

### 3. Склонность к образованию трещин.

При затвердевании толстые и тонкие части отливки испытывают неравномерную усадку, к тому же усадке может мешать форма. На рис.

1.34, *а* показано, что выступ 1 на поверхности формы не дает затвердевшему металлу сокращаться. На рис. 1.34, *б* сама конструкция отливки такова, что тонкие рёбра жёсткости кристаллизуются быстрее и тормозят дальнейшее сокращение размеров.

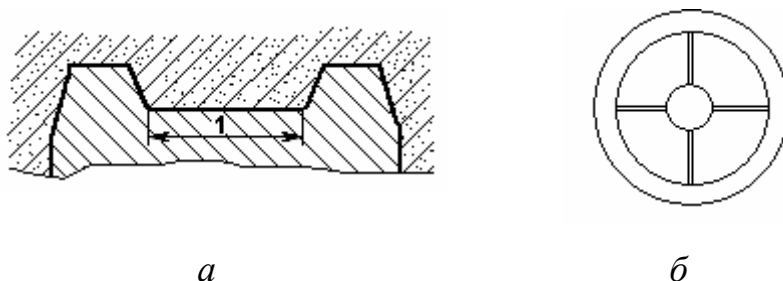


Рис. 1.34. Усадке мешает форма (*а*); неравномерная усадка (*б*)

В результате в металле отливки возникают внутренние напряжения. Если они превышают прочность сплава, могут образоваться трещины.

*Горячие трещины* возникают в начале затвердевания. Обычно они широкие, рваные, с окисленной чёрной поверхностью. Их образованию способствуют вредные примеси (в сталях – газы и сера), высокая температура заливки, резкие перепады сечения отливки, острые углы. Для предотвращения их появления надо избавляться от всех названных причин.

*Холодные трещины* возникают после полного затвердевания. Они тонкие, с чистой поверхностью, внешне малозаметны и поэтому особенно опасны. Усадка продолжается и в твёрдом состоянии, поэтому напряжения растут. Способствуют появлению холодных трещин вредные примеси, особенно фосфор, сложная форма отливки, резкие перепады сечения. Надо обеспечивать равномерное охлаждение или отжигать отливки (помещать в печь и медленно охлаждать вместе с печью).

Если напряжения не выше предела прочности, но выше предела текучести сплава, то может возникнуть *коробление* – искажение формы отливки, особенно тонкостенной.

#### 4. Склонность к образованию газовых раковин и пор.

Расплавленные металлы всегда растворяют в себе газы – тем больше, чем выше температура расплава. Они захватывают газы из атмосферы и при испарении влаги из формовочной смеси. Газы образуют пузыри в теле отливки. Большие пузыри называются раковинами, мелкие – порами. Формы и стержни надо хорошо просушивать, делать выпоры (каналы) для выхода газов, не завышать температуру заливки. Самый действенный способ – дегазация металла перед разливкой.

## Формовочные материалы

Это кварцевые формовочные пески и литейные формовочные глины. Из них, добавляя влагу и некоторые другие вещества, получают *формовочные смеси*.

### *Требования к формовочным смесям:*

- 1) *Огнеупорность*. Смесь не должна размягчаться и расплавляться при контакте с расплавленным металлом.
- 2) *Прочность*. Смесь не должна разрушаться при извлечении модели, транспортировке формы и заливке.
- 3) *Пластичность* – способность точно воспроизводить контуры модели при формовке.
- 4) *Газопроницаемость* – способность пропускать образующиеся в ходе заливки газы к поверхности формы.
- 5) *Податливость*. Смесь не должна мешать усадке отливки.
- 6) *Долговечность*. Смесь должна сохранять свои свойства при многократном использовании.

### *Виды формовочных смесей*

Формовочные смеси по назначению подразделяются на облицовочные, наполнительные и единые. Из *облицовочной смеси* набивают рабочий слой, который будет контактировать с расплавом, *наполнительной смесью* заполняют остальную часть формы (рис. 1.35). *Единые смеси* применяют в машинной формовке.

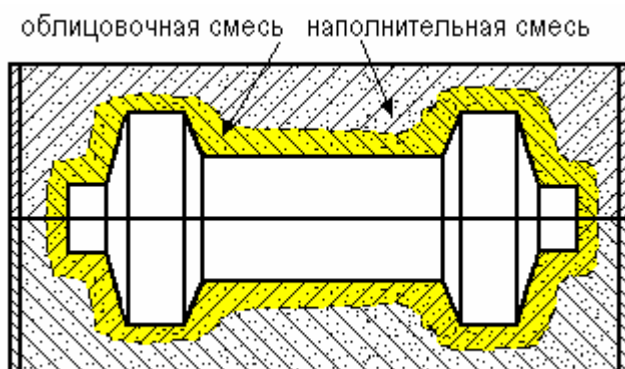


Рис. 1.35. Заполнение формы облицовочной и наполнительной смесями

Примеры специальных смесей:

- 1) *Смеси, отверждаемые в нагреваемой оснастке*. Состоят из 95 % песка и термореактивной смолы. При контакте с нагретой до 250-300 °С оснасткой смола переходит в вязкотекучее состояние и обволакивает частицы песка, затем она затвердевает, и образуется прочная форма.
- 2) *Жидкие самотвердеющие смеси (ЖСС)*. Состоят из 90 % песка, связующего вещества, отвердителя и поверхностно-активного вещества (ПАВ). При перемешивании

*Стержневые смеси* должны иметь более высокие свойства, чем формовочные, так как они работают в более трудных условиях, окружённые со всех сторон расплавленным металлом.

В современном литейном производстве для изготовления стержней и форм широко используют *специальные смеси*.



вании смеси образуется пена, она разделяет частицы песка и придаёт смеси жидкотекучесть. Смесь заполняет оснастку, а через 20 минут затвердевает.

3) *Жидкостекольные смеси*: песок и жидкое стекло. Отверждается смесь при продувке формы углекислым газом, примерно в течение 50 минут. Из таких смесей делают только рабочий слой формы, до 70 мм толщиной.

4) *Холоднотвердеющие смеси (ХТС)*. Состоят из песка, смолы типа эпоксидной и отвердителя. Отверждение длится около 30 минут, полная прочность достигается через сутки.

## Литейная оснастка

*Литейная форма* – это приспособление, имеющее рабочую полость, при заливке в которую расплавленный металл образует отливку.

Рассмотрим части литейной формы и оснастку, необходимую для её изготовления. Для получения большинства отливок песчаная форма должна состоять из двух полуформ, изготовленных по модели в литейных опоках.

*Опока* – рамка для удержания формовочной смеси, чаще всего металлическая. *Модель* – приспособление, имеющее очертания и размеры отливки, с учётом припусков на усадку металла, для получения отпечатка в формовочной смеси. Модели делают из металла, пластмассы, дерева. *Полуформой* называют опоку с уплотнённой формовочной смесью и отпечатком от модели.

Но модель повторяет только внешние контуры будущей отливки. Для получения отверстий и полостей в отливках используют *стержни*, изготовленные из специальных формовочных смесей. Для изготовления стержней применяют *стержневые ящики*, обычно металлические. Стержневой ящик должен раскрываться для извлечения готового стержня.

Подвод металла в форму осуществляется через *литниковую систему*. Это каналы и полости, обеспечивающие заполнение формы расплавом и питание отливки жидким металлом до полного затвердевания, а также удаление шлаков. Чтобы получить эти каналы, модели частей литниковой системы заформовывают вместе с моделью отливки.

Существуют различные варианты литниковых систем. Подача расплава в форму предпочтительнее сбоку или снизу, без падения струи металла с большой высоты, чтобы не размывать формовочную смесь.

Основные части литниковой системы (рис. 1.36):

*Литниковая чаша*, или воронка 1, нужна во избежание разбрызгивания металла и растекания по поверхности формы. Иногда используют керамические *фильтры* 9, которые задерживают частицы оксидов, нерастворённые примеси, кусочки футеровки разливочного ковша. *Стояк* 8 – вертикальный канал для подачи металла в плоскость разъёма формы

4. *Шлакоуловитель* 7 – расширение, куда собираются шлаки (оксиды и другие неметаллические частицы). *Канал-питатель* 6 подводит металл в *полость формы* 5. *Выпор* 2 предназначен для отвода газов. Штриховкой показана уплотнённая *формовочная смесь* 3.

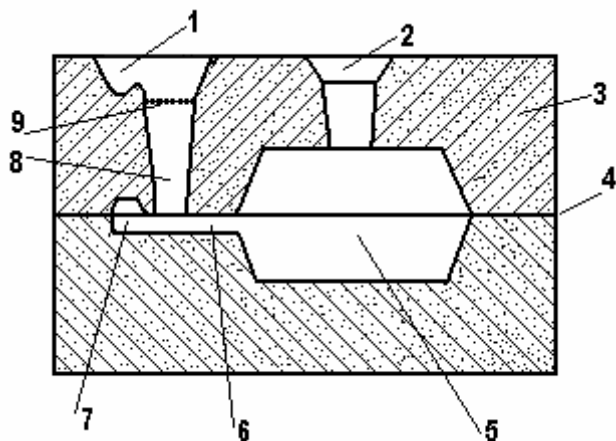


Рис. 1.36. Литниковая система:  
1 – литниковая чаша; 2 – выпор; 3 – формовочная смесь; 4 – разъём формы; 5 – рабочая полость; 6 – канал-питатель; 7 – шлакоуловитель; 8 – стояк; 9 – фильтр

Итак, по чертежу детали (рис. 1.37, а) строится чертёж отливки (рис. 1.37, б), которая отличается от детали размерами (размеры отливки больше на величину припусков 1 на механическую обработку) и формой (уклоны 2 и скругления углов 3 нужны для лёгкого извлечения модели из формы, без разрушения формы).

По чертежу отливки изготавливается модель (рис. 1.37, в), которая состоит из двух половинок. Разъём делается по плоскости симметрии.

Половинки модели скрепляются коническими штырями 4. Отверстия у модели нет; в местах выхода отверстия у отливки модель имеет выступы – *стержневые знаки* 5. В отпечатки от этих выступов будет укладываться стержень. Размеры модели превышают размеры отливки на величину усадки.

Заформовав половинки модели в две опоки, получают верхнюю и нижнюю полуформы. Затем половинки модели извлекаются, в формовочной смеси от них остаются отпечатки.

Отдельно в стержневом ящике (рис. 1.37, д) изготавливается стержень (рис. 1.37, з), имеющий очертания отверстия в отливке. Стержень длиннее отверстия на величину знаковой части 6, а его поперечные размеры больше размеров отверстия на величину усадки.

На рис. 1.37, е изображена собранная форма (канал-питатель находится за плоскостью рисунка).

## Ручная формовка

*Формовка* – это изготовление литейных форм. Ручная формовка в парных опоках по разъёмной модели описана в методических указаниях к лабораторной работе «Технология изготовления разовой литейной формы в двух опоках». Изучить самостоятельно!

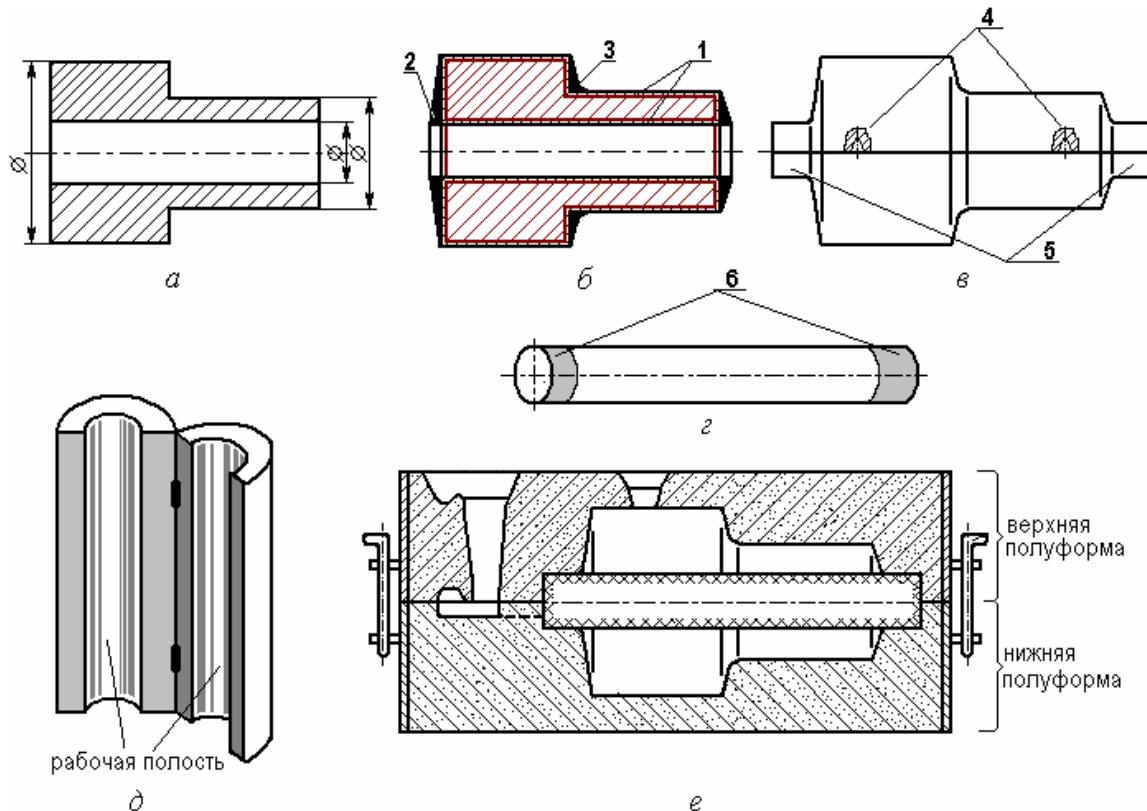


Рис. 1.37. Последовательность изготовления отливки:  
*a* – чертёж детали; *б* – чертёж отливки; *в* – модель отливки; *г* – стержень;  
*д* – стержневой ящик; *е* – литейная форма для получения отливки

## Лекция 6

### Машинная формовка

Для повышения производительности и улучшения условий труда в серийном производстве отливок применяется машинная формовка. Механизируют следующие операции:

- установку опок на модельную плиту,
- заполнение опок формовочной смесью,
- уплотнение смеси,
- извлечение моделей.
- сборку форм,
- транспортировку готовых форм.

Формовочные машины уплотняют смесь различными способами.

**Уплотнение прессованием** (см. рис. 1.38)

Формовочная смесь 1 из бункера насыпается на модельную плиту 3 с моделью 2 и в опоку 5, затем опока перекрывается прессовой колодкой 6, и модельная плита под действием сжатого воздуха 7 поднимается

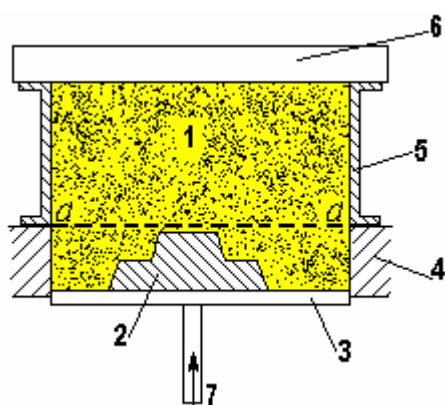


Рис. 1.38. Уплотнение формовочной смеси нижним прессованием

разрежение, и он резко опускается. Стол ударяется о торец цилиндра 2.

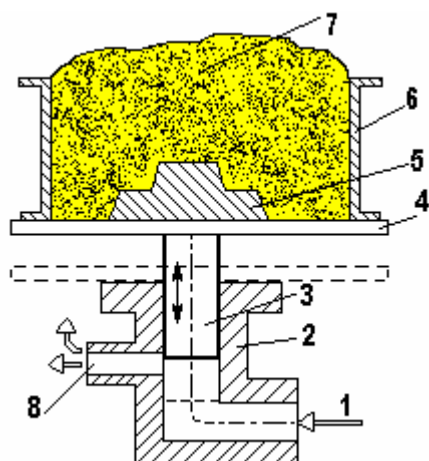


Рис. 1.39. Уплотнение формовочной смеси встряхиванием

Смесь 7 уплотняется за счет сил инерции. Частота ударов – до 200 в минуту. Иногда используют подпрессовку для более равномерного уплотнения.

по направляющим 4 до уровня *a-a*, вдвигая модель в опоку. При этом происходит уплотнение смеси. Опока снимается – в ней остается отпечаток модели. Это способ нижнего прессования.

Уплотнение встряхиванием

Сжатый воздух 1 поднимает поршень 3 вместе со столом 4, на котором в опоке 6 находится модель 5 (рис. 1.39). Когда открывается выхлопное окно 8, то под поршнем создается разрежение, и он резко опускается. Стол ударяется о торец цилиндра 2. Смесь 7 уплотняется за счет сил инерции. Частота ударов – до 200 в минуту. Иногда используют подпрессовку для более равномерного уплотнения.

Уплотнение пескомётом (см. рис. 1.40)

Метательная головка устройства состоит из ротора 4 с ковшом 2, заключенным в кожух 1. При вращении ротора ковш захватывает формовочную смесь, которая подается по конвейеру 3, и с силой выбрасывает её через окно 5 кожуха в опоку 7 на поверхность модели 8. Уплотнение происходит за счет кинетической энергии порций смеси 6. Скорость метания 30-50 м/с. Головка перемещается над опокой, сама опока неподвижна. Такой способ применяют для изготовления крупных форм.

#### Изготовление стержней

Стержневые ящики заполняются смесью на пескодувных или песко-стрельных машинах. Для уплотнения смеси используется сжатый воздух. Пескодувная машина постепенно надувает смесь в стержневой ящик, пескострельная – выстреливает порцию смеси. Затем стержни отделяют, сушат, красят.

Стержни чаще, чем формы, делают из специальных смесей: отверждаемых в нагреваемой оснастке, ЖСС, ХТС, жидкостекольных (см. рис. 1.41).

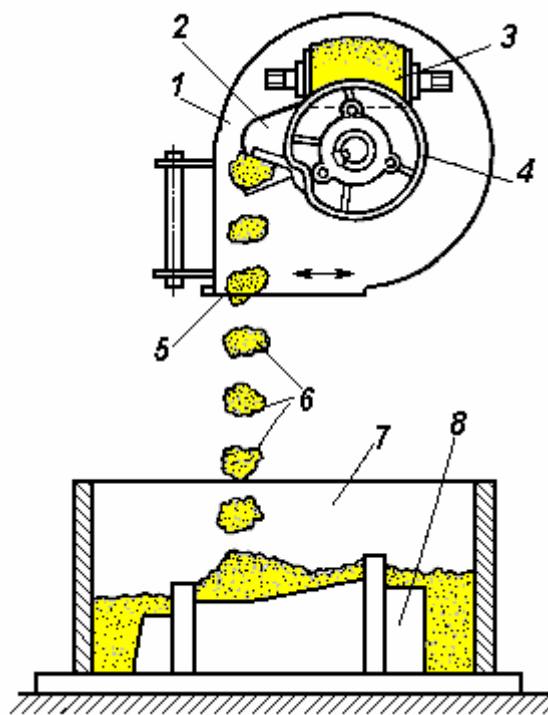


Рис. 1.40. Уплотнение формовочной смеси пескомётом

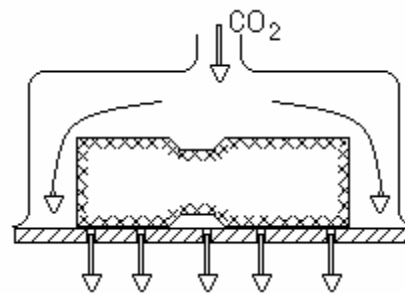


Рис. 1.41. Отверждение стержня из жидкостекольной смеси в атмосфере углекислого газа

**Сборка форм, заливка, выбивка и обработка отливок**

Нижняя полуформа помещается на заливочный стол. В нее устанавливаются стержни, накрывают верхней полуформой и скрепляют опоки. Для крупных форм иногда приходится накладывать грузы на

верхнюю полуформу, чтобы металл не вытек в разъем.

Перед заливкой металл перегревают выше температуры плавления: стали – на 100°, чугуны – на 200°, цветные сплавы – на 150°. Это делается для повышения жидкотекучести. Но при перегреве возрастает поглощение газов расплавом, он легко окисляется и дает большую усадку. Нужно выбирать оптимальную температуру заливки.

Металл из печи выпускают в разливочный ковш или в автоматическое устройство для заливки.

Заполненные металлом песчаные формы охлаждаются от нескольких часов до нескольких недель (многотонные отливки). Для ускорения охлаждения иногда обдувают формы холодным воздухом или пропускают воду по змеевикам, уложенным заранее в толще формы. Это нужно для массивных отливок, чтобы обеспечить равномерное охлаждение во всем объеме. Качество отливок при этом повышается.

*Выбивка* отливок – это разрушение литейной формы и извлечение готовой отливки. Осуществляется на выбивных решетках (см. рис. 1.42). Ком земли с отливкой 1 выталкивается из опоки прессовой колодкой и падает на решетку 2. При вибрации, создаваемой кривошипно-шатунным механизмом 3 и пружинами 4, земля отлетает от поверхности



отливки и падает вниз сквозь отверстия решётки. Отливка остается на решётке.

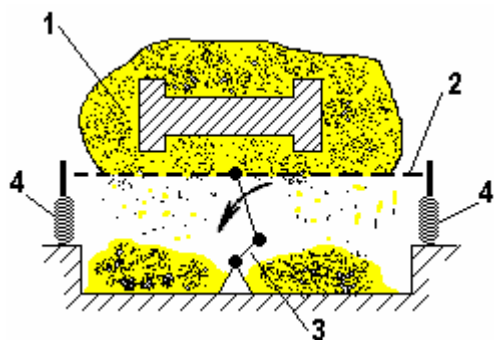


Рис. 1.42. Выбивка отливки на вибрационной решётке

*Зачистка* – операция удаления остатков литников, мелких заливок и т. п. Выполняется шлифовальными кругами, пневматическими зубилами, газопламенной обработкой.

*Очистка* отливок – удаление пригара и остатков формочной смеси с наружных и внутренних поверхностей. Выполняется в галтовочных барабанах (рис. 1.43), дробеструйных и гидropескоструйных камерах, а также химическим и электрохимическим способами (в растворах и расплавах щелочей).

*Термическая обработка* отливок нужна для измельчения зерна, снижения твёрдости, снятия внутренних напряжений. Отливки нагревают в печи и медленно охлаждают.

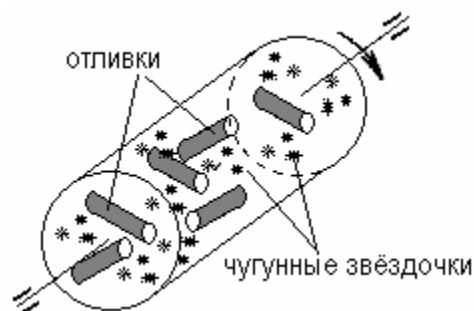


Рис. 1.43. Очистка отливок в галтовочном барабане

### Специальные виды литья

Литьё в песчаные формы не всегда даёт нужную точность размеров и чистоту поверхности. Поэтому разработано большое количество других способов литья. Все они называются *специальными*.

#### *Литьё в оболочковые формы* (рис. 1.44)

Формовочная смесь 3 состоит из кварцевого песка и терморезактивной смолы пульвербакелита. Смесь в сухом виде находится в бункере 2. На бункер устанавливается модельная плита 1 с закрепленной на ней половинкой модели, нагретой до 250 °С (рис. 1.44, а). Бункер переворачивается на 180°, смесь покрывает поверхность модели (рис. 1.44, б).



При нагреве смола в слое, прилегающем к модели, расплавляется и связывает зёрна песка в единое целое. Образуется оболочка 4 толщиной примерно 20 мм.

Затем бункер снова возвращается в исходное положение (рис. 1.44, в), а плиту с оболочкой снимают и помещают в печь при 350 °С. При этом происходит необратимое отверждение смеси.

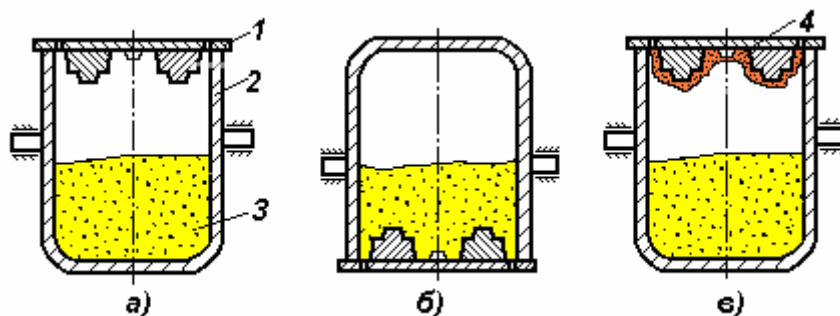


Рис. 1.44. Изготовление оболочковой формы

Так же изготавливают вторую полуформу, затем половинки собирают, скрепляя струбцинами или склеивая. Чтобы оболочка преждевременно не разрушилась, формы помещают в контейнер и засыпают сухим песком. При заливке смола начинает выгорать, форма постепенно рассыпается, но металл уже успевает затвердеть.

*Достоинствами* этого способа являются высокая точность размеров (припуски – десятые доли мм) и чистота поверхности, высокая газопроницаемость форм. Расход формовочных материалов составляет всего 5 % от расхода при литье в сырые песчаные формы.

К *недостаткам* надо отнести то, что смола – дорогой материал, кроме того, при литье выделяются токсичные газы. Вес отливок ограничен примерно 100 кг – большую массу жидкого металла форма не может удержать.

Способ применяется для любых сплавов.

*Литьё по выплавляемым моделям* (рис. 1.45)

Модель отливки, показанной на рис. 1.45, а, делают из смеси легкоплавких веществ (например, по 50 % парафина и стеарина). Смесь плавится при 80 °С, размягчается при 60 °С.

Подогретый модельный состав заливают или запрессовывают в металлическую пресс-форму (рис. 1.45, б). После охлаждения модели (рис. 1.45, в) вынимают из пресс-форм и собирают в блоки с одной литниковой системой на несколько моделей, нагревая место соединения паяльником (рис. 1.45, г). Блок может включать до сотни моделей. Литники для прочности можно армировать проволокой.

Собранный модельный блок погружают в керамическую суспензию из кварцевого песка и гидролизованного раствора этилсиликата в этиловом спирте, затем обсыпают сухим песком и сушат. На поверхности модели образуется керамическая оболочка. Операцию повторяют 3-4 раза, пока не получится корочка толщиной примерно 8 мм (рис. 1.45, д).

Затем модельный состав из оболочки выплавляют горячим паром или водой, собирают и используют снова. Оболочку прокаливают при 850 °С, предварительно установив её в опоку и засыпав песком. Корочка становится прочной.

Заливают расплавленный металл. При извлечении отливки корочка разрушается, но для полной очистки поверхности применяют щёлочи.

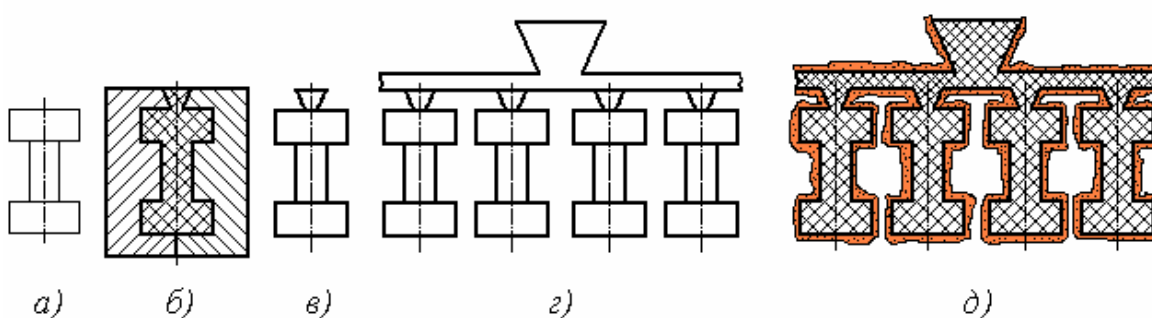


Рис. 1.45. Изготовление литейной формы методом выплавляемых моделей

*Достоинства* этого способа: очень высокая точность размеров (припуски – сотые доли мм), благодаря отсутствию разъёма формы и стержней. Отливки не требуют механической обработки, кроме шлифования рабочих поверхностей.

*Недостатком* является высокая трудоёмкость изготовления и стоимость отливок (примерно в 10 раз дороже литья в песчаные формы).

Литьё по выплавляемым моделям применяется для мелких и сложных по форме отливок, особенно из дорогих легированных сталей и сплавов: жаропрочных, инструментальных. Способ позволяет экономить металл (общая литниковая система для множества отливок), получать точные отливки из труднообрабатываемых материалов.

***Литьё по газифицируемым моделям, Литьё в кокиль***

Эти способы описаны в методических указаниях к лабораторной работе «Специальные виды литья». Изучить самостоятельно!

***Литьё под давлением***

Это разновидность литья в металлические формы (кокильного), при котором заполнение формы расплавом и кристаллизация отливки происходит под давлением.

Машины для литья под давлением имеют сложную конструкцию. Можно подразделить их на три группы:

1) *Машины с холодной горизонтальной камерой прессования* (рис. 1.46)

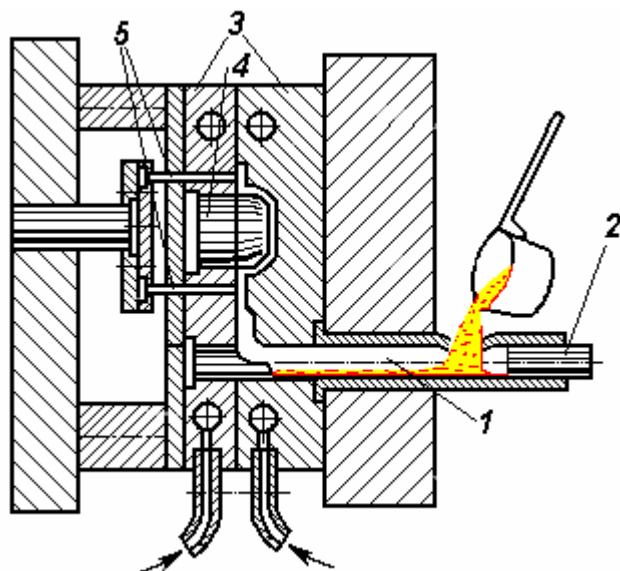


Рис. 1.46. Машина для литья под давлением с холодной горизонтальной камерой прессования

Порция металла заливается в камеру прессования 1, затем расплав заполняет пресс-форму 3 под давлением поршня 2. После затвердевания отливки форма раскрывается, и отливка выталкивается при помощи толкателей 5. Половинки формы снова соединяются, и цикл повторяется. Для образования полости в отливке применяют металлический стержень 4. Давление поршня на жидкий металл составляет до 200 МПа.

2) *Машины с холодной вертикальной камерой прессования*

3) *Машины с горячей вертикальной камерой прессования*

(рис. 1.47)

Камера прессования 1 расположена в обогреваемом тигле и окружена расплавленным металлом, который попадает в камеру через отверстия 2 при ходе поршня 3 вверх. Ход поршня вниз заставляет расплав под давлением устремляться в пресс-форму 4.

*Преимущества* литья под давлением: способ высокоточный. Позволяет получать тонкостенные отливки (минимальная тол-

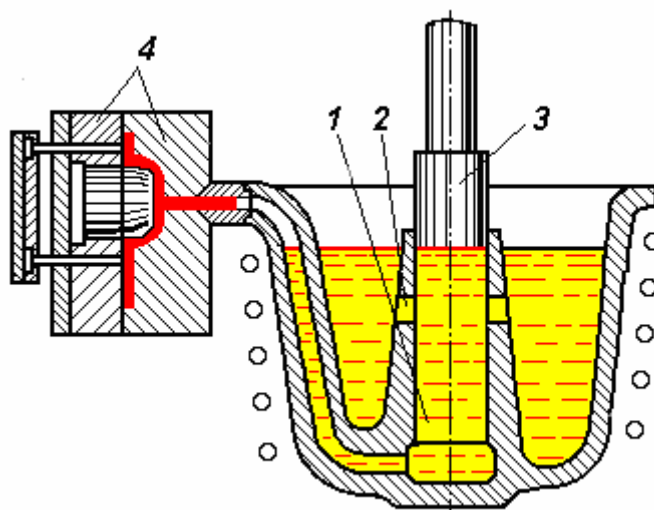


Рис. 1.47. Машина для литья под давлением с горячей вертикальной камерой прессования

щина стенки 0,8 мм) даже из сплавов с плохой жидкотекучестью. Машины для литья под давлением работают с высокой производительностью, полностью автоматизированы. При этом создаются хорошие санитарно-гигиенические условия труда, по сравнению с другими способами литья.

К недостаткам надо отнести то, что в массивных частях отливок возможна пористость: из-за большой скорости кристаллизации газы, растворённые в металле, выйти не успевают. Нужно вакуумировать расплав или применять другие способы дегазации.

При заполнении пресс-форм для крупных отливок возникает гидравлический удар; в результате форма может разойтись, и выплеснуть расплав через щели. Поэтому масса отливок ограничена.

Литьё на машинах с холодной камерой прессования применяют для медных и алюминиевых сплавов, с горячей – для сплавов магния и цинка.

### **Центробежное литьё**

При этом способе литья заливка расплава и формирование отливки идёт под действием центробежных сил. Машины для центробежного литья могут иметь горизонтальную и вертикальную ось вращения. Металл заливают во вращающиеся формы – изложницы (металлические, песчаные или оболочковые). Для лёгкости извлечения отливок форме придают небольшую конусность, при усадке сплава возникает зазор, и отливка легко вынимается.

За счёт центробежных сил расплав оттесняется к стенкам формы, и получается отливка с отверстием без применения стержней.

На машинах с вертикальной осью вращения (рис. 1.48, а) можно получать отливки высотой до 500 мм, так как сила тяжести не позволяет металлу подняться высоко. При этом толщина стенок внизу больше, чем в верхней части отливки.

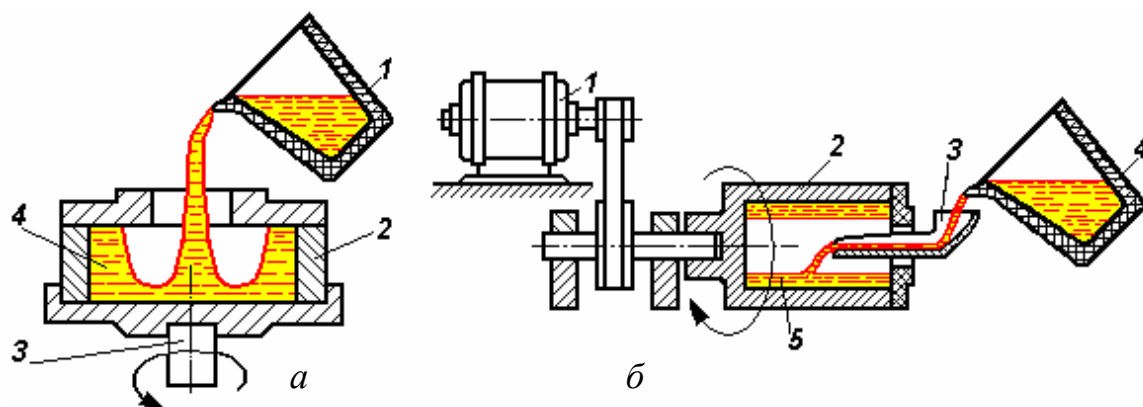


Рис. 1.48. Центробежное литьё:

а – с вертикальной осью вращения; б – с горизонтальной осью вращения

На машинах с горизонтальной осью вращения (рис. 1.48, б) получают литые трубы, длиной до 12 м. Для чугунных труб это единственный способ изготовления.

*Достоинства* способа: отливки получаются плотными; для отверстий и полостей не нужны стержни; нет расхода металла на литники. Можно получать многослойные отливки, последовательно заливая порции разных сплавов.

*Недостатками* являются расслоение некоторых сплавов по удельному весу (оловянных бронз, например) и образование внутри отливки шлаковой корочки.

Форма получаемых отливок – тела вращения. Это кольца, втулки, стаканы, трубы, подшипники скольжения.

### Дефекты отливок

- 1) Усадочные раковины и поры.
- 2) Трещины, горячие и холодные.
- 3) Коробление.
- 4) Газовая пористость.

Все эти дефекты уже были описаны в главе о литейных свойствах сплавов. Но при изготовлении отливок возможны и некоторые другие дефекты, обусловленные несоблюдением технологии заливки и сборки форм.

5) *Песчаные раковины* – полости в отливке, заполненные формовочной смесью. Они образуются из-за разрушения формы струёй расплава при нарушении технологии заливки или недостаточном уплотнении формовочной смеси (рис. 1.49, а).

6) *Перекас* – смещение верхней полуформы относительно нижней; причиной является небрежная сборка или износ центрирующих стержней (рис. 1.49, б).

7) *Недолив* – неполное заполнение расплавом полости формы (рис. 1.49, в).

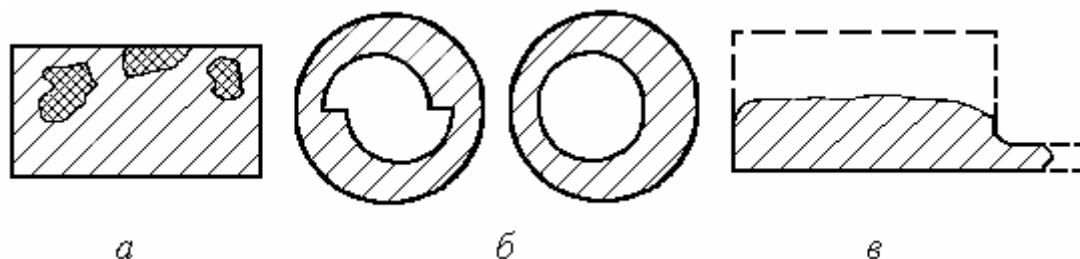


Рис. 1.49. Некоторые дефекты отливок:  
а – песчаные раковины; б – перекас; в – недолив

## Раздел IV Сварочное производство

**Сварка** – процесс получения неразъёмного соединения в результате возникновения межатомных связей между соединяемыми деталями.

Создание этих связей между атомами на поверхности соединяемых деталей требует затрат энергии, которую можно внести в зону сварки двумя путями: нагревом или пластической деформацией. Поэтому различают две группы методов сварки: сварку плавлением и сварку давлением.

При *сварке плавлением* атомные связи между соединяемыми деталями возникают в результате оплавления их кромок, примыкающих друг к другу, с получением общей ванны жидкого металла. При охлаждении эта ванна затвердевает и соединяет детали в единое целое.

При *сварке давлением* детали в зоне соединения подвергаются совместной пластической деформации сжатием. При этом поверхности очищаются от загрязняющих плёнок, микрорельеф сглаживается, и возникают межатомные связи. Детали можно нагревать перед сваркой, но пластичные металлы (алюминий, медь) свариваются и без нагрева.

Возможны и комбинированные процессы, когда металл заготовок расплавляют и обжимают зону сварки.

Различают более 70 разных видов сварки: нагревать можно электрической дугой, газокислородным пламенем, лазером, прямым пропусканием тока и др. Можно по-разному защищать зону сварки от кислорода воздуха, деформировать разными способами и т. д.

Сварка применяется во всех областях техники. Сваривают не только металлы, но и стекло, пластмассу, керамику, разнородные материалы. Сварку выполняют в космосе и под водой. Основные области применения сварки: строительство, трубопроводный транспорт, машиностроение (особенно судостроение и авиастроение).

### Электродуговая сварка

Это наиболее широко применяемый сегодня способ.

В 1893 г. на Всемирной выставке в США русский учёный Славянов продемонстрировал получение сваркой с помощью электрической дуги 12-тигранной призмы. Все грани её были пластинками из разных металлов и сплавов, от никеля до чугуна. Тогда это казалось чудом. Сегодня же работа сварщика в маске, с электродом в руке



– это самая привычная картина на любой стройке, при ремонте различных коммуникаций.

### **Сварочная дуга**

**Сварочная дуга** – это мощный стабильный электрический разряд между электродами, находящимися в среде ионизированных газов и паров.

Обычно используют *дугу прямого действия*, которая горит между электродом и изделием (рис. 1.50). Нагрев идёт за счёт бомбардировки поверхности металла электрически заряженными частицами. *Косвенная дуга* горит между двумя электродами, и нагрев металла осуществляется за счёт излучения дуги.

Чаще применяют *плавящиеся* металлические электроды, которые формируют сварной шов; неплавящимися (угольными, вольфрамовыми) пользуются сравнительно редко, так как это усложняет технологию сварки – требуется присадочный материал.

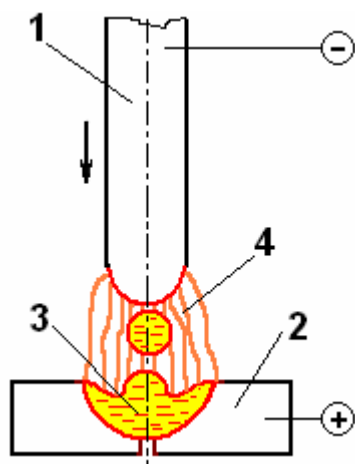


Рис. 1.50. Схема сварочной дуги постоянного тока:

- 1 – электрод; 2 – свариваемое изделие;  
3 – ванна жидкого металла; 4 – столб дуги

На рис. 1.50 показана схема сварки на *прямой полярности*: электрод подключён к отрицательному полюсу источника тока.

Дуга зажигается коротким замыканием электрода на изделие (постукивание, «чирканье»). Микровыступы на поверхности электрода и изделия нагреваются до температуры кипения, и при отводе электрода начинается термоэлектронная эмиссия, а также автоэлектронная эмиссия (отрыв электронов от атомов под действием

электрического поля высокой напряжённости). В промежутке между электродом и изделием появляются свободные электроны, они ионизируют пары металла. Поток заряженных частиц растёт лавинообразно. Электроны и отрицательно заряженные ионы движутся к аноду, а положительные ионы – к катоду. Поверхности изделия и электрода разогреваются, и через  $10^{-6}$  с устанавливается дуга. Температура у оси столба дуги составляет 6000-8000 К. Дуга – это низкотемпературная плазма.

Зависимость напряжения дуги от силы тока при постоянной длине дуги  $l$  называется *статической вольт-амперной характеристикой* дуги.

Это нелинейная зависимость; на кривой выделяются три участка: падающий I, жёсткий II и восходящий III (рис. 1.51, а).

Напряжение дуги пропорционально её длине, т. е. для сохранения постоянного напряжения необходимо поддерживать постоянную длину дуги.

Ручная дуговая сварка (РДС) осуществляется при падающей характеристике с переходом к жёсткой, автоматическая дуговая сварка под флюсом (АДСФ) – при жёсткой с переходом к восходящей, сварка в углекислом газе – при возрастающей.

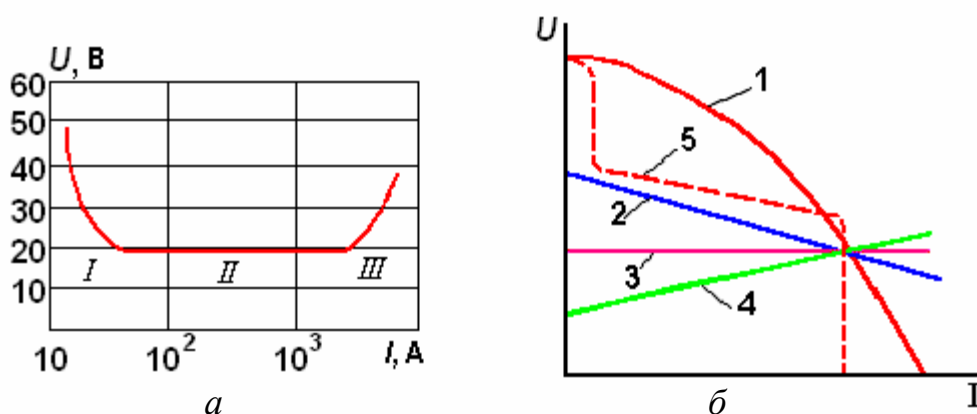


Рис. 1.51. Статическая вольт-амперная характеристика дуги (а); внешние характеристики источников сварочного тока (б)

При питании дуги переменным током с частотой 50 Гц анод и катод 100 раз в секунду меняются местами. При нулевых значениях напряжения и тока дуга гаснет. Поэтому напряжение зажигания дуги на переменном токе составляет 50-70 В, тогда как на постоянном достаточно 40-60 В.

#### *Ручная дуговая сварка*

1) Оборудование для РДС: источник питания дуги, гибкие провода (кабели), электрододержатель, электрод.

а) Источником питания дуги переменным током является *сварочный трансформатор*, постоянным – *сварочные выпрямители* и *генераторы*. Современные *инверторные источники* тока для сварки — позволяют получать на выходе как постоянный, так и переменный ток и широкий спектр вольт-амперных характеристик. В полевых условиях применяют *сварочные агрегаты*: генераторы с приводом от двигателя внутреннего сгорания.

*Внешняя вольт-амперная характеристика* источника питания – это зависимость между напряжением на выходе источника и током в цепи при установившемся режиме. Источники тока для сварки могут иметь

различные типы характеристик (рис. 1.51, б): 1 – крутопадающая, 2 – пологопадающая, 3 – жёсткая, 4 – возрастающая. Идеализированная внешняя характеристика 5 наилучшим образом удовлетворяет требованиям к источнику сварочного тока. Именно такая характеристика у инверторных источников питания.

Для ручной дуговой сварки используют источники только с крутопадающими характеристиками. Почему это так важно? Длина дуги при ручной сварке всегда колеблется, но нужно обеспечивать постоянную силу тока  $I$ , чтобы размеры сварочной ванны и сечение шва были постоянными.

Ток и напряжение на выходе источника равны току и напряжению дуги, значит, режим стабильного горения дуги определяется точкой пересечения характеристик источника и дуги (рис. 1.52). Таких точек две: точка  $A$  и точка  $B$ . Но устойчивое горение дуги возможно только на режиме точки  $B$ .

Если ток дуги случайно снизится, то источник будет выдавать большее напряжение, чем потребляет дуга. Поэтому ток в цепи увеличится до значения  $I_B$ , процесс вернётся к параметрам точки  $B$ .

Если ток дуги случайно возрастет, то напряжение дуги превысит

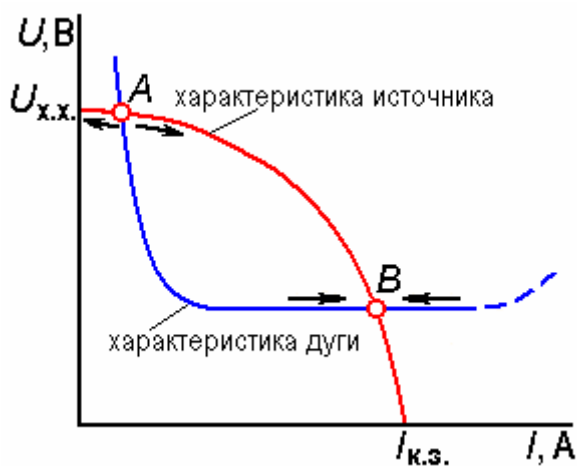


Рис. 1.52. Условие стабильного горения дуги

выдаваемое источником. Поэтому ток в цепи уменьшится до значения  $I_B$ , и процесс также вернётся к параметрам точки  $B$ .

В точке  $B$  наблюдается *самоустанавливающееся равновесие*, а в точке  $A$  отклонения по току приведут либо к обрыву дуги, либо к переходу в точку  $B$ .

Отсюда следует, что при крутопадающей характеристике источника ток практически не зависит от длины дуги.

Для регулирования тока при РДС меняют внешнюю характеристику источника питания. Для этого в конструкции источника питания предусмотрены устройства ступенчатого и плавного регулирования, например, дроссель (катушка индуктивности).

б) Провода (кабели) имеют большее сечение на низкой стороне трансформатора, меньшее – на высокой. Длина кабелей не должна превышать 30-50 м, так как при значительной длине увеличивается потеря напряжения в проводах.

в) *Электрододержатель* – это рукоятка из изолирующего материала с тремя металлическими стержнями (вилкой) на одном конце, между которыми зажимается зачищенный конец электрода. Кабель проходит внутри рукоятки и подсоединяется к стержням (рис. 1.53). Существуют и другие конструкции.

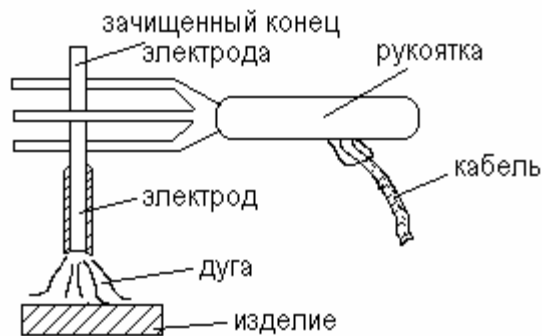


Рис. 1.53. Электрододержатель

г) *Сварочный электрод* представляет собой стержень из проволоки, покрытый слоем смеси порошков со связующим веществом.

Покрытие наносится опрессовкой или окунанием, затем сушится.

Различают *тонкие* (стабилизирующие) покрытия и *толстые* (защитно-легирующие). В состав покрытия входят вещества:

- ионизирующие дуговой промежуток (стабилизаторы дуги);
- шлакообразующие (для защиты ванны жидкого металла и шва);
- газообразующие (газовая защита зоны сварки);
- раскисляющие (для удаления кислорода из расплава);
- легирующие (для повышения прочности металла шва);
- связующее (обычно жидкое стекло).

Раскисляющие и легирующие компоненты присутствуют только в толстых покрытиях, ионизирующие и образующие шлак – во всех.

В зависимости от входящих в покрытие шлакообразующих веществ они делятся на виды: кислые, основные, рутиловые и целлюлозные. Наиболее распространены электроды с рутиловым покрытием, обеспечивающим высокие механические характеристики шва и хорошие технологические свойства.

Длина электродов 250-450 мм. Стандартные диаметры от 2 до 6 мм, но выпускают и больших или меньших диаметров для некоторых видов работ.

Материал электрода формирует шов, поэтому химический состав электродной проволоки должен соответствовать составу свариваемого изделия. *Марки электродной проволоки* обозначают: Св-08 или Св-30ХГСА, где буквы «Св» говорят о назначении проволоки – сварочная, 08 или 30 – содержание углерода в сотых долях процента, буквы Х, Г, С обозначают легирующие элементы (хром, марганец, кремний), буква А в конце марки означает, что сталь высококачественная.

Электроды для сварки углеродистых и легированных конструкционных сталей классифицируют по механическим характеристикам металла шва, которые они обеспечивают. *Тип электрода* обозначается как

Э38 ... Э150, где цифры – гарантируемый предел прочности шва в кг/мм<sup>2</sup>.

*Марка электрода* – это условное наименование, данное разработчиком, оно не содержит информации о характеристиках металла шва. Примеры марок: ЦМ-7, ОММ-5, АНО-8, УОНИ 13/45, МР-3, ОЗС-4, ВСЦ-4.

Нужно отметить, что при ручной дуговой сварке расход электродов на угар, разбрызгивание, огарки (остаток электрода в держателе) довольно велик и может составлять до 25 % массы электродов.

2) Схема процесса сварки покрытым электродом изображена на рис. 1.54. Здесь 1 – свариваемый металл, 2 – стержень электрода, 3 – покрытие электрода, 4 – дуга, 5 – капли расплавленного металла электрода, 6 – сварочная ванна; 7 – капли плавящегося покрытия, 8 – слой жидкого шлака, образовавшегося из веществ покрытия, 9 – газовая защитная атмосфера (тоже из покрытия), 10 – сварной шов, 11 – шлаковая корка, которая впоследствии счищается.

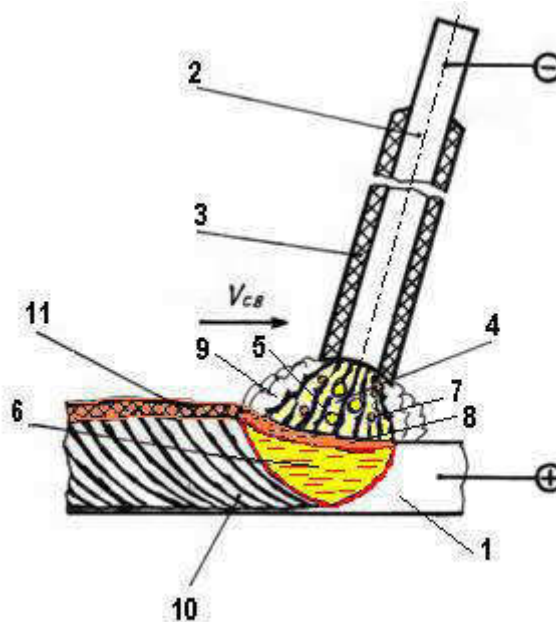


Рис. 1.54. Схема процесса сварки покрытым электродом

3) Режим сварки – это параметры процесса: диаметр электрода, сила сварочного тока, напряжение дуги и длина дуги.

*Диаметр электрода  $d$*  выбирается в зависимости от толщины заготовок:  $d = \frac{s}{2} + 1$ , где  $s$  – толщина свариваемого металла в мм.

*Сила тока  $I$*  указывается в паспорте на марку электрода или определяется по формуле  $I = k \cdot d$ , где коэффициент  $k$  зависит от марки стали электродной проволоки. Для углеродистых сталей  $k = 35 \div 60$  А/мм.

*Напряжение дуги* для большинства марок электродов и покрытий составляет 20-28 В.

*Длина дуги* поддерживается сварщиком в пределах 4-6 мм. Можно считать, что длина дуги составляет примерно  $l_d = (0,5 \div 1,1) d$ .

4) Виды сварных соединений показаны на рис. 1.55.

Без разделки кромок можно сварить заготовки толщиной до 6 мм.

Сварка может выполняться в различных пространственных положениях: *нижнем* (рис. 1.56, а), *горизонтальном* (рис. 1.56, б), *вертикальном* (рис. 1.56, в), *потолочном* (рис. 1.56, г).

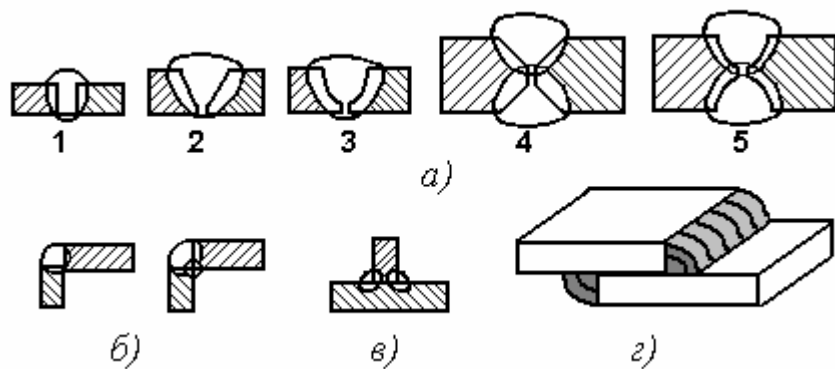


Рис. 1.55. Сварные соединения: а) стыковые (1 – без разделки кромок, 2 – V-образная разделка, 3 – U-образная разделка, 4 – X-образная разделка, 5 – U-образная двусторонняя разделка); б) угловые; в) тавровое; з) нахлесточное

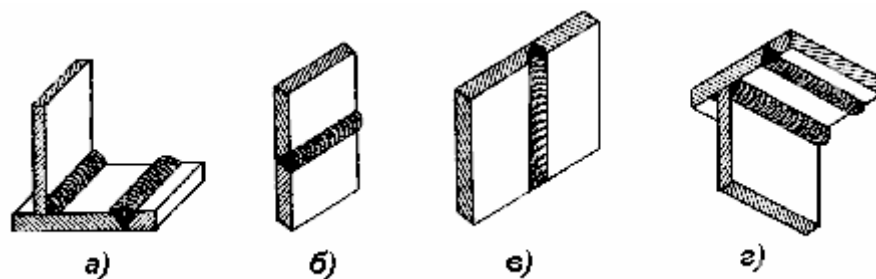


Рис. 1.56. Расположение шва в пространстве

При ручной дуговой сварке за один проход возможна глубина проплавления не более 8 мм. Более толстые материалы сваривают за несколько проходов, шов получается многослойным.

Процесс ручной электродуговой сварки, устройство источника питания и правила техники безопасности при проведении сварочных работ подробно описаны в методических указаниях к лабораторной работе «Оборудование и технология ручной дуговой и контактной сварки». Изучить самостоятельно!

#### *Автоматическая дуговая сварка под флюсом (АДСФ)*

Сварка ведётся под слоем флюса, непокрытой проволокой. Место стыка перед сваркой засыпают флюсом (слой толщиной 30-50 мм), и дуга горит под этим слоем. Процесс называют ещё *сваркой закрытой дугой*.

Схема процесса АДСФ показана на рис. 1.57. Механизм подачи 2 обеспечивает подачу сварочной проволоки 3 в дугу 10. Проволока подключена к источнику тока через скользящий токопровод 1. Дуга закрыта слоем флюса 5. При плавлении основного металла 8 и проволоки возникает ванна жидкого металла 9, а плавящийся флюс создаёт ванну жидкого шлака 4. Сварной шов 7 формируется при кристаллизации рас-



плавленного металла, сверху он покрыт шлаковой коркой 6, образованной застывшим шлаком.

**Оборудование:** автомат для дуговой сварки. Это устройство, механизирующее возбуждение и поддержание дуги, перемещение её вдоль линии шва и подачу сварочных материалов в зону плавления. Существуют различные конструкции сварочных автоматов, но в любом из них присутствуют:

- 1) устройство для закрепления бухты проволоки,
- 2) механизм подачи проволоки,
- 3) мундштук (скользящий контакт) для подвода сварочного тока,
- 4) механизм перемещения дуги вдоль линии шва.

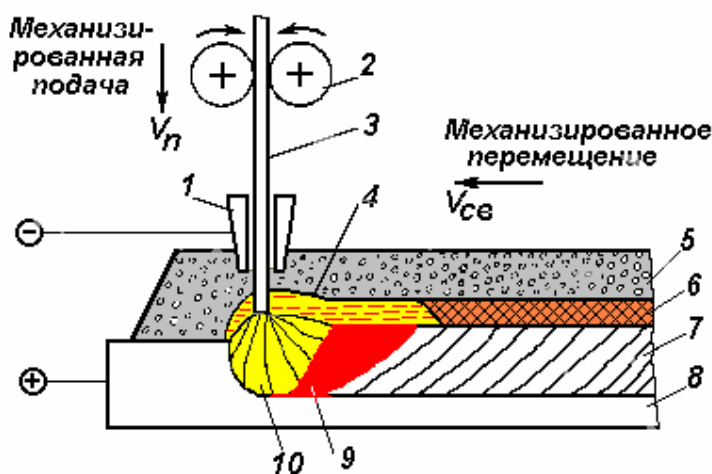


Рис. 1.57. Схема процесса автоматической дуговой сварки под флюсом

Применяют также шланговые полуавтоматы. Они механизмируют только подачу проволоки в дугу. Полуавтоматы позволяют сочетать гибкость ручной дуговой сварки с глубиной провара и высокой производительностью АДСФ.

**Материалы:** сварочная проволока и флюсы, плавные или керамические (спечённые).

Флюсы выполняют те же функции, что и покрытие электрода при РДС:

- 1) изолируют сварочную ванну от воздуха,
- 2) обеспечивают устойчивое горение дуги,
- 3) придают нужный состав и свойства наплавленному металлу.

**Преимущества:** это самый производительный способ сварки. За счёт большой силы тока (до 2 кА) и непрерывности процесса производительность АДСФ в 5-20 раз выше, чем при ручной сварке.

Высокое качество шва обеспечивается надёжной защитой от окружающей атмосферы, раскислением и легированием металла шва за счёт флюса, медленным охлаждением шва, постоянством размеров сварочной ванны.

Себестоимость 1 м шва ниже, так как металл не разбрызгивается, нет огарков электродов. Большая сила тока позволяет сваривать металл толщиной до 20 мм за один проход без разделки кромок.

**Применение:** в серийном и массовом производстве – при изготовлении котлов, резервуаров, корпусов судов, мостовых балок, сварных труб с прямым и спиральным швом, колёс.

**Автоматическая дуговая сварка самозащитной порошковой проволокой**

Самозащитная порошковая проволока – лента толщиной 0,1 мм, свёрнутая в трубку и заполненная смесью порошков, по составу таких же, как покрытие электрода, но без связки. Такой проволокой можно вести автоматическую и полуавтоматическую сварку.

**Преимущества:** сварочная ванна и шов видны, в отличие от АДСФ. Проволока расходуетея меньше, чем электроды, а глубина проплавления при этом больше.

**Лекция 8**

**Автоматическая дуговая сварка в защитном газе**

Для защиты шва применяют струю газа, подаваемого в зону сварки через горелку под давлением. Для этого годятся газы, которые тяжелее воздуха и не окисляют расплавленный металл – аргон, углекислый газ.

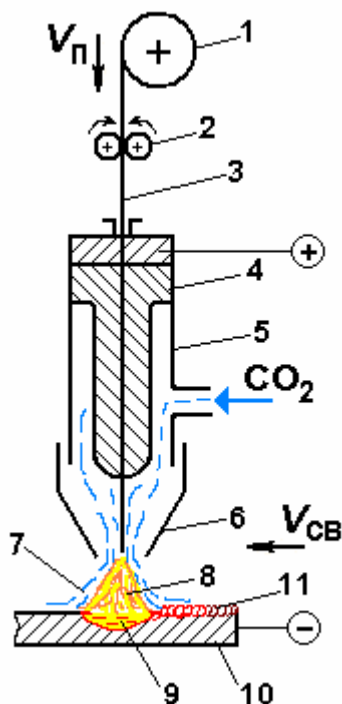


Рис. 1.58. Схема сварки в углекислом газе

Схема сварки в углекислом газе приведена на рис. 1.58. Здесь 1 – катушка с проволокой, 2 – механизм подачи, 3 – проволока, 4 – токоподводящий мундштук, 5 – корпус горелки, 6 – сопло, 7 – атмосфера защитного газа, 8 – дуга, 9 – ванна жидкого металла, 10 – свариваемый металл, 11 – шов.

Углекислый газ в 1,5 раза тяжелее воздуха. Он хорошо защищает место сварки, шов при этом виден. Сварка ведётся на *обратной полярности*: электрод подключён к положительному полюсу источника, изделие – к отрицательному.

Сварка в атмосфере аргона (в 1,4 раза тяжелее воздуха) выполняется по такой же схеме, но вместо сварочной проволоки используется неплавящийся вольфрамовый электрод, а проволока в зону сварки подаётся

отдельно. Полярность прямая.

**Преимущества:** хорошая защита шва. Сварка возможна во всех пространственных положениях. Производительность выше, чем при ручной сварке. Шов виден, можно визуальнo контролировать процесс. Сварка в

аргоне совсем не даёт шлака, при сварке в углекислом газе его немного. Сварка в атмосфере  $\text{CO}_2$  имеет низкую стоимость.

**Применение:** в углекислом газе сваривают конструкции из углеродистой и низколегированной стали (газо- и нефтепроводы, корпуса судов). В аргоне ведётся сварка легированных сталей, алюминиевых, медных, магниевых сплавов, тугоплавких металлов.

## Газовая сварка

На рис. 1.59 показана схема *газовой сварки*. Основной 1 и присадочный 2 материал расплавляют высокотемпературным газовым пламенем 4. Горючий газ (ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ , пропан  $\text{C}_3\text{H}_8$  и т. п.) сгорает в кислороде при выходе из сварочной горелки 3. К месту сварки газы подаются из баллонов по резиновым шлангам через редукторы (устройства, понижающие давление). Для формирования шва используют присадочные прутки из сплава нужного состава.

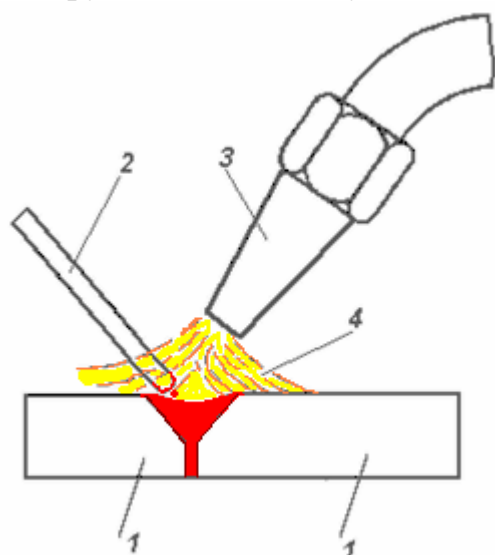


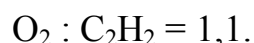
Рис. 1.59. Схема газовой сварки

Кислорода больше, то пламя становится *окислительным*; так сваривают только латуни. Когда ацетилена больше, пламя *науглероживающее*. Оно используется при сварке высокоуглеродистых сталей, чугунов, твёрдых сплавов.

**Преимущества:** не нужно электричество. Сварка может производиться в полевых условиях, вдали от линий электропередач. При газовой сварке нагрев плавный, что по-

строение кислородно-ацетиленового пламени (рис. 1.60): 1 – ядро, 2 – сварочная зона, 3 – факел. Самая высокая температура в сварочной зоне: до  $3200\text{ }^\circ\text{C}$ . Именно эта часть пламени плавит металл. Ярко светящееся ядро имеет температуру  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , а факел – около  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , он предварительно подогревает заготовки.

Другие горючие газы дают пламя с меньшей температурой. Обычно соотношение между кислородом и ацетиленом составляет



Это *нормальное пламя*. Если ки-

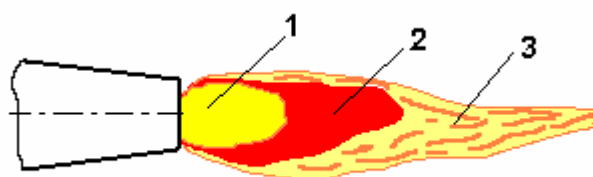


Рис. 1.60. Строение сварочного пламени

зволяет сваривать металл малой толщины (0,2-0,3 мм), легкоплавкие металлы и сплавы. Постепенный, мягкий нагрев нужен при сварке чугунов и латуни.

Газовая сварка широко используется при проведении ремонтных работ, для устранения дефектов отливок.

Ацетилено-кислородное пламя применяют также для подогрева металла в процессе газокислородной резки.

Существуют и другие способы сварки плавлением: *плазменная, лазерная, электронно-лучевая*.

### **Электроконтактная сварка**

Рассмотренные выше способы сварки осуществляются за счет плавления. Но только оплавления свариваемых кромок иногда бывает недостаточно для получения качественного соединения. Тогда применяют комбинированные способы, расплавляя или нагревая до пластического состояния соединяемые участки изделий с последующим их совместным обжатием.

*Электроконтактная сварка* осуществляется за счёт нагрева места соединения при протекании через него электрического тока и осадки (сдавливания) разогретых заготовок. Между кромками, разогретыми до пластического состояния или до оплавления, в процессе деформации и охлаждения возникают межатомные связи. Образуется прочное соединение.

Количество теплоты, выделяемой при протекании тока по проводнику, определяется законом Джоуля-Ленца:

$$Q = k \cdot I^2 \cdot R \cdot t,$$

где  $I$  – сила тока в цепи,  $R$  – сопротивление проводника,  $t$  – время протекания тока. Наибольшим сопротивлением обладает место контакта свариваемых деталей, поэтому там и выделяется наибольшее количество теплоты, позволяющее расплавить стальные заготовки.

По типу соединения различают три вида электроконтактной сварки.

#### ***Стыковая сварка***

Применяется для заготовок типа стержней. Соединение возникает по всей поверхности соприкосновения торцов заготовок. Схема сварки показана на рис. 1.61: 1 – зажимы, 2 – заготовки, 3 – неподвижная плита, 4 – подвижная плита, 5 – направляющая, 6 – сварочный трансформатор, 7 – гибкие шины.

Есть два варианта стыковой сварки:

1) *Сварка сопротивлением.* Заготовки сдавливаются, затем включается ток, заготовки разогреваются в месте стыка до пластического состояния, и производится осадка. В месте стыка возникает утолщение.

*Применение:* детали малого сечения (до диаметра 20 мм).

*Недостаток:* соединяемые поверхности нужно тщательно зачищать (шлифовать) для лучшего контакта.

2) *Сварка оплавлением* (рис. 1.62). Вначале включают ток, затем начинают сближать заготовки. Первыми соприкасаются выступы соединяемых поверхностей и оплавляются за счёт большой плотности тока (рис. 1.62, а). Заготовки продолжают сближаться, оплаваясь уже по всей поверхности (рис. 1.62, б), затем включается механизм осадки. Расплавленный металл вместе с оксидами и другими загрязнениями выдавливается из стыка, образуя неровный валик – *грат*, который потом удаляется на токарном станке (рис. 1.62, в).

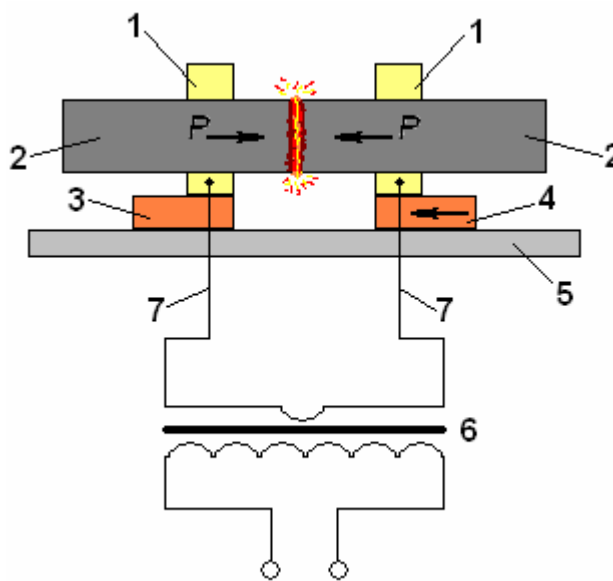


Рис. 1.61 Схема стыковой электроконтактной сварки

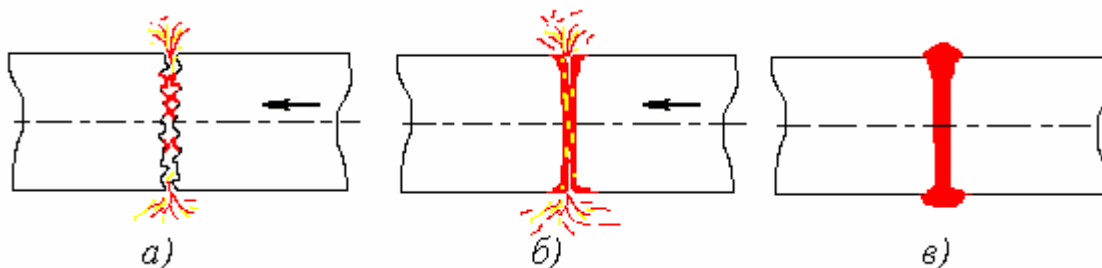


Рис. 1.62. Стыковая сварка оплавлением

*Преимущества:* Не нужна подготовка поверхностей, можно сваривать детали сложной формы и с разной формой сечения (■ и ●), разнородные металлы.

*Применение:* сварка колец, колёс, концевого инструмента (свёрла, фрезы, метчики), штоков, рельсов, арматуры, труб.

**Точечная сварка**

Листовые заготовки соединяются в отдельных точках. Листы собирают внахлёстку, зажимают между медными электродами и включают ток. Заготовки в месте контакта нагреваются до расплавления. Ток вы-

ключают, а давление увеличивают. Кристаллизация сварной точки идёт под давлением.

Схема сварки показана на рис. 1.63, а: 1 – электроды, 2 – заготовки, 3 – сварная точка, 4 – трансформатор. Циклограмма процесса приведена на рис. 61, б: участок 1 – сжатие заготовок, участок 2 – протекание тока и расплавление металла, 3 – выключение тока, 4 – приложение ковочного усилия. 5 – снятие усилия.

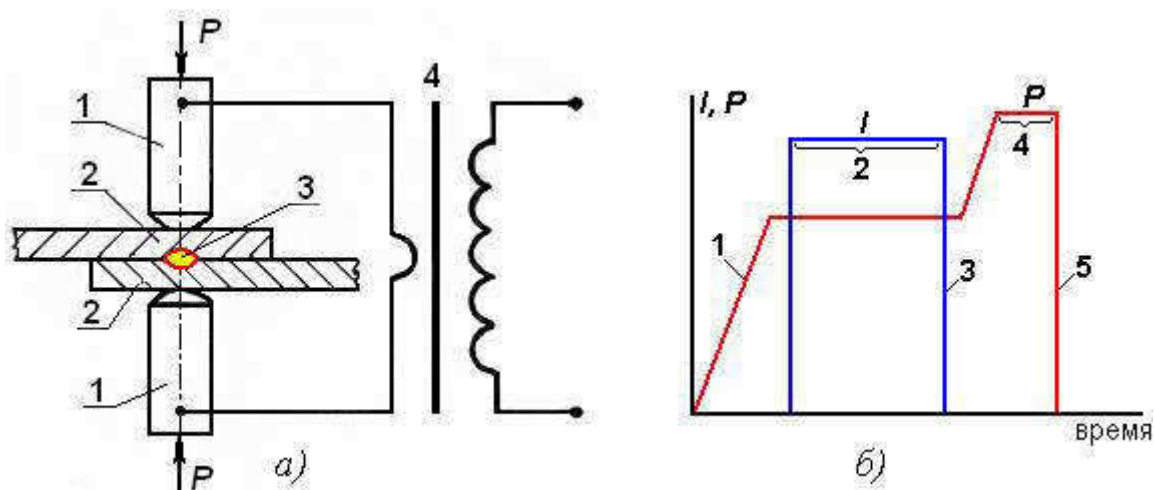


Рис. 1.63. Схема точечной электроконтактной сварки (а); циклограмма процесса (б)

**Применение:** для изготовления штамповарных конструкций из металла толщиной 0,5-6 мм. Можно сваривать конструкционные стали, алюминий, медь и их сплавы.

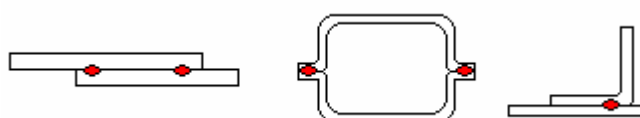


Рис. 1.64. Примеры точечных соединений

**Шовная (роликовая) сварка**

Собранные внахлестку листы зажимают между медными роликами-электродами и включают ток. Ролики вращаются, поэтому сварные точки перекрываются, образуя герметичный шов.

На схеме (рис. 1.65) 1 – электроды (медные ролики), 2 – заготовки, 3 – сварная точка, 4 – трансформатор.

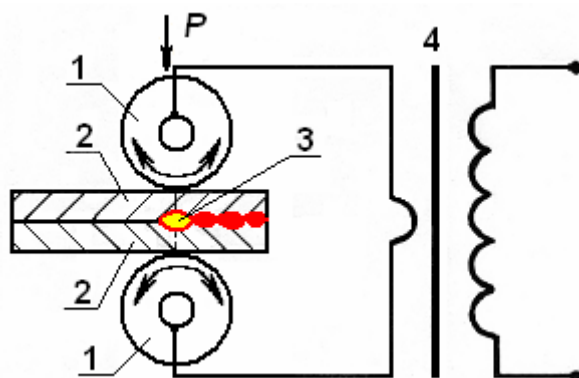


Рис. 1.65. Схема шовной электроконтактной сварки



**Применение:** для изготовления различных сосудов и труб, для воды и других жидкостей и газов. Толщина листов – 0,3-3 мм. Высокопроизводительный способ: скорость сварки составляет до 10 м/мин.

Процессы электроконтактной сварки подробно описаны в методических указаниях к лабораторной работе «Оборудование и технология ручной дуговой и контактной сварки». Изучить самостоятельно!

### Сварка трением

В этом способе тоже применяется и нагрев, и давление. Заготовки разогреваются при трении друг о друга, а затем производится осевое сжатие, и заготовки соединяются. На схеме сварки (рис. 1.66) показаны: 1 – неподвижная заготовка, 2 – вращающаяся заготовка, 3 – зажимное устройство, 4 – грат.

**Преимущества:** высокое качество соединения. Можно сваривать разнородные металлы. Расход электроэнергии меньше, чем при стыковой контактной сварке (в 5-10 раз).

**Применение:** для получения заготовок свёрл, метчиков и другого режущего инструмента, для сварки валов, пуансонов, поршней со штоками, осей, труб.

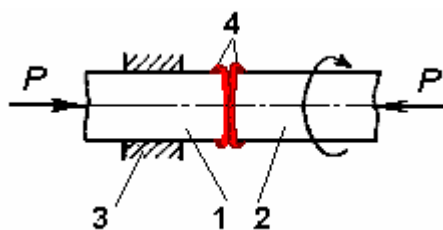


Рис. 1.66. Схема сварки трением

### Холодная сварка

Это – механическая сварка в чистом виде, выполняется без нагрева даже при пониженных температурах.

Свариваемые поверхности сближаются до образования межатомных связей за счёт значительной пластической деформации. Жировые и оксидные плёнки удаляют заранее.

Схема холодной сварки представлена на рис. 1.67, а. При сжатии заготовок 3 усилием  $P$  выступы 2 пуансонов вдавливаются в металл, пока пуансоны 1 не упрутся в поверхность заготовок. Выступы внедряются в металл на 70-80 % его толщины. В зоне сварки происходит значительная пластическая деформация металла, плёнки оксидов и загрязнения выжимаются на периферию, а между чистыми поверхностями заготовок возникают межатомные связи. Образуется сварное соединение (рис. 1.67, б). Форма сварной точки соответствует форме выступа (рис. 1.67, в).

Холодной сваркой можно получать точечные, стыковые и шовные соединения.

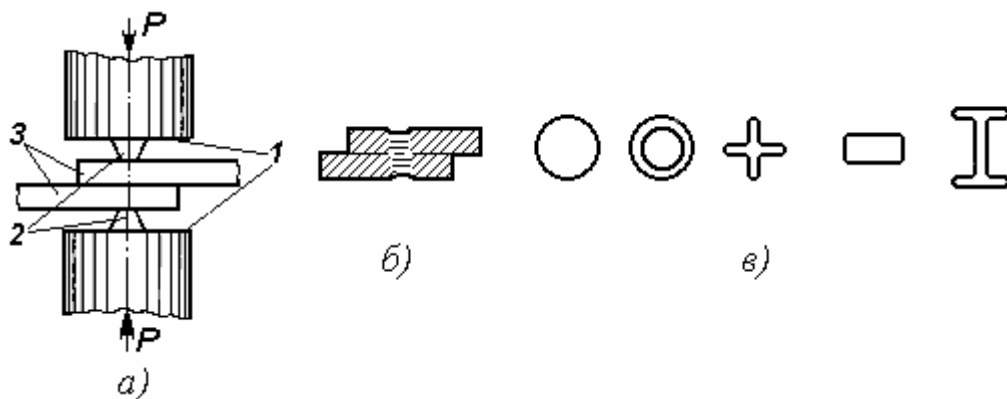


Рис. 1.67. Холодная сварка: а) схема точечной сварки; б) сварное соединение; в) формы сварных точек

**Применение:** для соединения заготовок из мягких, пластичных металлов – алюминия, меди, никеля, свинца, олова, цинка. Так сваривают корпуса приборов, провода, шины, алюминиевые оболочки кабелей.

### Дефекты и контроль качества сварных соединений

Все возникающие при сварке дефекты можно разделить на *внешние*, видимые и *внутренние* – невидимые, поэтому особенно опасные.

К внешним дефектам, обнаруживаемым при осмотре, относятся нарушения геометрии шва: неравномерное сечение шва, несоответствие размеров шва заданным. Кроме того, внешними дефектами являются *подрезы, наплывы, трещины* (см. рис. 1.68). При стыковой контактной сварке возможно смещение осей заготовок; при точечной и шовной – выплески металла и вмятины.

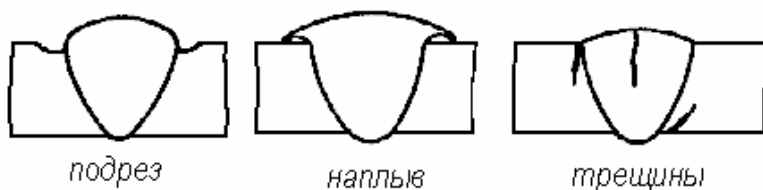
Внутренние дефекты можно обнаружить только специальными методами неразрушающего контроля. Это *непровары, шлаковые включения, поры* (см. рис. 1.68). Возможно появление внутренних трещин, *перегрев* – рост зерна сверх допустимого.

#### Методы контроля качества сварки

- 1) Внешний осмотр и измерения швов.
- 2) Металлографический анализ (позволяет определить провар и наличие внутренних дефектов, но это разрушающий метод контроля).
- 3) Химический анализ (позволяет установить, соответствует ли наплавленный металл сертификату электрода).
- 4) Механическими испытаниями определяется твердость и прочность сварного соединения.

5) Просвечивание рентгеновскими или гамма-лучами – неразрушающий метод, все внутренние дефекты видны на плёнке.

**Внешние дефекты:**



**Внутренние дефекты:**



Рис. 1.68. Дефекты сварных соединений

6) Ультразвуковой метод позволяет обнаружить дефект по отклонению луча на экране осциллографа; возможно получение изображения дефекта.

7) Магнитные методы фиксируют дефекты за счёт рассеяния магнитного потока.

8) Сварные швы сосудов испытывают на плотность с по-

мощью керосина или сжатого воздуха.

### Особенности сварки жаропрочных сталей

Хорошо свариваются низкоуглеродистые (с содержанием углерода до 0,3 %) и низколегированные стали. Жаропрочные стали представляют при сварке некоторые технологические трудности. Необходимо применять подогрев заготовок до 200-300 °С и термообработку для снятия сварочных напряжений после сварки. Иначе напряжения из-за разницы температур шва и основного металла могут привести к короблению и трещинам.

Применяют только электроды с основными фтористокальциевыми покрытиями.

### Пайка

**Пайкой** называют соединение металлов и сплавов в твёрдом состоянии с помощью *припоя* – сплава с температурой плавления ниже, чем у соединяемых металлов.

Припой должен смачивать и растворять металл соединяемых деталей или образовывать с ним химические соединения. Важнейшую роль в процессе пайки играют капиллярные явления: они обеспечивают про-

никновение жидкого припоя в зазор между соединяемыми деталями (рис. 1.69).

Для растворения и удаления оксидов с поверхности деталей, а также для улучшения смачиваемости металла припоем применяют *флюсы*. Это канифоль, соляная кислота, хлористый цинк, бура, борная кислота, нашатырный спирт.

Припои делятся на *мягкие*, с низкой температурой плавления – оловянно-свинцовые (марки ПОС) и *твёрдые*, с высокой температурой плавления – сплавы меди с цинком, никелем, серебром.

**Преимущества** пайки по сравнению со сваркой: пайка экономичнее, она не изменяет химический состав и механические свойства металла, паяные конструкции деформируются меньше, чем сварные.

**Недостатки:** прочность паяного соединения меньше прочности основного металла. Поверхности для пайки должны быть хорошо подготовлены: зачищены, обезжирены. Зазор между соединяемыми деталями должен быть минимальным: сотые доли мм.

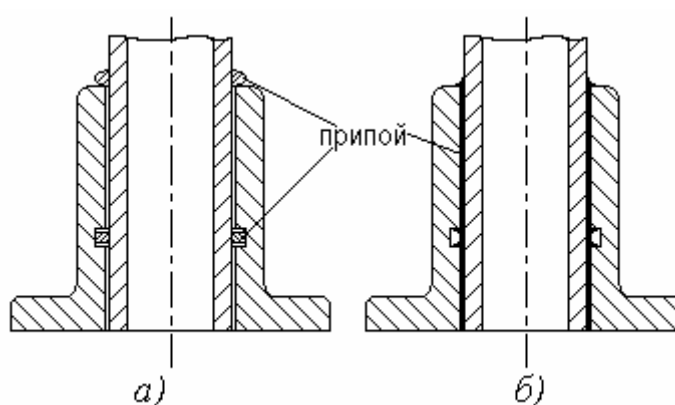


Рис. 1.69. Схема капиллярной пайки:  
а – перед пайкой; б – после пайки

## Лекция 9

### Раздел V Обработка металлов резанием

**Обработка металлов резанием** – процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла в виде стружки для получения необходимой геометрической формы, заданной точности размеров и качества поверхности детали.

Чтобы срезать с заготовки слой металла, режущему инструменту и заготовке придают относительные движения. Для этого инструмент и заготовку закрепляют в рабочих органах станков – в шпинделе, на столе, в револьверной головке. Эти узлы станков обеспечивают необходимые перемещения инструмента и заготовки.

## Основные понятия

### *Движения в металлорежущих станках*

Движения рабочих органов станков подразделяют на движения резания, установочные и вспомогательные.

Движения, которые обеспечивают срезание с заготовки слоя металла, называют **движениями резания**. К ним относят главное движение резания  $D_r$  и движение подачи  $D_s$ . *Главное движение* определяет скорость деформирования и отделения стружки, а *движение подачи* обеспечивает непрерывное врезание режущей кромки инструмента в материал заготовки. Эти движения могут быть непрерывными и прерывистыми, по характеру – вращательными и поступательными. Скорость главного движения резания обозначают  $V$ , скорость движения подачи –  $V_s$ . Главное движение при обработке резанием всегда одно, а направлений подачи может быть несколько.

Движения, обеспечивающие взаимное положение инструмента и заготовки для срезания с нее заданного слоя материала, называют **установочными**.

К **вспомогательным движениям** относят закрепление заготовки и инструмента, быстрые перемещения рабочих органов станка, транспортирование заготовки и т. д.

### *Классификация видов обработки резанием*



Существуют также комбинированные способы, включающие, например, обработку резанием и электрофизические процессы.

На долю обработки резанием приходится в разных отраслях машиностроения от 80 до 95 % всех обрабатываемых деталей. Важнейшие преимущества обработки резанием перед другими способами: *мобильность* (перенастройка оборудования на обработку новых изделий не требует значительных затрат и времени), возможность получения деталей *с любой точностью, из любых металлов и сплавов*.

Виды обработки резанием подразделяются на лезвийные и абразивные. Во всех *лезвийных* методах используется инструмент с одним или несколькими режущими лезвиями, геометрия которых определяет точность размеров и качество получаемой поверхности. Это точение, сверление, строгание, фрезерование, протягивание. К *абразивным* мето-

дам относятся шлифование, полирование, притирка, хонингование и другие виды обработки, в которых инструментом являются частицы очень твердого вещества – абразива, соединенные связкой или разрозненные. Абразивные методы чаще используются для чистовой, окончательной обработки.

#### *Схемы обработки резанием*

Любой процесс резания можно изобразить схематично: показать заготовку, её установку и закрепление на станке, закрепление и положение инструмента, а также движения резания (рис. 1.70). Обработанную поверхность выделяют цветом или толщиной линии. Обозначение подач:  $S_{пр}$  – продольная подача,  $S_{п}$  – поперечная,  $S_{в}$  – вертикальная,  $S_{кр}$  – круговая и т. д.

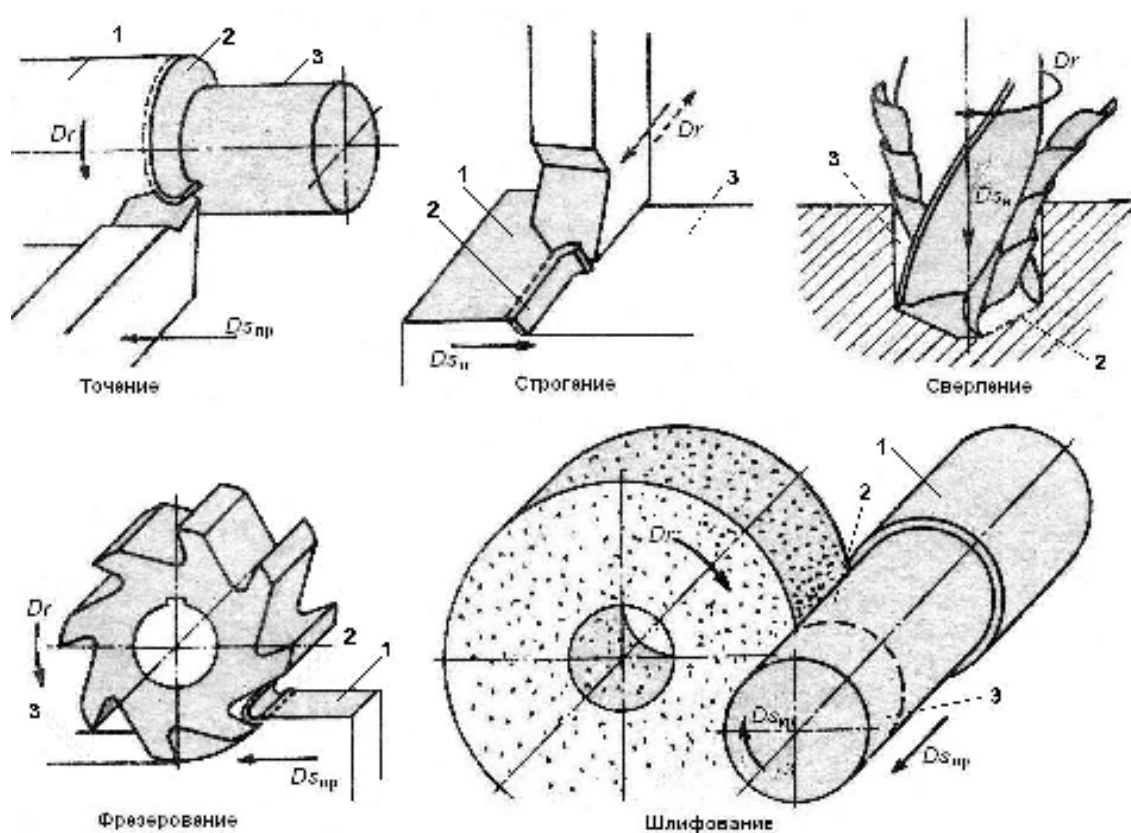


Рис. 1.70. Схемы обработки резанием: 1 – обрабатываемая поверхность, 2 – поверхность резания, 3 – обработанная поверхность

**Режим резания и геометрия инструмента** описаны в методических указаниях к лабораторной работе «Обработка металлов резанием». Изучить самостоятельно!

#### **Физические явления в процессе резания**

Резание металлов – сложный процесс взаимодействия режущего инструмента и заготовки; сопровождаемый рядом физических явлений.



### 1) Деформирование срезаемого слоя и виды стружки

В срезаемом слое металла возникают вначале упругие, а затем пластические деформации. В прирезцовой зоне возникают сдвиги, кристаллы деформируются и разрушаются, измельчаются, вытягиваются. Срезанный слой металла дополнительно деформируется из-за трения стружки о переднюю поверхность инструмента. Сдвиговые деформации приводят к скалыванию элементарного объема металла, затем процесс повторяется и образуется следующий элемент стружки (рис. 1.71). До 90 % работы резания расходуется на пластическое деформирование металла.



Рис. 1.71. Образование стружки

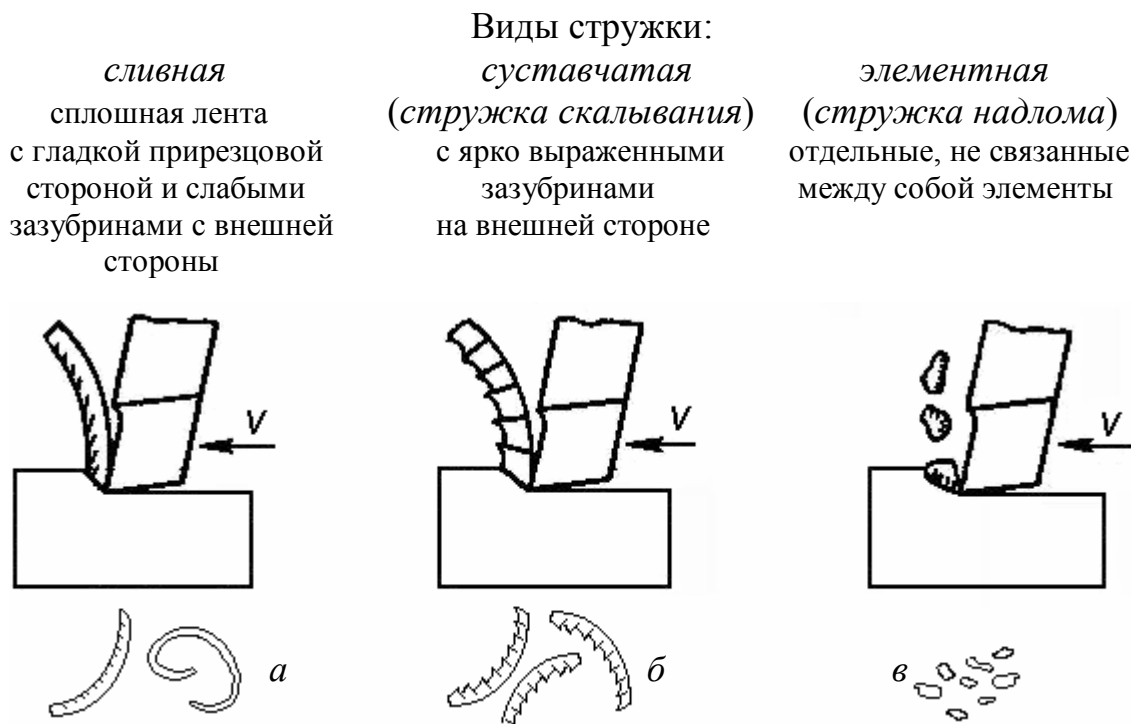


Рис. 1.72. Виды стружки: *а* – сливная (у пластичных металлов);  
*б* – скалывания (у металлов средней твердости);  
*в* – элементная (у хрупких металлов)

Работа резания максимальна при образовании суставчатой стружки, минимальна – для стружки надлома. Удалять из зоны резания наиболее сложно сливную стружку: она навивается на резец и деталь, летит с большой скоростью во все стороны. Чтобы сделать стружку мелкой, применяют резцы специальной конструкции – со стружколомными выступами, использу-

ют вибрационное резание (колебания ломают стружку). Созданы специальные стали для деталей массового производства, обрабатываемых на станках-автоматах. Эти стали содержат неметаллические включения, поэтому при их обработке образуется элементная стружка.

### 2) Тепловые явления в процессе резания

В процессе резания образуется теплота, общее количество которой складывается из теплоты, выделяемой за счет: 1) трения стружки о переднюю поверхность инструмента, 2) трения задних поверхностей инструмента о заготовку, 3) деформации металла (рис. 1.73). Из зоны резания тепло отводится стружкой (25-85 %), поглощается заготовкой (10-50 %) и инструментом (2-8 %), а также излучается в окружающую среду (рис. 1.73).

Уравнение теплового баланса процесса резания:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_{\text{стр}} + Q_{\text{инстр}} + Q_{\text{заг}} + Q_{\text{изл}}$$

Теплообразование вредно, так как инструмент теряет режущие свойства, изменяется его геометрия, из-за чего возникают отклонения размеров и формы обработанной поверхности от заданных. Нагрев заготовки также приводит к изменению ее размеров и формы.

Для уменьшения вредного влияния теплоты на качество обработки применяют *смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ)*. Это водные растворы солей, эмульсии, минеральные масла, сульфохлориды (масла с добавками фосфора, серы, хлора), керосин и др.

Жидкости снижают трение стружки об инструмент и инструмента о заготовку, уменьшают количество выделяемой теплоты и отводят ее во внешнюю среду. Смазывающее действие жидкостей препятствует налипанию металла на инструмент, в результате качество обработки повышается.

При черновой обработке необходимо сильное охлаждение, поэтому применяют эмульсии. При чистовой обработке, когда требуется получить высокое качество обработанной поверхности, используют различные масла.

Жидкость обычно подают под напором через узкое сопло на переднюю поверхность инструмента, иногда распыляют в виде тумана.

### 3) Трение, износ и стойкость инструмента

Износ инструмента вызван, в основном, трением между стружкой и передней поверхностью лезвия, а также между главной задней поверх-

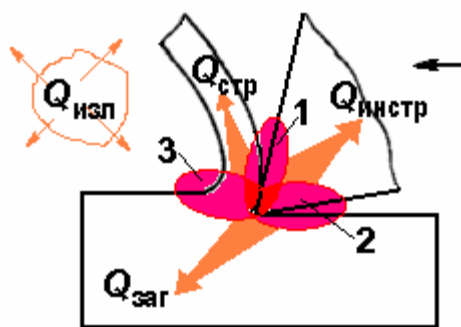


Рис. 1.73. Источники образования и распределение теплоты при резании

ностью инструмента и заготовкой. Характер износа – *абразивный*, т. е. инструмент истирается по передней и задней поверхностям (рис. 1.74).

На передней поверхности резца возникает *лунка* шириной  $b$ , а на главной задней поверхности – *ленточка* шириной  $h$ . Главное значение имеет износ по задней поверхности, так как из-за этого уменьшается глубина резания (вылет резца из резцедержателя). Обработанная поверхность получается конусообразной.

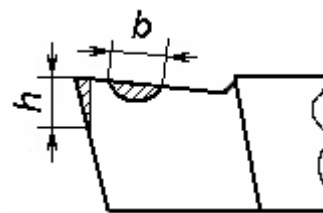


Рис. 1.74. Общий характер износа

Принятый *критерий износа* – наибольшее допустимое значение ширины ленточки  $h$ . Критерий износа составляет:

- для быстрорежущей стали  $h = 1,5-2$  мм,
- для твердосплавных пластин  $h = 0,8-1$  мм,
- для минералокерамики  $h = 0,5-0,8$  мм.

Допустимому износу соответствует определённая стойкость инструмента. *Стойкостью инструмента  $T$*  называют суммарное время его работы между переточками на определённом режиме резания. Измеряется стойкость в минутах. Обычная стойкость токарных резцов 30-90 мин, фрез – десятки часов. Сильнее всего на стойкость влияет скорость резания:

$$V \cdot T^m = \text{const}, \text{ или } V = c/T^m,$$

где  $c$  – постоянная величина,  $m$  – показатель относительной стойкости (для резцов  $m = 0,1-0,3$ ). Поскольку  $m$  мал, стойкость резко падает даже при незначительном увеличении скорости резания.

Поэтому следует вести обработку на расчетной скорости или ближайшей к ней меньшей.

Обработка заготовок на токарных, фрезерных, строгальных станках описана в методических указаниях к лабораторной работе «Обработка металлов резанием». Изучить самостоятельно!

## Обработка заготовок на сверлильных станках

**Сверление** – получение отверстий в сплошном материале, а также обработка отверстий для увеличения их размеров, повышения точности и уменьшения шероховатости.

Главным движением резания является вращательное движение инструмента вокруг оси, вертикальная подача – поступательное движение инструмента вдоль оси. Заготовка закреплена неподвижно (рис. 1.70).

Условия работы инструмента при сверлении более сложные, чем при точении, фрезеровании, строгании: затруднён отвод стружки и подвод охлаждающей жидкости в зону резания. Стружка истирает поверхность канавок сверла, а сверло трется о поверхность отверстия.

Скорость резания при сверлении определяется по формуле

$$V = \pi D \cdot n \cdot 10^{-3}, \text{ м/мин,}$$

где  $D$  – наружный диаметр сверла, мм.

Подача  $S_v$ , мм – это осевое перемещение сверла за один оборот.

Глубина резания  $t = D_{\text{сверла}}/2$ , при рассверливании  $t = (D - d)/2$ , где  $d$  – диаметр отверстия до обработки.

Инструментом обычно является *спиральное сверло* (рис. 1.75), но есть множество сверл других конструкций.

Хвостовик служит для закрепления сверла на станке, лапка предохраняет хвостовик при выбивании сверла из шпинделя станка. Рабочая часть состоит из режущей и направляющей частей с винтовыми канавками. На рабочей части сверла имеются две главные режущие кромки, поперечная режущая кромка, сминающая материал заготовки перед врезанием главных, и две вспомогательные режущие кромки. Вдоль винтовых канавок расположены две узкие ленточки, обеспечивающие направление сверла при резании.

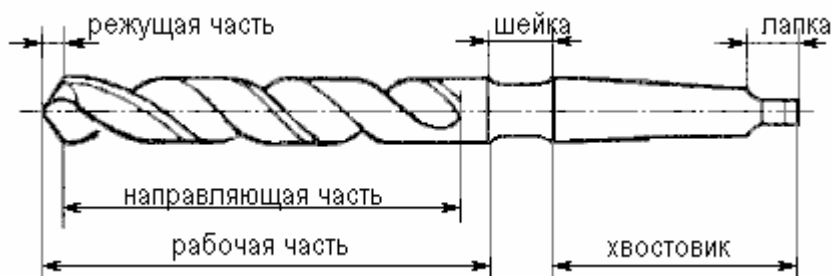


Рис. 1.75. Спиральное сверло

Для обработки заготовок на сверлильных станках применяют также зенкеры, развертки, метчики. *Зенкеры* используют для уменьшения шероховатости и повышения точности обработки отверстий. В отличие от сверл, зенкеры снабжены тремя или четырьмя главными режущими кромками и не имеют поперечной режущей кромки. Поэтому ими можно только обрабатывать уже имеющееся отверстие. *Развертки* – многолезвийный инструмент для окончательной обработки отверстий. Развертки имеют 6-12 главных режущих кромок и снимают припуск с глубиной резания сотые доли мм. *Метчиком* нарезают резьбу в отверстиях. Метчик – это винт, сопряженный с нарезаемой резьбой, с продольными стружечными канавками и конической заходной частью.

## Обработка заготовок на шлифовальных станках

**Шлифование** – обработка заготовок резанием при помощи *шлифовального круга*, инструмента, имеющего форму тела вращения и состоящего из абразивных зёрен и связки.

При вращении круга зёрна своими острыми кромками снимают тоненькие стружки, почти пылинки. Но таких стружек снимается до 100 млн ( $10^8$ ) в минуту, поэтому производительность шлифования высока.

Скорость резания при шлифовании определяется по формуле

$$V = \pi D_{\text{кр}} \cdot n / (10^3 \cdot 60), \text{ м/с,}$$

где  $D_{\text{кр}}$  – наружный диаметр круга в мм,  $n$  – частота вращения круга в об/мин. При шлифовании скорость составляет 30-100 м/с, температура в зоне резания доходит до  $1500^\circ\text{C}$ , поэтому стружки горят – летят искры. Обычно шлифование выполняют с обильной подачей СОЖ.

Твердость абразивных материалов выше твердости любого металла, поэтому шлифовать можно закалённые стали, твёрдые сплавы, белые чугуны.

Точность обработки соответствует 7-6 качеству, шероховатость – до 0,4 мкм.

Абразивные круги обладают способностью к *самозатачиванию*: затупленные зёрна абразива сами выкрашиваются из-за большой силы трения, при этом обнажаются новые острые грани. Однако поры круга постепенно забиваются отходами, и износ поверхности становится неравномерным. Это явление называют *засаливанием* круга. Режущие свойства восстанавливаются правкой: алмазным инструментом снимается слой толщиной 0,01-0,03 мм, при этом также восстанавливается геометрическая форма круга.

Схема круглого шлифования приведена на рис. 1.76.

По конструкции круглошлифовальный станок подобен токарному. Заготовка закрепляется в центрах, вращение (движение круговой подачи  $D_{\text{скр}}$ ) заготовке пе-

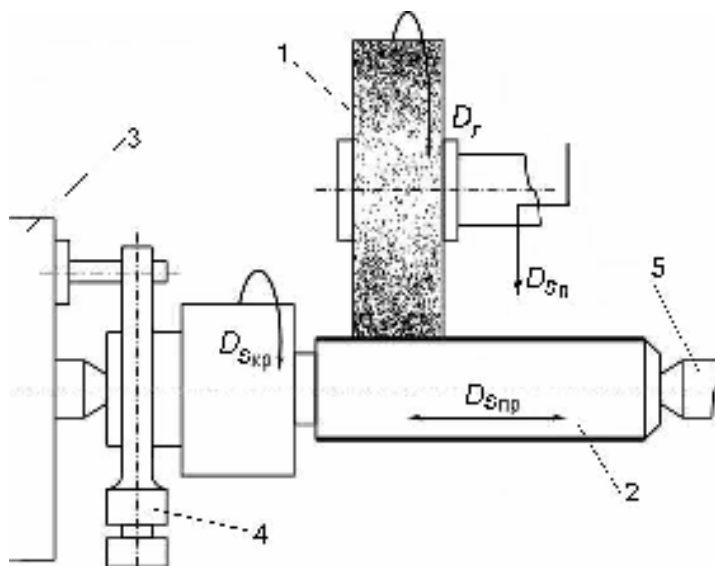


Рис. 1.76. Круглое шлифование:  
1 – шлифовальный круг; 2 – заготовка; 3 – поводковый патрон; 4 – хомутик; 5 – задний центр

редается от поводкового патрона через палец и закрепленный на нем хомутик. Главное движение резания – вращение шлифовального круга, кроме того, заготовка вместе со столом совершает возвратно-поступательное движение продольной подачи  $D_{s_{пр}}$ . Шлифовальный круг в конце прохода может вместе со шлифовальной бабкой совершать движение поперечной подачи  $D_{s_{п}}$ .

На плоскошлифовальных станках заготовка, закрепленная на магнитной плите, обрабатывается по плоскости боковой поверхностью шлифовального круга.

### Отделочная обработка резанием

Отделочная обработка повышает точность размеров, уменьшает шероховатость поверхностей, придает им особый вид, повышает надёжность работы машин. Доля отделочных методов в обработке резанием непрерывно растет.

#### *Отделка чистовыми резцами и шлифовальными кругами*

*Тонкое обтачивание и растачивание* выполняется с высокой скоростью резания, с малой глубиной резания и подачей, резцами с широкими режущими лезвиями, параллельными оси заготовки.

*Тонкое шлифование* выполняют с очень малой глубиной, с обильной подачей СОЖ, мягкими высокопористыми мелкозернистыми кругами.

#### *Полирование*

*Полирование* не только уменьшает шероховатость, но и придает зеркальный блеск, что нужно для снижения трения и декоративного вида. Для полирования применяют полировальные пасты – абразивные зёрна со смазочным веществом. Инструментом являются круги из войлока, фетра, кожи; щётки, бесконечные абразивные ленты (рис. 1.77). Надо отметить, что полирование не исправляет погрешности формы, так как используется гибкий инструмент.

#### *Хонингование*

*Хонингование* дает не только точность и малую шероховатость, но и создает микропрофиль поверхности – сетку для удержания смазки в узле трения.

Заготовка закрепляется неподвижно, инструмент – *хонинговальная головка (хон)* – имеет мелкозернистые абразивные бруски и совершает одновременно вращательное и возвратно-поступательное движение; их

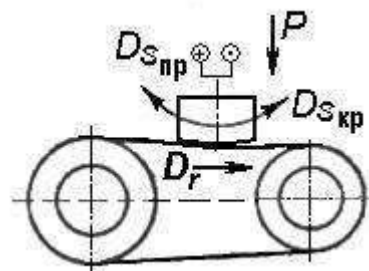


Рис. 1.77. Полирование бесконечной лентой



скорости  $V_1$  и  $V_2$  неодинаковы (рис. 1.78). Сочетание этих движений дает сетку микроскопических винтовых царапин – следов абразивных зерен.

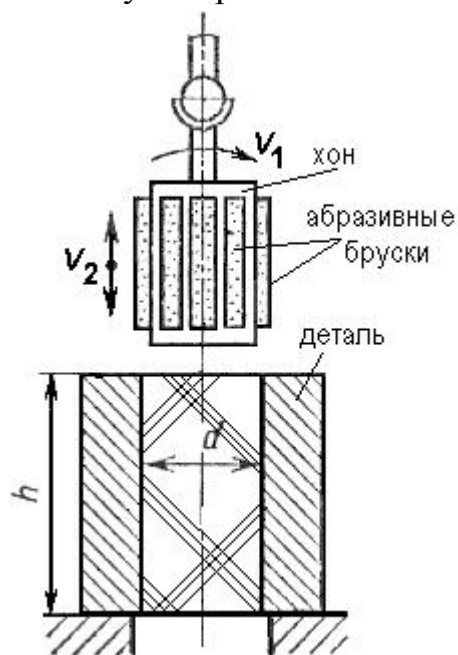


Рис. 1.78. Хонингование

Наложение траекторий исключается. Абразивные бруски подпружинены, поэтому контакт их с поверхностью отверстия непрерывен. Обязательно обильное охлаждение керосином.

Хонингование исправляет погрешности формы, полученные при обработке отверстия.

Аналогичный способ отделочной абразивной обработки применяется для наружных поверхностей (*суперфиниширование*).

Точность размеров, которую дают отделочные методы, – до 5 квалитета, шероховатость (высота неровностей  $R_z$ ) составляет сотые доли микрона.

### Чистовая обработка пластическим деформированием

Обработка поверхностей без снятия стружки, в частности, пластическим деформированием, тоже позволяет получить нужную точность и малую шероховатость. Пластическим деформированием обрабатывают только поверхности, сопряженные с поверхностями других деталей (валы и отверстия). Эти способы проще, чем чистовая обработка резанием, к тому же они безотходны.

Объём заготовки не меняется. Под действием деформирующего инструмента перемещаются только элементарные объёмы металла. Происходит сглаживание микронеровностей за счёт смятия микровыступов и заполнения ими микровпадин (рис. 1.79, в). Температура при обработке не повышается, поэтому структура металла не нарушается.

Пластическая деформация упрочняет поверхность металла, заглаживает риски и микротрещины. При этом возрастает надёжность изделия в условиях эксплуатации (выше сопротивление усталости, износу, коррозии).

Выполнять обработку можно на обычных металлорежущих станках, с помощью специального инструмента и приспособлений. Охлаждения не требуется, но для смазки применяют керосин, веретенное масло, сульфолрезол.

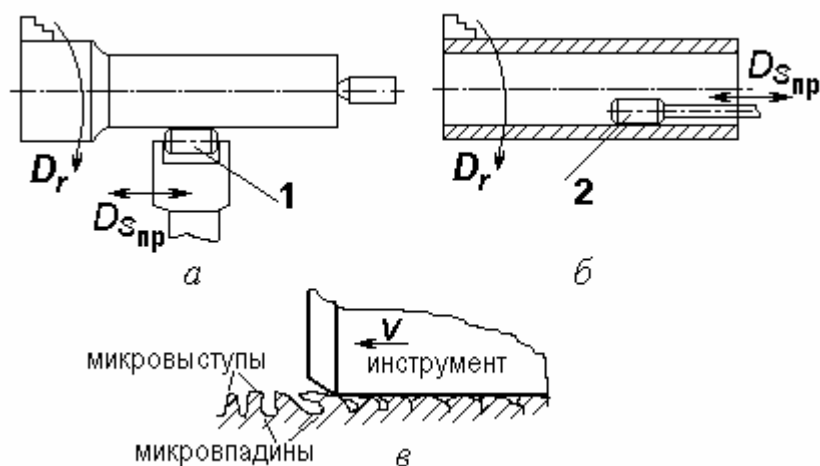


Рис. 1.79. Обработка пластическим деформированием:  
 а – обкатывание; б – раскатывание; в – сглаживание микронеровностей;  
 инструмент: 1 – обкатка, 2 – раскатка (закаленные стальные ролики)

Обработка пластическим деформированием годится для всех пластичных металлов, но лучший эффект получается на более мягких материалах ( $HB \leq 280$ ).

Важной разновидностью этого способа является *накатывание резьб, шлицевых валов и зубчатых колёс*. Профиль резьбы и др. образуется за счёт вдавливания инструмента в материал заготовки. При этом сочетается черновая, чистовая и отделочная обработка.

Это более производительный и дешёвый способ, чем обработка резанием. Качество поверхности высокое, формируется благоприятная для механических нагрузок структура.

### Электрофизическая и электрохимическая обработка

Эти методы используют электрическую, химическую, звуковую, лучевую энергию. Они дополняют ОМР, но иногда могут и заменять.

#### **Преимущества:**

- 1) нет силовых нагрузок, что повышает точность обработки;
- 2) поверхность детали не упрочняется;
- 3) легко автоматизировать процессы;
- 4) можно одновременно обрабатывать все нужные поверхности;
- 5) процессы обработки идут непрерывно.

#### **Электроискровая обработка**

*Электроискровая обработка* (рис. 1.80) основана на эрозии (разрушении) электродов при пропускании между ними импульсов электрического тока. Когда напряжение между электродами достигает про-

бойного, происходит искровой разряд, оплавляется и испаряется элементарный объём металла на аноде, и образуется лунка. Вырванные частички металла застывают в виде гранул микронной величины в диэлектрической жидкости. Расстояние между электродами поддерживается автоматически (0,01-0,05 мм).

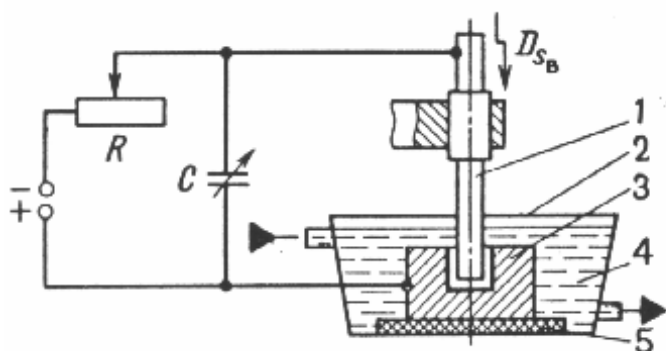


Рис. 1.80. Электроискровая обработка:  
1 – инструмент (катод); 2 – ванна; 3 – заготовка (анод); 4 – диэлектрическая жидкость (керосин);  
5 – изолятор

#### Электрохимическая обработка

Электрохимическая обработка (рис. 1.81) основана на явлении анодного растворения. Металл с поверхности анода переходит в химическое соединение и растворяется, причём в первую очередь растворяются микровыступы, так как плотность тока на них выше.

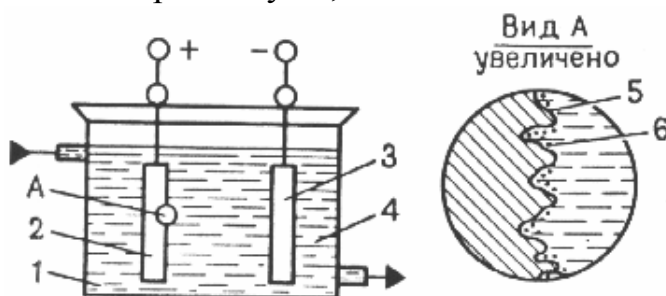


Рис. 1.81. Электрохимическое полирование:  
1 – ванна; 2 – заготовка (анод); 3 – катод;  
4 – электролит; 5 – выступ; 6 – впадина

Так можно получать отверстия и полости, вырезать заготовки сложной формы.

Применяется для труднообрабатываемых металлов и сплавов – инструментальных, жаропрочных.

Такая обработка применяется для полирования и доводки поверхностей.

В результате избирательного растворения микронеровности сглаживаются, и обрабатываемая поверхность приобретает металлический блеск.

Можно одновременно обрабатывать партию заготовок по всей их поверхности. Этим методом готовят поверхности деталей под гальванические покрытия, доводят рабочие поверхности режущего инструмента, получают тонкие ленты и фольгу, очищают и декоративно отделывают детали.

## Часть II. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

### Лекция 1

#### Что и как изучает материаловедение

##### *Предмет изучения*

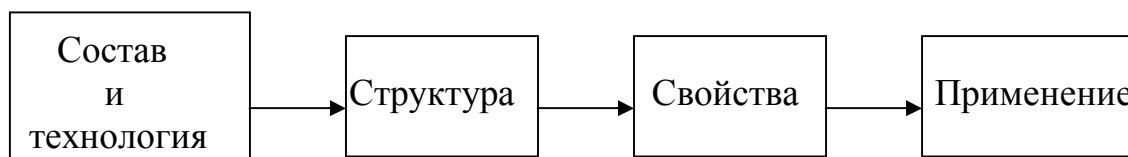
Нет необходимости объяснять, что такое материал. Все, что нас окружает, вся наша техника, здания, сооружения, предметы обихода состоят из различных природных или искусственно полученных материалов. В пределах понятие «материал» аналогично понятию «вещество».

Роль материалов в истории человечества настолько важна, что целые эпохи развития цивилизации названы по имени преобладавших материалов: каменный век, бронзовый век, железный... Освоение новых материалов позволяло обществу перейти на новую ступень, более полно удовлетворять свои потребности. Поэтому вместе с развитием человечества накапливалось и знание о свойствах природных и искусственных материалов. В современном мире материаловедение является динамично развивающейся наукой, одним из самых актуальных и перспективных направлений человеческой деятельности. Томск не остался в стороне: у нас успешно действует и сотрудничает с ТПУ Институт физики прочности и материаловедения в составе Томского научного центра СО РАН.

##### *Определение материаловедения*

**Материаловедение** – это прикладная наука о связи между составом, структурой и свойствами материалов, а также о влиянии различных видов обработки на их структуру и свойства.

Взаимосвязь эта выражается следующей схемой:



Обратите внимание на направленность этой взаимосвязи: от химического состава и технологии получения зависит структура материала, а структура, в свою очередь, определяет его свойства. Области применения одного и того же материала могут быть очень разнообразны, в зависимости от его структуры и свойств.

##### *Методы исследования в материаловедении*

Теоретическими основами современного материаловедения являются физика и химия (особенно физическая химия); кроме того, в ходе изучения этой дисциплины понадобятся представления из таких технических наук, как сопротивление материалов, детали машин, прикладная механика. Материаловедение развивается прежде всего экспериментальным путем, но в XX столетии был создан и продолжает совершенствоваться математический аппарат, позволяющий до эксперимента просчитывать поведение материала в различных условиях, создавать модели структуры и выбирать оптимальную.

Структура – важнейшее понятие в материаловедении. Можно сказать, что под *структурой* понимается состав, размеры и форма, количественное соотношение и пространственное расположение составляющих материал частиц. В зависимости от размеров этих частиц и применяемых методов их выявления различают понятия:

– *макроструктура* (строение материала, видимое невооруженным глазом или с помощью лупы; размер объектов до  $10^{-4}$  м, или 0,1 мм),

– *микроструктура* (строение материала, наблюдаемое с помощью оптического микроскопа; размер объектов до  $10^{-7}$  м, или 0,1 мкм),

– *тонкая структура* (строение молекул и атомов, расположение элементарных частиц в молекулах и кристаллах). Изучается с помощью рентгеноструктурного анализа, непосредственно наблюдается в электронном микроскопе. Размер объектов до  $10^{-10}$  м, или 0,1 нм.

Сравнительно недавно (конец XX в.) появилось понятие наноструктуры. Под *наноструктурой* понимают объекты в материале, имеющие величину от долей нанометра до 100 нм. (1 нм =  $10^{-9}$  м.)

#### ***Задачи и возможности материаловедения***

Создание новых материалов и познание закономерностей их поведения позволяет экономить сырье, уменьшать массу машин и конструкций, добиваться большей точности изготовления деталей, повышать надежность и долговечность техники, увеличивать мощность двигателей.

Новые материалы порождают новые технологии и целые новые отрасли: в электронике решающую роль сыграло появление полупроводниковых материалов и жидких кристаллов, в авиа- и ракетостроении – композитов, в радиотехнике – сверхпроводящих материалов и аморфных сплавов.

#### ***Цель изучения дисциплины «Материаловедение»***

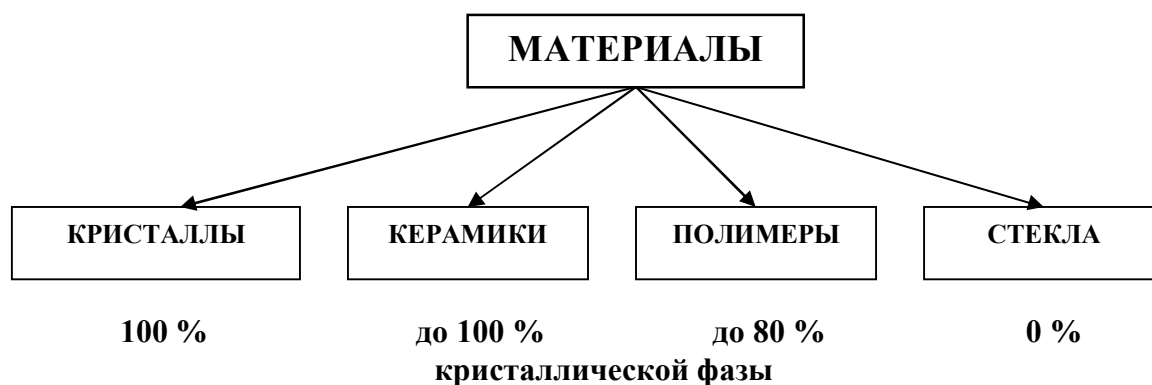
Инженеры-теплоэнергетики должны представлять, как «устроены» материалы, из которых изготовлены детали турбин и котлов, различные конструкции атомных и тепловых электростанций. Надо знать свойства материалов в условиях эксплуатации, их реакцию на изменение нагрузок, температуры и других условий внешней среды. Это дает возможность грамотно решать многие вопросы: выбор материалов для различных изделий, пригодность деталей к дальнейшей эксплуатации, вероятность выхода из строя, предотвращение аварийных ситуаций.

## **Классификация конструкционных материалов**

***Конструкционными*** называются материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, приборов, сооружений, которые работают в условиях механических нагрузок. Конструкционные материалы долж-

ны сопротивляться этим нагрузкам, т. е. *не разрушаться и не деформироваться* при эксплуатации.

Применяемые в современной технике конструкционные материалы можно классифицировать по различным признакам. (Например, по назначению.) Так как структура материала в значительной степени определяет его свойства, то рассмотрим классификацию конструкционных материалов *по структуре*. За главный признак здесь принята степень упорядоченности элементов структуры в пространстве. Можно выделить четыре основные группы материалов:



### *Кристаллы*

Материалы первой группы – *кристаллы* – имеют упорядоченное расположение частиц в пространстве. Эти частицы могут представлять собой атомы, ионы или молекулы в разных типах кристаллов.

Важнейшее свойство кристаллов – сохранять форму при нагреве до определенной температуры, при которой происходит плавление.

В процессе охлаждения из жидкого состояния кристаллизация, или переход в твердое состояние происходит при той же температуре. *Кривые нагрева и охлаждения* у кристаллических веществ симметричны и имеют четко выраженные горизонтальные участки (см. рис. 2.1, а). Их протяженность соответствует времени, необходимому для разрушения или установления правильного, упорядоченного расположения частиц в объеме кристалла.

К кристаллам относятся все металлы и сплавы, существуют также ионные, ковалентные и молекулярные кристаллы.

### *Стекла*

Противоположная кристаллам группа – это *аморфные материалы*, или *стекла*. Они не имеют упорядоченного расположения частиц (атомов, молекул) в пространстве. Их структура подобна структуре жидкости, где возникают и исчезают отдельные участки с упорядоченным строением. Они и являются, по сути, переохлажденными жидкостями с огромной вязкостью.



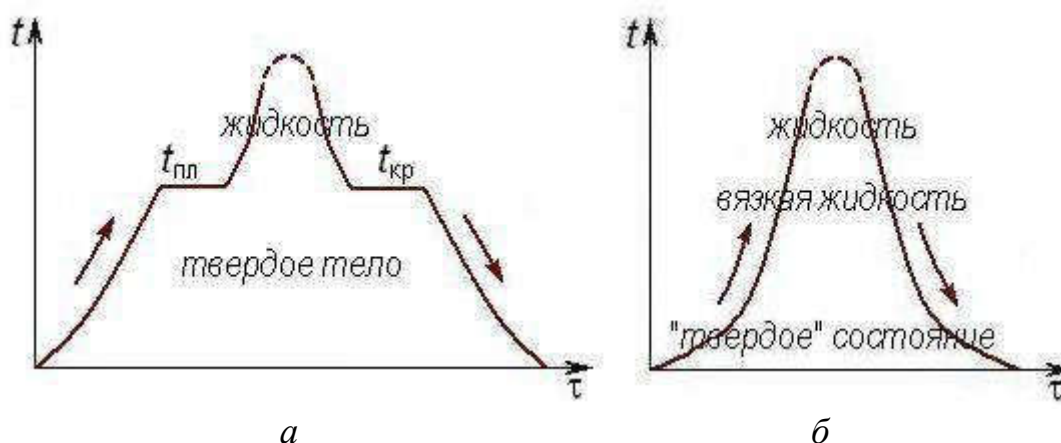


Рис. 2.1. Кривые нагрева и охлаждения кристаллического (а) и аморфного (б) вещества

Стекла при нагревании размягчаются постепенно, при охлаждении постепенно затвердевают. Кривая нагрева и охлаждения у них плавная, без перегибов и ступенек (рис. 2.1, б).

Стекла – твердые, но очень хрупкие материалы, устойчивы в агрессивных средах; обычно используются их оптические свойства.

Примерами таких материалов являются широко применяемое оконное силикатное стекло и другие виды стекол. Их получают сплавлением основных и кислотных оксидов при высоких температурах.

Многие вещества могут существовать как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии; научились получать даже аморфные металлы.

### **Керамики**

**Керамики** – это материалы, полученные спеканием минеральных порошков при высокой температуре. Они состоят, в основном, из кристаллической фазы с аморфными прослойками, имеют значительную пористость. Кристаллическая фаза представляет собой ионные и ковалентные соединения.

Традиционные керамические материалы изготавливаются из глин различного состава. Это кирпич, строительная и бытовая керамика.

Современная тонкая керамика содержит мало пор и может состоять полностью из кристаллической фазы.

Свойства керамики: очень твердые материалы, выдерживают высокие температуры, долговечны, но по сравнению с металлами более хрупки.

Примеры современной технической керамики: огнеупоры, твердые сплавы, антифрикционные материалы, фильтры, теплоизоляционные материалы, плотная керамика для деталей машин, электроизоляторы.

### ***Пластмассы***

**Пластмассы**, или **высокополимеры** – это искусственные твердые материалы с большой молекулярной массой (свыше  $10^4$  атомных единиц). Структурным элементом в пластмассах является *макромолекула* – линейное или разветвленное образование из большого числа молекул мономера, соединенных ковалентными связями:  $(-CH_2-CH_2-)_n$ .

В *термопластичных пластмассах* между макромолекулами действуют только относительно слабые силы Ван-дер-Ваальса; в *термореактивных* полимерах линейные макромолекулы соединены поперечными ковалентными связями.

Макромолекулы в пластмассах способны образовывать упорядоченные пространственные структуры, или кристаллы, но полностью кристаллической пластмасса не становится, всегда присутствует какая-то доля неупорядоченной, аморфной структуры.

Пластмассы менее прочны, чем металлы и сплавы, имеют низкую теплостойкость, со временем теряют свои полезные свойства – стареют.

Примеры самых популярных полимерных материалов: полиэтилен, полистирол, фторопласт, текстолит, стеклопластики. Близки по строению к пластмассам другие полимерные материалы – резины.

### ***Композиционные материалы***

Надо отметить, что существуют материалы, называемые **компози-тами**, или **композиционными материалами**, которые нельзя причислить ни к одной из этих групп, так как они состоят из материалов разного происхождения. Композиты могут состоять из металла и керамики, из полимера и стекла. Такие материалы сочетают свойства исходных компонентов, а по некоторым свойствам превосходят их.

### ***Требования к конструкционным материалам***

К конструкционным материалам предъявляется *комплекс требований*: эксплуатационных, экономических и технологических.

Важнейшими являются эксплуатационные требования. Это *прочность, надежность и долговечность*. Иными словами, материал должен надежно работать в условиях эксплуатации в течение длительного, рационально обоснованного периода времени.

В наибольшей степени этому комплексу требований удовлетворяют кристаллические конструкционные материалы: металлы и их сплавы. Эта группа составляет до 80 % объема всех выпускаемых конструкционных материалов.

## Раздел I Основы металловедения

### Свойства металлов

Металлами являются 88 из 110 известных химических элементов. Свойства металлов обусловлены *металлическим типом связи*: положительно заряженные ионы расположены упорядоченно, валентные электроны принадлежат всем ионам в металлическом кристалле и могут свободно перемещаться, образуя электронный газ. Между положительно заряженными ионами и электронами действуют электростатические силы притяжения.

Металлы проявляют следующие характерные свойства:

- 1) Высокую *теплопроводность* и *электропроводность*.
- 2) *Положительный температурный коэффициент электросопротивления* (с повышением температуры электросопротивление растет).
- 3) Способность к *термоэлектронной эмиссии* (при нагреве поверхность металла испускает электроны).
- 4) *Непрозрачность*, *металлический блеск*.
- 5) Высокую *пластичность*, т. е. способность деформироваться без разрушения.

*Почему металлы проявляют такие свойства?*

Валентные энергетические зоны атомов в металле перекрываются, образуя общую зону со свободными подуровнями. В пределах этой зоны свободные электроны могут перемещаться, обеспечивая прохождение тока и тепла. Именно свободные электроны являются носителями электрического заряда и тепловых колебаний.

С повышением температуры увеличивается амплитуда тепловых колебаний ионов вокруг равновесных положений, свободное перемещение электронов затрудняется, и электросопротивление растет.

Слабая связь валентных электронов в металле с ядром позволяет им легко отрываться при получении дополнительной энергии (при нагреве, например) и улетать с поверхности металла в окружающее пространство. Так возникает термоэлектронная эмиссия. Этот эффект используется, в частности, в кинескопах телевизоров.

Закономерно расположенные слои атомов (ионов) обладают высокой отражательной способностью, в том числе по отношению к видимой части спектра. Отсюда блеск поверхности металлов, их непрозрачность даже в самых тонких фольгах.

Металлическая связь ненаправленная: каждый атом стремится притянуть к себе как можно больше других, поэтому металлы образуют компактные, плотно упакованные кристаллические структуры. Это по-

звояет легко смещать одни слои атомов относительно других, вместо нарушенных межатомных связей тут же образуются новые. Металл деформируется, но не разрушается, т. е. проявляет пластичность. Именно это уникальное свойство позволило металлам стать важнейшим конструкционным материалом, обеспечивая одновременно надежность в работе и технологичность при изготовлении.

## Лекция 2

### Кристаллическое строение металлов

#### Расположение атомов в металлах

Почти все металлические изделия являются *поликристаллами*, т. е. состоят из огромного числа мелких кристалликов или *зерен*. Микроанализ позволяет увидеть границы зерен, оценить их размер и форму. В электронике, вычислительной технике широко применяются единичные, специально выращенные кристаллы – *монокристаллы*.

В каждом зерне атомы (ионы) расположены закономерно, образуя пространственную *кристаллическую решетку*. Такая решетка представляет собой систему линий, соединяющих центры соседних атомов. На самом деле этих линий в кристалле нет, атомы имеют шарообразную форму и соприкасаются внешними электронными оболочками. Но чтобы яснее представить расположение атомов в кристалле, удобно изображать только центры тяжести атомов (в виде точек или кружков) и соединять их линиями, означающими межатомную связь (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Схема кристаллического строения металлов

Данные о межатомном расстоянии и взаимном расположении атомов в кристалле получают с помощью рентгеноструктурного анализа. Непосредственно на-

блюдать строение атомных плоскостей можно в современном электронном микроскопе (сканирующем туннельном или атомно-силовом).

### **Что удерживает атомы в кристалле?**

Атомы в кристалле расположены на строго определенном расстоянии, на котором энергия взаимодействия между ними минимальна. Силы притяжения и отталкивания между двумя соседними атомами с увеличением расстояния уменьшаются. Но это уменьшение не одинаково: силы отталкивания уменьшаются быстрее. Равнодействующая сила проходит через нуль при некотором межатомном расстоянии  $d_0$ . На этом расстоянии силы притяжения и отталкивания уравниваются:  $F_{\text{пр}} = F_{\text{отт}}$  (рис. 2.3, а), а энергия связи  $E_{\text{св}}$  минимальна (рис. 2.3, б). Поэтому кристалл термодинамически стабилен.

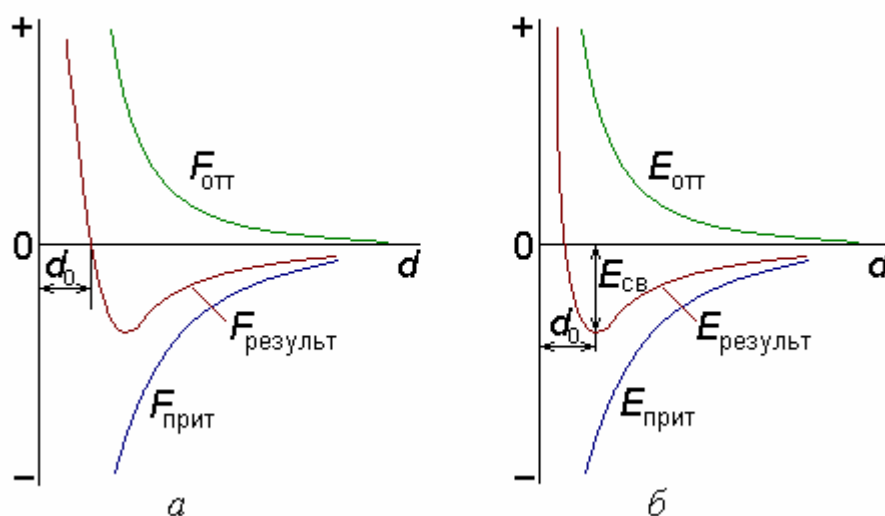


Рис. 2.3. Зависимость сил межатомного взаимодействия (а) и энергии взаимодействия (б) от расстояния между атомами

Каждое кристаллическое вещество имеет свое значение энергии связи, это важнейшая термодинамическая характеристика кристалла. От величины энергии связи зависят температура плавления  $T_s$ , модуль упругости  $E$ , температурный коэффициент линейного расширения  $\epsilon_{\text{л}}$ .

### **Типы кристаллических решеток**

Наименьший объем кристаллической решетки, который характеризует расположение атомов в кристалле, называют **элементарной кристаллической ячейкой** (рис. 2.4). Перемещая элементарную кристаллическую ячейку вдоль трех пространственных осей, можно получить кристалл любой величины, так же как из одинаковых кирпичиков строятся разные по величине и архитектуре здания.

По форме элементарных ячеек все кристаллические материалы подразделяются на 7 *кристаллических систем*. Любую из них можно охарактеризовать шестью параметрами: тремя линейными (размерами  $a$ ,

$b$  и  $c$  ячейки по трем осям координат) и тремя угловыми (углами  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  между этими отрезками).

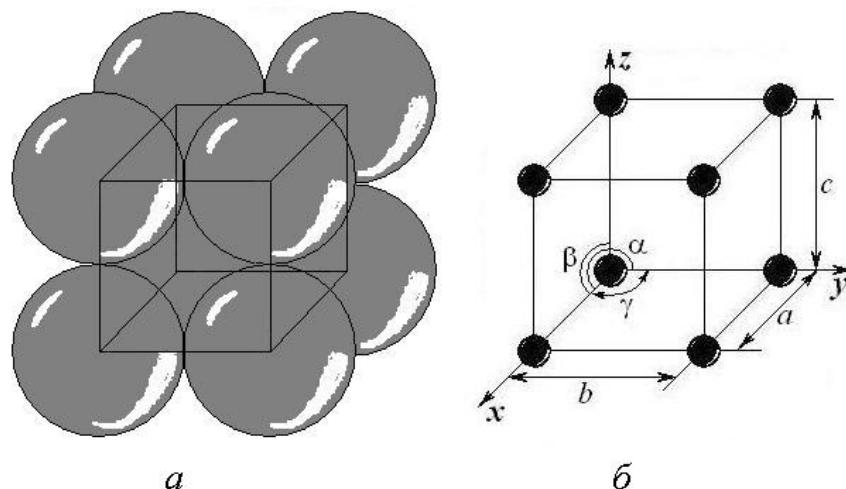


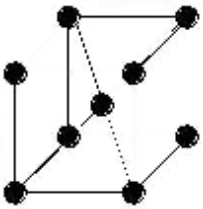
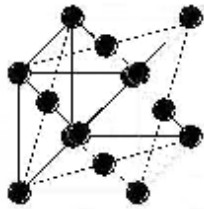
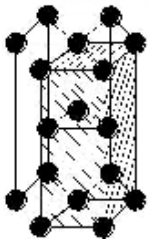
Рис. 2.4. Элементарная кристаллическая ячейка: пространственное изображение (а) и схема (б)

Межатомные расстояния измеряются в нанометрах (нм) или ангстремах (Å).  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ;  $1 \text{ нм} = 10 \text{ Å}$ . Размеры элементарных ячеек металлов составляют от 2 до 6 Å, или от 0,2 до 0,6 нм.

У металлов чаще всего встречаются три типа кристаллических решеток из 14 возможных; они относятся к кубической и гексагональной системам (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Кристаллические решетки металлов

Тип решетки	Объемно-центрированная кубическая решетка (ОЦК)	Гранцентрированная кубическая решетка (ГЦК)	Гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ)
Параметры	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ,$ $\gamma = 120^\circ$
Вид элементарной ячейки			
Металлы с таким типом решетки	Cr, Mo, W, V, Ta, Nb, Fe $_{\alpha}$	Cu, Ni, Ag, Au, Pb, Pt, Al, Fe $_{\gamma}$	Mg, Co, Zn, Cd, Be, Zr, Ti $_{\alpha}$



На изображении ГПУ решетки показаны три соседних элементарных ячейки, чтобы было понятно, почему эта решетка называется гексагональной. Одна из ячеек выделена жирными линиями и штриховкой.

Гексагональная решетка является плотноупакованной только в случае, когда отношение  $c/a = 1,633$ , или близко к этому значению. Для такой плотной укладки атомов в решетке центры атомов второго слоя должны располагаться над центрами лунок между атомами первого слоя и т. д. (рис. 2.5).

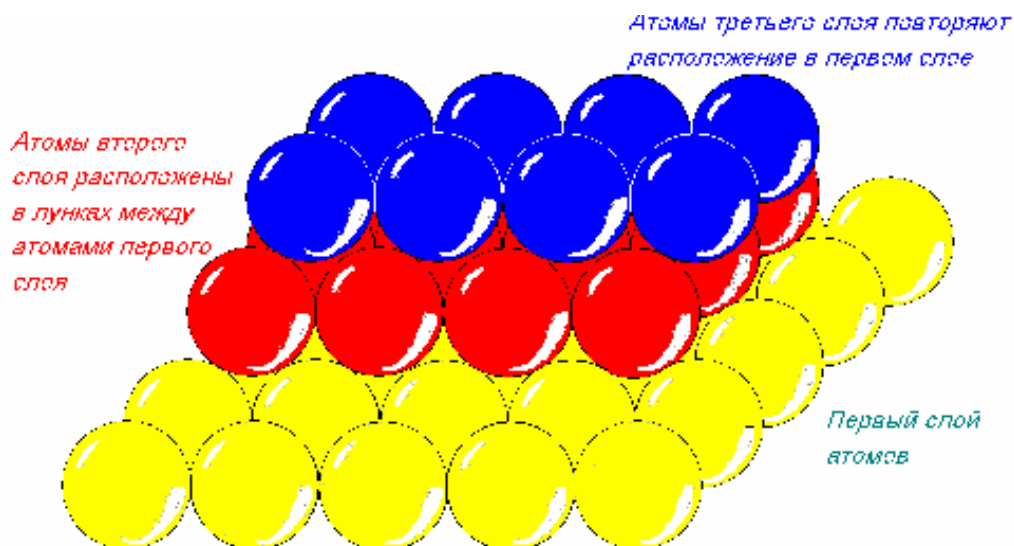


Рис. 2.5. Плотная укладка атомов в ГПУ решетке

#### **Плотность упаковки**

Плотность упаковки элементарных частиц в кристалле определяется двумя параметрами:

1) *координационным числом* – числом ближайших соседей, т. е. атомов, равноудаленных от данного. В ОЦК решетке координационное число  $K_8$ , что легко увидеть на изображении элементарной ячейки; в ГЦК решетке –  $K_{12}$ , что очевидно при рассмотрении 8 соседних элементарных ячеек; в ГПУ решетке – тоже  $K_{12}$ , а в простой кубической –  $K_6$ ;

2) *коэффициентом компактности* – отношением объема атомов, приходящихся на одну ячейку, к ее объему:

$$V_{\text{ат}}/V_{\text{яч}} = 0,52 \text{ в простой кубической решетке,}$$

$$V_{\text{ат}}/V_{\text{яч}} = 0,68 \text{ в ОЦК решетке,}$$

$$V_{\text{ат}}/V_{\text{яч}} = 0,74 \text{ в ГЦК решетке и ГПУ решетке.}$$

Обратите внимание на то, что между атомами (ионами) в металле всегда имеются поры: шары не могут заполнить весь объем.

#### **Полиморфизм металлов**

Некоторые металлы при изменении внешних условий (температуры или давления) изменяют тип кристаллической решетки. При этом хими-

чески они остаются теми же самыми веществами. Явление перестройки решетки называется **полиморфным превращением**. Один и тот же металл с разными кристаллическими решетками называют **полиморфными модификациями** данного металла. Обозначают полиморфные модификации греческими буквами, начиная с низкотемпературной:  $Me_{\alpha} \rightarrow Me_{\beta} \rightarrow Me_{\gamma} \rightarrow Me_{\delta}$ .

Например, железо  $Fe_{\alpha}$  с ОЦК решеткой существует ниже  $911^{\circ}\text{C}$ , с  $911$  до  $1392^{\circ}\text{C}$  оно имеет ГЦК решетку и обозначается  $Fe_{\gamma}$ , а при  $1392^{\circ}\text{C}$  решетка снова превращается в ОЦК и сохраняется до температуры плавления ( $1539^{\circ}\text{C}$ ).

Полиморфное превращение у титана происходит при  $882^{\circ}\text{C}$ , при этом  $Ti_{\alpha}$  с ГПУ решеткой превращается в  $Ti_{\beta}$  с ОЦК решеткой.

#### **Анизотропия свойств металлов**

**Анизотропией** называется зависимость свойств металлов от направления в кристаллической решетке. Так как расстояния между атомами различны по разным направлениям, то и энергия связи тоже различна. Поэтому должны отличаться и свойства. Очень заметна анизотропия свойств в кристаллах с низкой симметрией, а в высокосимметричных кубических решетках металлов она проявляется меньше. От направления в решетке зависят коэффициент линейного расширения, удельное электросопротивление, магнитные свойства.

Но не надо забывать, что анизотропен единичный кристалл – монокристалл. Поликристаллические изделия из металла кажутся изотропными, так как в мельчайших кристалликах, из которых они состоят, направления атомных плоскостей не совпадают. Среднее расстояние между атомами оказывается примерно одинаковым по всем направлениям.

#### **Дефекты кристаллического строения**

Идеальные кристаллы в природе не встречаются. Реальные кристаллы, в том числе металлы, всегда имеют отклонения от правильного строения, или дефекты.

Дефекты кристаллического строения классифицируют по геометрическому признаку – по размерам. Различают точечные, линейные, поверхностные и объемные дефекты.

1) **Точечными** называют дефекты, которые малы во всех трех пространственных направлениях, т. е. соизмеримы с межатомным расстоянием. Это вакансии, межузельные атомы, примеси замещения и внедрения.

**Вакансия** – это отсутствие атома в узле кристаллической решетки, «пустое место». Атомы вокруг вакансии сближаются, так как в этом месте  $F_{\text{пр}} > F_{\text{отт}}$ . Кристалл как бы сжимается, стремится «залечить» дефект (рис. 6, а).

Вакансии играют огромную роль в процессах диффузии: они способствуют движению атомов внутри металла.

Число их растёт с увеличением температуры: атомы с поверхности металла могут улетать, получив дополнительную энергию, а образовавшиеся вакансии продвигаются вглубь металла.

**Межузельный атом** – это собственный, «родной» атом металла, выбитый из узла. Их всегда меньше, чем вакансий. Вокруг межузельного атома соседи раздвигаются: здесь  $F_{\text{отт}} > F_{\text{пр}}$  (рис. 6, б).

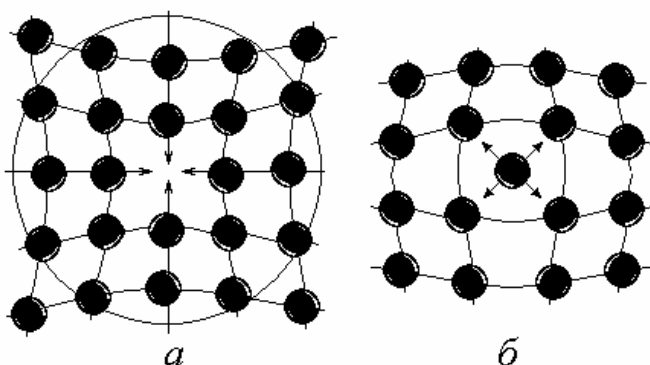


Рис. 2.6. Точечные дефекты: вакансия (а) и межузельный атом (б)

**Примесной атом**, или **примесь** – это атом другого, «чужого» вещества, попавшего в металл (обычно из руды при выплавке). Примесные атомы могут замещать собственные в узлах кристаллической решетки (*примесь замещения*) или занимать поры между ними (*примесь внедрения*). Примесные атомы искажают

решетку сильнее, чем собственные межузельные (рис. 2.7).

Из всех точечных дефектов существенное влияние на прочность металла оказывают только примеси, особенно примеси внедрения. Они затрудняют пластическую деформацию металла, поэтому повышают прочностные характеристики.

2) **Линейными** называют дефекты, которые малы только в двух пространственных направлениях, а в третьем имеют протяженность в тысячи и миллионы межатомных расстояний. Эти дефекты называют **дислокациями**. Дислокации бывают краевые, винтовые и смешанные.

**Краевая дислокация** – это область под краем незавершенной, недостроенной атомной плоскости в металле. (Можно сказать и «над краем», так как понятия «низ» и «верх» в тонкой структуре металла не имеют значения.) Недостроенная плоскость является как бы «лишней»,

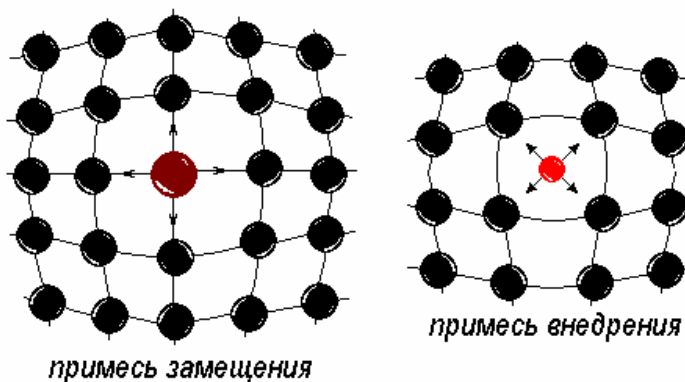


Рис. 2.7. Точечные дефекты: примесные атомы

нарушающей идеальную структуру металла (рис. 2.8, *a*). Ее называют *экстра-плоскостью*.

Краевая дислокация может возникнуть при воздействии силы  $P$ , деформирующей кристалл: в верхней части кристалла сдвиг прошел до линии  $AB$ , а левее этой линии кристалл остался недеформированным. Возникла экстра-плоскость, край ее  $AB$  и есть линия краевой дислокации (рис. 2.8, *б*).

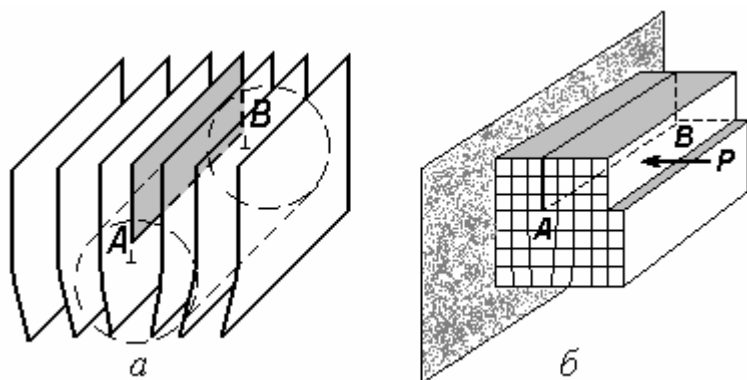


Рис. 2.8. Краевая дислокация (*a*) и возникновение дислокации при сдвиге (*б*)

У края экстра-плоскости создается разрежение атомов, поэтому ближайшие к нему атомы сдвигаются в сторону отсутствующего ряда. Решетка здесь стремится сжаться, «закрыть» дефект.

Область искажения решетки мала в двух направлениях, а в третьем может проходить через весь кристалл. Можно представить краевую дислокацию как трубку диаметром в 2-3 межатомных расстояния, но очень большой длины. В эту разреженную область должны стремиться атомы примесей, так как это энергетически выгодно.

**Винтовая дислокация** подобна винтовой лестнице; это атомная плоскость, закрученная в спираль и ставшая винтовой поверхностью.

Условно можно представить, что винтовая дислокация возникает, если надрезать кристалл до какой-то прямой  $AB$ , а затем сдвинуть одну надрезанную половинку вниз относительно другой на одно межатомное расстояние. В области надреза образуется ступенька на каждой атомной плоскости. Получается, что весь кристалл представляет собой винтовую поверхность, «закрученную» вокруг линии  $AB$  (рис. 2.9).

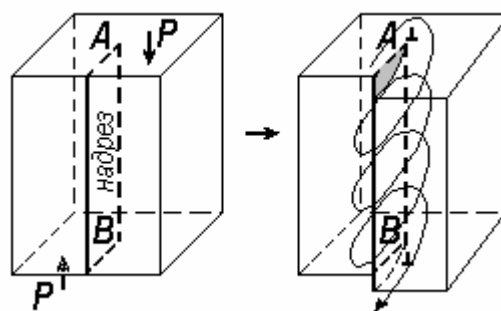


Рис. 2.9. Винтовая дислокация

Чаще всего встречаются **смешанные дислокации**: краевая и винтовая переходят одна в другую. На рис. 2.10  $AB$  – линия смешанной дислокации.

Количество дислокаций в металле характеризуют их плотностью. Плотность дислокаций  $\rho$  – это суммарная их длина в единице объема:

$$\rho = \frac{\sum l}{V} [\text{см}^{-2}].$$

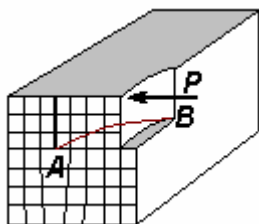


Рис. 2.10. Смешанная дислокация

Дислокации возникают при зарождении и росте кристаллов, а также при деформации.

Дислокации играют важнейшую роль в теории прочности, пластичности и разрушения металлов. Влияние их на прочность неоднозначно: с появлением дислокаций прочность идеального кристалла резко снижается, но при очень большой их плотности снова начинает расти (рис. 2.11).

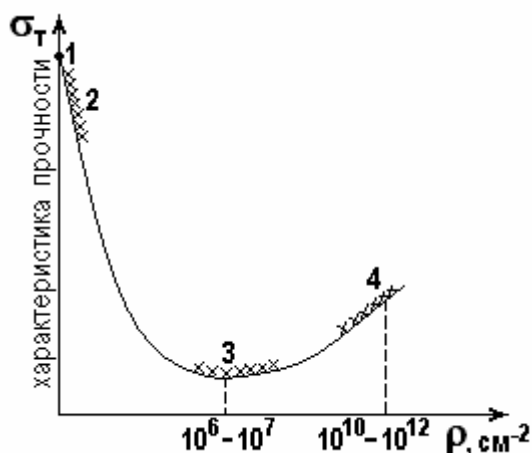


Рис. 2.11. Влияние плотности дислокаций на прочность:

1 – идеальный кристалл; 2 – «усы», кристаллы с минимальной плотностью дефектов; 3 – отожженные металлы; 4 – сильно деформированные металлы с высокой плотностью дислокаций

3) *Поверхностными* называют дефекты, которые малы в одном направлении, а в двух других – намного больше межатомного расстояния. Это **границы зерен** в поликристаллах, границы субзерен и двойников (см. рис. 2.12).

Угол разориентировки между двумя соседними зернами может быть любым, а между двумя субзернами в зерне – не более  $6^\circ$ .

Очень важно хорошо представлять, что граница зерна – это не «стена» из чего-то между соседними зернами и не пустота между ними. Это область, где нарушается строго упорядоченное строение металла: атомные плоскости в одном зерне не имеют продолжения в соседнем, там атомные плоскости расположены в другом направлении.

Надо также не забывать, что границы зерен – не линии, хотя именно так мы видим их на отполированной и протравленной поверхности

металла. Это поверхности раздела между зернами, представляющими собой неправильные многогранники. Каждое зерно как бы «завернуто» в свою границу.

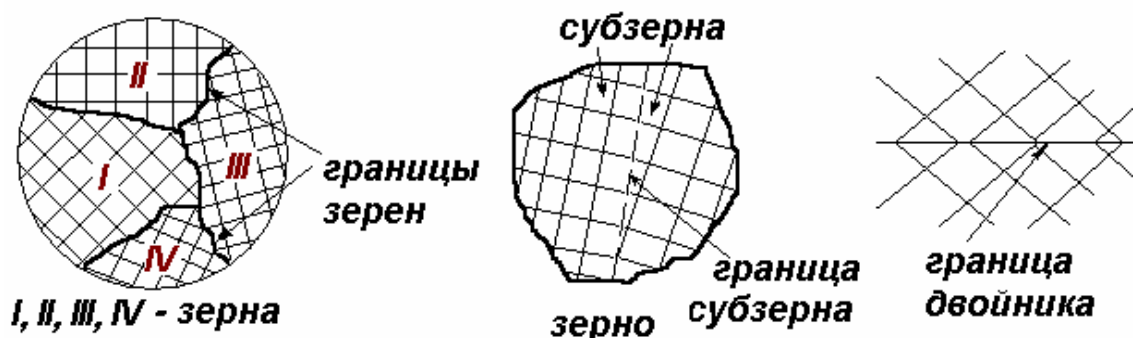


Рис. 2.12. Поверхностные дефекты: границы зерен, субзерен и двойников

Влияние поверхностных дефектов на прочность металла велико: границы зерен и субзерен являются препятствиями для развития деформации, а значит – упрочняют металл. Чем больше поверхность границ в единице объема, тем прочнее металл.

4) *Объемные* дефекты во всех трех измерениях намного больше межатомного расстояния. Это раковины, поры, зародыши трещин, неметаллические включения. Все объемные дефекты являются очагами возможного разрушения, т. е. влияют на прочность отрицательно.

Возможно, причиной катастрофы «Титаника» послужили неметаллические включения в заклепках, соединявших листы корпуса (сварные корпуса тогда еще не делали). Пробоина от столкновения с айсбергом была не так велика, чтобы судно затонуло. Но его корпус разломился практически пополам. Исследователи нашли, что 15 % из сохранившихся заклепок имели значительные неметаллические включения, следовательно, могли разрушиться при ударе. Поэтому гибель корабля была такой стремительной.

### Лекция 3

## Кристаллизация металлов

**Кристаллизация** – это переход металла из жидкого состояния в твердое, кристаллическое. В жидкости не существует дальнего порядка: расстояния между атомами не являются постоянными во всем объеме. В процессе кристаллизации должен установиться этот дальний порядок: во всем объеме металла атомы должны расположиться упорядоченно, образуя кристаллическую решетку.

Процесс кристаллизации может идти самопроизвольно, а может вызываться какими-то искусственными причинами.



### Условие самопроизвольной кристаллизации

В термодинамике самопроизвольно идут только те процессы, которые приводят к уменьшению свободной энергии системы. Свободная энергия как жидкого, так и твердого металла снижается с повышением температуры (рис. 2.13).

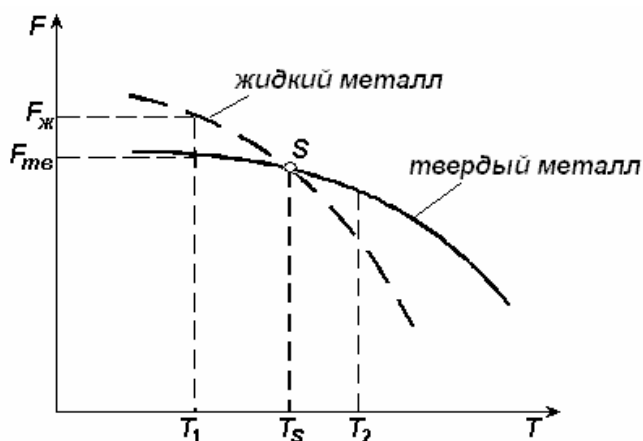


Рис. 2.13. Зависимость свободной энергии металла от температуры

Кривые зависимости  $F(T)$  для твердого и жидкого состояния одного и того же металла пересекаются в точке  $S$ , которой соответствует температура  $T_s$ . При температуре  $T_1 < T_s$  термодинамически устойчиво твердое состояние металла, так как  $F_{тв} < F_{ж}$ . Значит, при любой температуре ниже  $T_s$  будет идти процесс кристаллизации. Если же температура  $T_2 > T_s$ , то, наоборот, устойчиво

жидкое состояние металла:  $F_{ж} < F_{тв}$ . При температуре, превышающей  $T_s$ , металл будет плавиться.

В точке  $S$  система находится в состоянии равновесия:  $F_{ж} = F_{тв}$ . Поэтому в объеме металла будут одновременно присутствовать и жидкость, и кристаллы. Кристаллы будут то появляться, то снова плавиться, но до конца не дойдет ни плавление, ни кристаллизация, потому что нет энергетического стимула – разности свободных энергий (рис. 2.14). Так ведет себя вода при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ : она остается в виде каши из жидкости и кристаллов льда или снега до тех пор, пока температура не поднимется или не снизится.

Температура  $T_s$ , при которой свободная энергия жидкого и твердого состояния одинакова, называется **теоретической температурой кристаллизации**.

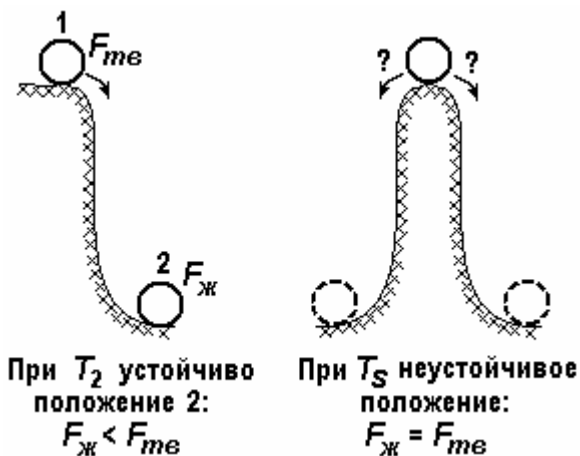


Рис. 2.14. Иллюстрация к понятию термодинамической устойчивости

Самопроизвольная кристаллизация начинается только при некотором переохлаждении относительно теоретической температуры кристаллизации.

Разность между теоретической и реальной температурой кристаллизации  $T_s - T_p = \Delta T$  называется *степенью переохлаждения*. У чистых металлов степень переохлаждения может достигать сотен градусов, но обычно при изготовлении отливок из металлов технической чистоты и сплавов она не превышает 30-40°.

#### *Закономерности кристаллизации*

1) На кривой охлаждения при кристаллизации возникает горизонтальная площадка. Это происходит из-за выделения *скрытой теплоты кристаллизации*, которая компенсирует отвод тепла в окружающую среду (рис. 2.15, а).

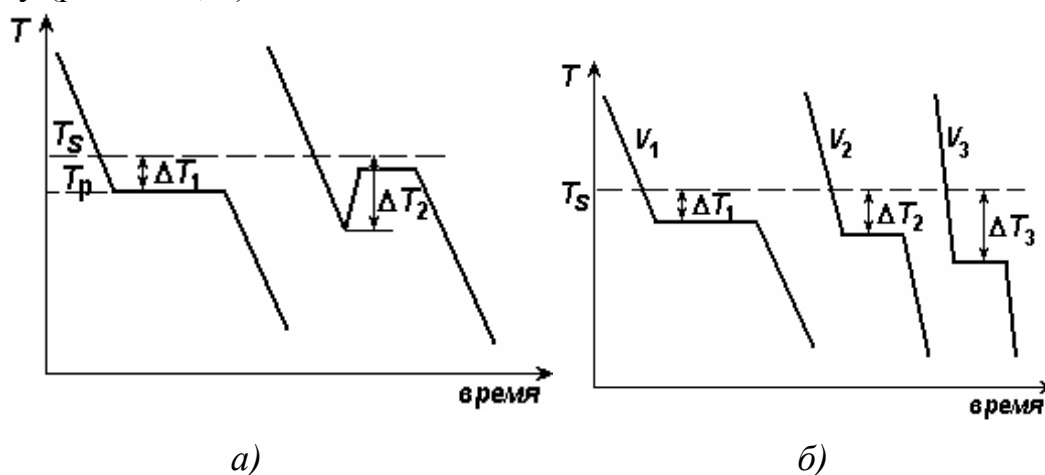


Рис. 2.15. Кривые охлаждения: выделение скрытой теплоты кристаллизации (а); зависимость степени переохлаждения от скорости охлаждения (б)

Некоторые металлы, например сурьма, кристаллизуются с таким бурным выделением скрытой теплоты кристаллизации, что температура расплава скачком повышается.

2) Чем больше скорость охлаждения, тем *большая* степень переохлаждения достигается при кристаллизации (рис. 2.15, б):

$$V_3 > V_2 > V_1 \rightarrow \Delta T_3 > \Delta T_2 > \Delta T_1$$

#### *Механизм процесса кристаллизации*

Процесс кристаллизации состоит из двух элементарных процессов:

- 1) зарождение *центров кристаллизации* или *зародышей*;
- 2) рост кристаллов из этих центров.

Процесс кристаллизации схематично показан на рис. 2.16.

Каждую секунду появляется какое-то количество новых центров кристаллизации, в то же время появившиеся ранее зародыши подрастают с определенной скоростью на какую-то величину. Столкновение

растущих кристаллов приводит к потере ими правильной огранки. Это уже не кристаллы, а *зерна*.

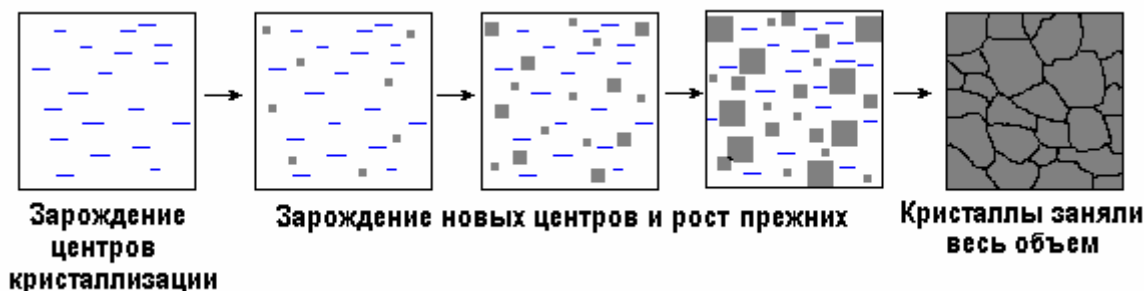


Рис. 2.16. Схема процесса кристаллизации

Общая скорость процесса кристаллизации складывается из скорости элементарных процессов и зависит от степени переохлаждения или скорости охлаждения расплава (рис. 2.17). Обозначения на рис. 2.17:

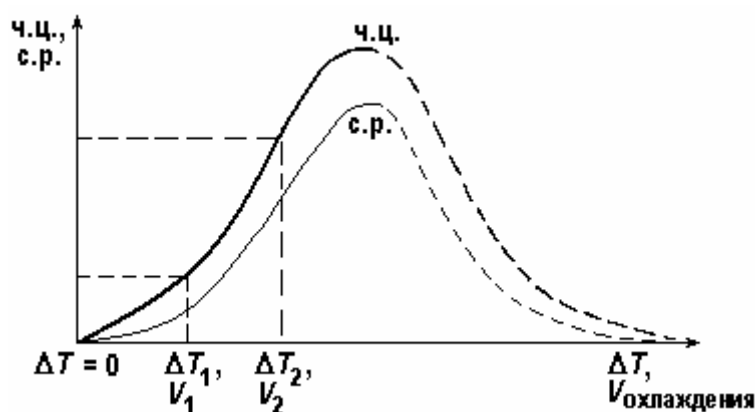


Рис. 2.17. Зависимость скорости зарождения центров кристаллизации и скорости их роста от степени переохлаждения

ч.ц. — число центров кристаллизации, возникших за 1 с в 1 мм<sup>3</sup> расплава,

с.р. — линейная скорость роста кристалла, мм/с.

При медленном охлаждении  $V_1$  и малой степени переохлаждения  $\Delta T_1$  возникает малое число зародышей в единицу времени. Из них вырастет небольшое количество крупных зерен. В этом случае получается крупнозернистая структура металла.

При большой скорости охлаждения  $V_2$  и значительной степени переохлаждения  $\Delta T_2$  возникает множество зародышей в единицу времени, и из них вырастает много мелких зерен. Структура получается мелкозернистая.

В производственных условиях изготовления отливок встречаются скорости охлаждения, расположенные в левой части графика. Правая же часть этих зависимостей (после максимумов) может быть реализована только в специальных условиях, так как для этого необходимы очень большие скорости охлаждения жидкого металла.

Таким образом, практически увеличение скорости охлаждения при кристаллизации приводит к формированию более мелкозернистого металла, имеющего более высокие механические свойства.

Крайняя левая точка графика (рис. 2.17) соответствует теоретической температуре кристаллизации  $T_s$ . Степень переохлаждения  $\Delta T = 0$ , то есть, нет движущей силы процесса, кристаллизации не будет. Очень маленькая скорость охлаждения может привести к получению только одного зародыша, из которого можно вырастить монокристалл.

В крайней правой точке, при очень большой скорости кристаллизации, атомы не успевают перестроиться в правильную кристаллическую решетку. Зародыши кристаллов не образуются совсем! Металл становится переохлажденной жидкостью, не имеющей дальнего порядка. Такие затвердевшие, но не ставшие кристаллическими металлы называют *металлическими стеклами*, или *аморфными металлами*.

#### **Строение слитков и отливок**

На процесс кристаллизации всегда влияет множество факторов: направление теплоотвода, наличие нерастворимых примесей в расплаве и т. д.

В слитке или отливке кристаллизация всегда начинается у стенок формы, так как металл здесь охлаждается быстрее (рис. 2.18). Степень переохлаждения у стенок велика, поэтому здесь образуется множество мелких кристалликов, по-разному ориентированных. Эту часть слитка называют *мелкозернистой коркой* 1.

Затем кристаллы начинают расти от поверхности в направлении, обратном отводу тепла, т. е. перпендикулярно стенке формы. В поперечном направлении кристаллы мешают друг другу расти, поэтому они приобретают вытянутую форму. Их называют *столбчатыми кристаллами* 2.

В центре крупного слитка образуется объем жидкого металла с почти одинаковой температурой во всех точках. Тепло от этой зоны отводится медленно, с одинаковой скоростью во всех направлениях. Поэтому зародыши здесь возникают в разных участках

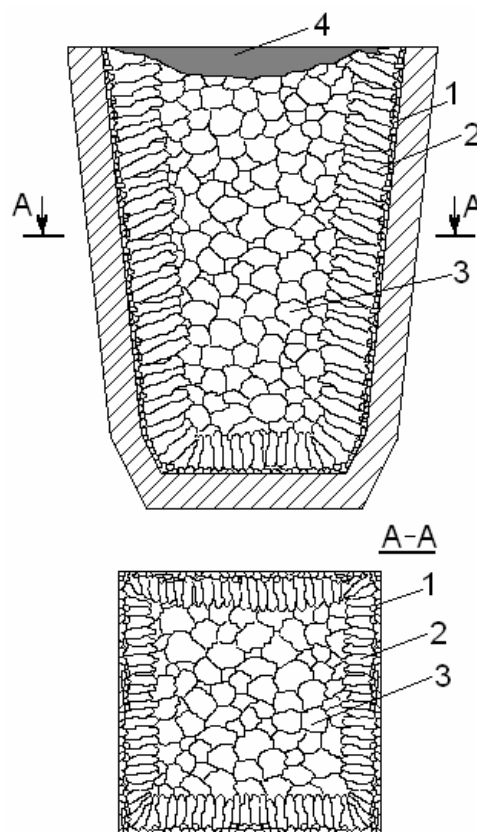


Рис. 2.18. Строение слитка

и не имеют преимущественного направления роста. Это зона *крупных, по-разному ориентированных равноосных кристаллов* 3.

В верхней части слитка за счет усадки возникает крупная пустота – *усадочная раковина* 4. Наилучшие механические свойства должны быть в первой зоне – корке, наихудшие – в сердцевине слитка, особенно в верхней части.

Размер зон в конкретном изделии зависит от состава металла, скорости охлаждения при кристаллизации и температуры заливаемого в форму металла.

В отливках небольшого поперечного сечения при быстром охлаждении и большом перегреве может происходить *транскристаллизация*: столбчатые кристаллы дорастают до столкновения, равноосные кристаллы в центре вообще не образуются.

Свободно растущий в жидкости кристалл при малой степени переохлаждения принимает форму *дендрита* – разветвляется подобно дереву. При росте дендритов максимальная скорость роста наблюдается по плоскостям и направлениям, которые имеют наибольшую плотность упаковки атомов. В результате вырастают длинные ветви, которые называют *осями первого порядка*. На них появляются ветви второго порядка и т. д. В последнюю очередь идет кристаллизация в участках между осями дендритов.

Примеси оттесняются гранями растущего кристалла. Кроме того, при затвердевании происходит усадка металла. Все это приводит к тому, что в участках, расположенных между осями дендритов, сконцентрированы примеси и имеются микропоры. Такая особенность строения литого металла приводит к понижению его механических свойств, особенно пластичности.

При прокатке дендриты деформируются, вытягиваются в длинные волокна, но междендритные промежутки с повышенной концентрацией примесей сохраняются. Этим объясняется неоднородная, волокнистая структура проката при травлении и разница в механических свойствах вдоль и поперек прокатанного изделия.

#### **Аморфные металлы**

Для получения аморфного металла нужны огромные скорости охлаждения:  $10^6$ - $10^7$  °C/с. Достичь этого можно, только охлаждая очень тонкие слои металла или мельчайшие капли. Для этого распыляют расплав жидкостью, холодным воздухом или инертным газом, льют тонкой струйкой на массивный вращающийся водоохлаждаемый барабан и т. п.

Теоретически любой металл или сплав можно получить в аморфном состоянии, если достичь нужной скорости охлаждения. Но так как это технически сложно, то идут другим путем: в состав сплава включают *аморфизаторы* – бор, фосфор, кремний и др. Эти элементы способствуют переохлаждению расплава без зарождения центров кристаллизации. Например, металлическое стекло из сплава Pd – Si по-

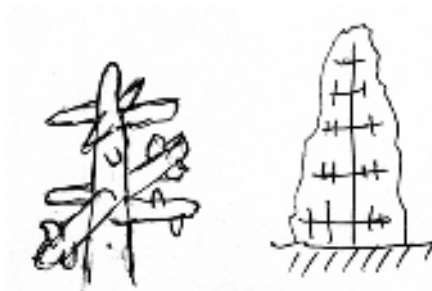


Рис. 2.19. Внешний вид и схема строения дендрита

лучается уже при скорости охлаждения  $10^3$  °C/с. Обычное соотношение металла и аморфизатора:  $Me_{80}X_{20}$ .

Изделия из металлических стекол очень малы по толщине (доли микрона) и используются в приборостроении.

Свойства аморфных сплавов: высокая твердость, прочность, износостойкость. Пластичность в них подобна вязкому течению жидкости. Нет анизотропии. Нет границ зерен, поэтому они не подвержены коррозии, которая легче всего развивается по границам. Особо важны их уникальные магнитные свойства: прямоугольная петля гистерезиса, высокая магнитная проницаемость, малая коэрцитивная сила. Все это находит применение в аудиотехнике (звукозапись и звуковоспроизведение).

При нагреве металла, находящегося в термодинамически неустойчивом аморфном состоянии, он кристаллизуется. Можно получить смесь кристаллов с аморфной основой, имеющую уникальные свойства.

#### ***Несамостоятельная кристаллизация***

***Несамостоятельной*** называют кристаллизацию на уже имеющихся центрах (нерастворенных частицах примесей) или с помощью поверхностно-активных примесей, которые способствуют измельчению зерна.

Специальное введение в расплав добавок, измельчающих зерно, называют *модифицированием*, а сами добавки – *модификаторами*.

Для стали модификаторами, образующими тугоплавкие частицы примесей, являются титан и алюминий, для алюминиевых сплавов – титан и цирконий. Поверхностно-активные модификаторы: для стали – бор, для алюминия – натрий.

Способствуют измельчению зерна механические колебания расплава с ультразвуковой частотой. Так получают пластичные литейные сплавы, не имеющие дендритной структуры.

## ***Лекция 4***

### **Деформация и разрушение металлов**

В процессе эксплуатации металл находится под действием различных внешних сил – силы тяжести, давления, трения и т. д. Эти силы создают в металле внутренние напряжения. Напряжения могут возникать также под действием разности температур в изделии и при фазовых превращениях.

На возрастающее напряжение металл реагирует последовательно

- 1) упругой деформацией;
- 2) пластической деформацией;
- 3) разрушением.

***Деформацией*** называют изменение формы и размера тела под действием нагрузок.



### Упругая деформация

**Упругая деформация** исчезает после снятия нагрузки (рис. 2.20). Изделие возвращается к прежней форме и размерам. Остаточных изменений в структуре не возникает.

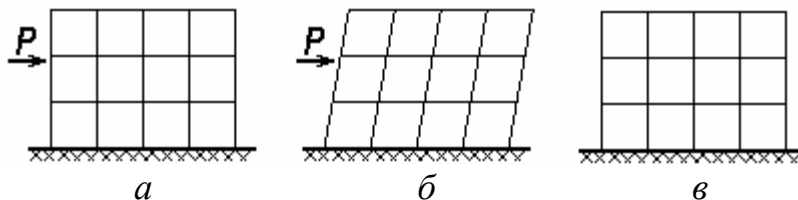


Рис. 2.20. Схема упругой деформации кристалла:  
*a* – до деформации; *б* – упругая деформация; *в* – после деформации

Механизм упругой деформации: под действием внешней силы атомы смещаются из равновесных положений, а после прекращения ее действия возвращаются в прежние положения за счет сил межатомного притяжения или отталкивания.

При смещении атомов относительно друг друга на расстояние  $d$ , большее или меньшее  $d_0$ , энергия связи  $E_{св}$  уже не будет минимальной, поэтому силы межатомного взаимодействия вернут атомы на прежние места, при этом силы притяжения и отталкивания снова окажутся уравновешены.

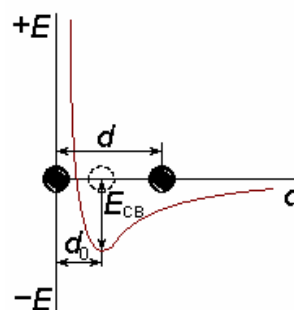


Рис. 2.21. Смещение атомов при упругой деформации

### Пластическая деформация

**Пластическая деформация** не исчезает после снятия нагрузки. При возрастании напряжения атомы смещаются на значительные расстояния и занимают новые положения равновесия. Деформация становится необратимой. После снятия нагрузки устраняется только ее упругая составляющая.

Пластическая деформация в кристаллах осуществляется, в основном, скольжением атомных плоскостей относительно друг друга (рис. 2.22).

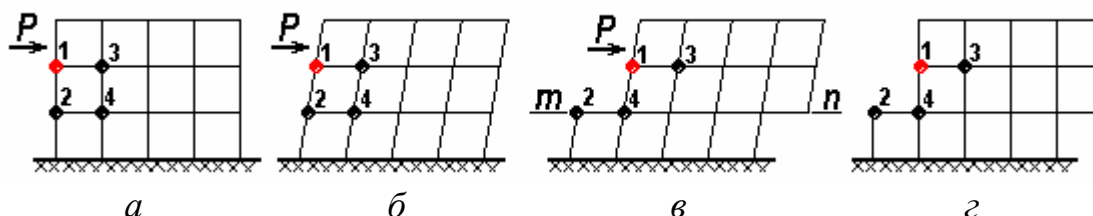


Рис. 2.22. Схема пластической деформации идеального кристалла:  
*a* – до деформации; *б* – упругая деформация; *в* – упругая и пластическая деформация; *г* – после деформации (упругая исчезла, пластическая осталась)

Под действием силы  $P$  произошло смещение верхней части кристалла относительно нижней по плоскости  $mn$ . При этом у атома 1 сменился сосед: был 2, стал 4. Кажется, что это скольжение произошло путем одновременного разрыва межатомных связей по всей плоскости скольжения (между атомами 1 и 2, 3 и 4, и т. д.).

Зная энергию связи в кристалле, подсчитали теоретическую прочность (исходя из предположения об одновременном разрыве связей). Она оказалась огромной: в 100-1000 раз больше реальной. (Для железа, например, напряжение сдвига составляет 20 МПа, а по теоретическому расчету получается 13300 МПа.) Пришлось принять другую гипотезу: ввести понятие дефекта кристаллического строения (дислокации) и предположить механизм его перемещения. Тогда теоретическая прочность совпала с реальной.

Механизм пластической деформации: перемещение одной части кристалла относительно другой происходит за счет движения дислокаций.

Изобразим реальный кристалл, содержащий дислокацию (рис. 2.23). В области дислокации под нагрузкой атомы легко смещаются на расстояния, меньшие, чем межатомное. При этом происходит разрыв всего одной связи, между атомами 4 и 7 (рис. 2.23, *а*), зато возникает новая связь между атомами 1 и 7 – и дислокация перемещается на одно межатомное расстояние (рис. 2.23, *б*).

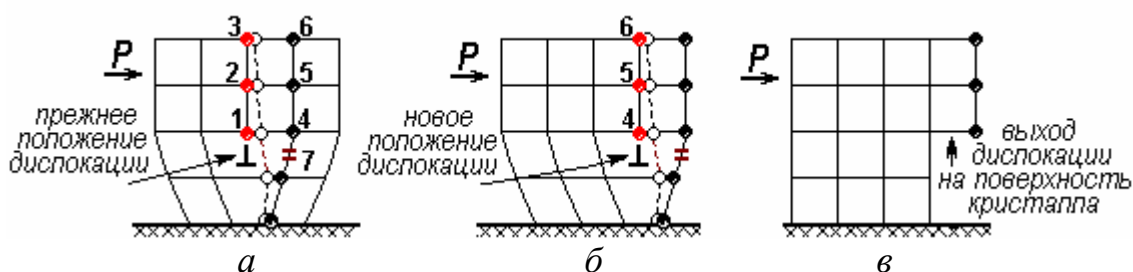


Рис. 2.23. Схема пластической деформации реального кристалла:  
*а* – до деформации; *б* – дислокация занимает новое положение;  
*в* – дислокация выходит на поверхность кристалла

Итак, в реальном, содержащем дислокации кристалле атомы смещаются под воздействием нагрузки на расстояния, меньшие межатомного, а дислокации при этом скачком перемещаются на целые межатомные расстояния. Процесс перемещения дислокаций продолжается до выхода на поверхность кристалла (рис. 2.23, *в*). Каждая дислокация при этом образует ступеньку шириной в одно межатомное расстояние. Но дислокаций – миллионы, поэтому их движение дает видимую пластическую деформацию всего кристалла (рис. 2.24).

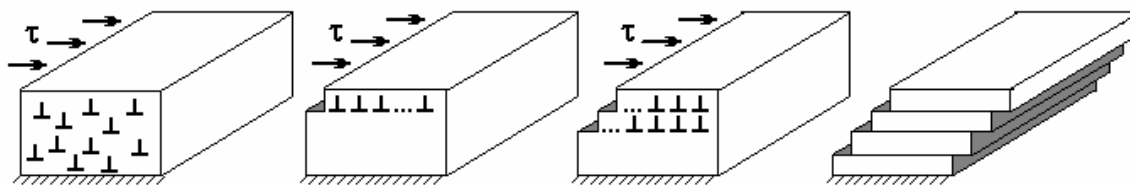


Рис. 2.23. Деформация монокристалла, видимая невооруженным глазом

Пластическая деформация поликристалла происходит по такому же механизму (рис. 2.25). Скольжение идет в каждом зерне по множеству плоскостей, при этом меняется форма каждого зерна, а значит – и всего изделия. После пластической деформации микроструктура имеет характерный вид: зерна вытянуты в направлении действия наибольших напряжений.

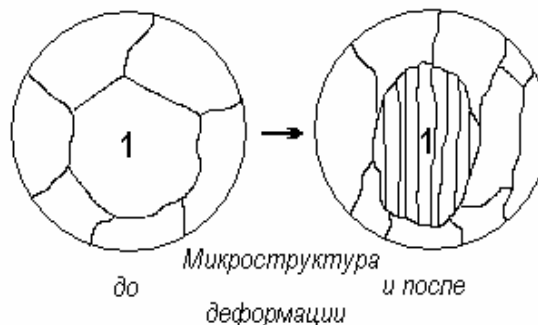


Рис. 2.25. Деформация поликристалла

Иногда кристаллическая решетка в каждом зерне получает определенную ориентацию относительно действующих напряжений. На рис. 2.26 это условно показано параллельными осями кристаллов. Такая ориентированная структура называется *текстурой*.

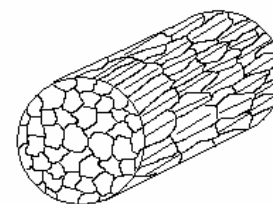


Рис. 2.26. Текстура

Скольжение дислокаций происходит легче всего в атомных плоскостях с максимальной плотностью атомов. Их называют *плоскостями наилегчайшего сдвига*. Расположение этих плоскостей в решетках металлов показано на рис. 2.27.

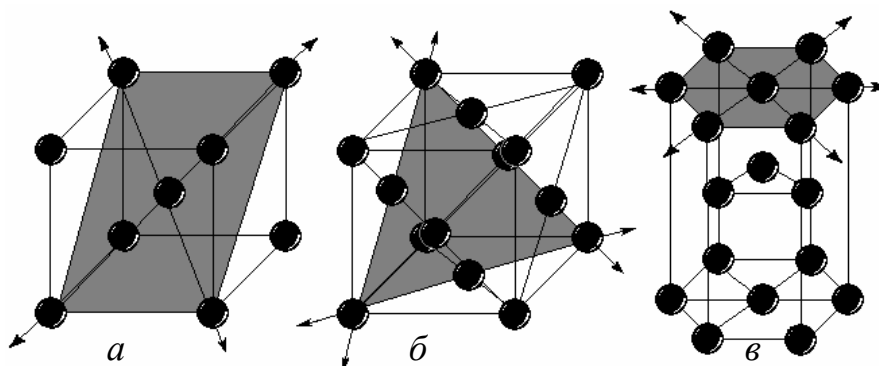


Рис. 2.27. Плоскости (заштрихованы) и направления (показаны стрелками) наилегчайшего сдвига в решетках: ОЦК (а), ГЦК (б), ГПУ (в)

В заключение надо отметить, что скольжение дислокаций не связано с диффузией: нет переноса массы. Оно происходит даже при отрицательных температурах.

### **Разрушение**

**Разрушение** – это разделение монолитного металла на части.

Разрушение состоит из двух элементарных процессов: 1) зарождение трещины и 2) ее распространение или рост.

Механизм зарождения трещины: скопление движущихся дислокаций перед препятствием.

Препятствиями для движения дислокаций являются:

1) границы зерен (рис. 2.28, а). Дислокации движутся в определенных атомных плоскостях и не могут продолжать скольжение сквозь границу, так как в соседнем зерне атомные плоскости ориентированы по-другому;

2) пересечение дислокаций, движущихся в разных плоскостях скольжения (рис. 2.28, б).

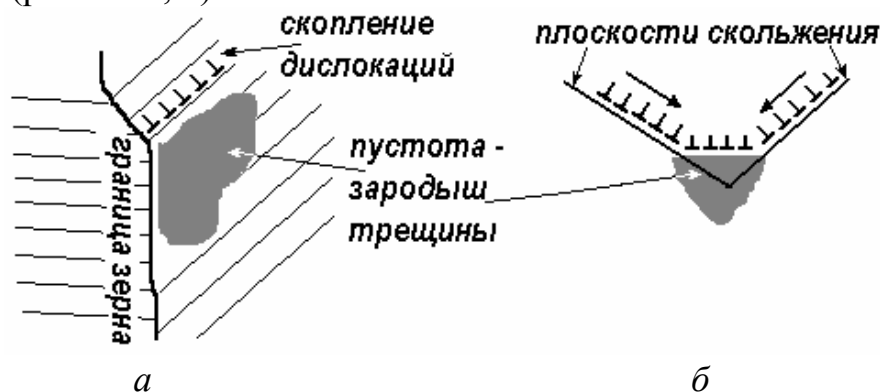


Рис. 2.28. Зарождение трещин

Около сотни дислокаций, скопившихся перед препятствием, создают трещину опасного размера. Напряжение в зоне дислокаций у границы зерна на 3 порядка больше среднего напряжения в данном сечении.

Распространение трещины может идти:

1) за счет внешних сил, подвода энергии извне. Если убрать внешнюю силу, то разрушение приостанавливается. Это – *вязкое разрушение*;

2) за счет внутренних напряжений, без подвода энергии извне. Это быстрое, неостановимое разрушение называется *хрупким*. Осуществляется путем отрыва одного слоя атомов от другого, напряжение у вершины трещины превышает предел прочности металла.

Вид излома, полученного в результате вязкого и хрупкого разрушения, показан на рис. 2.29, а, б.

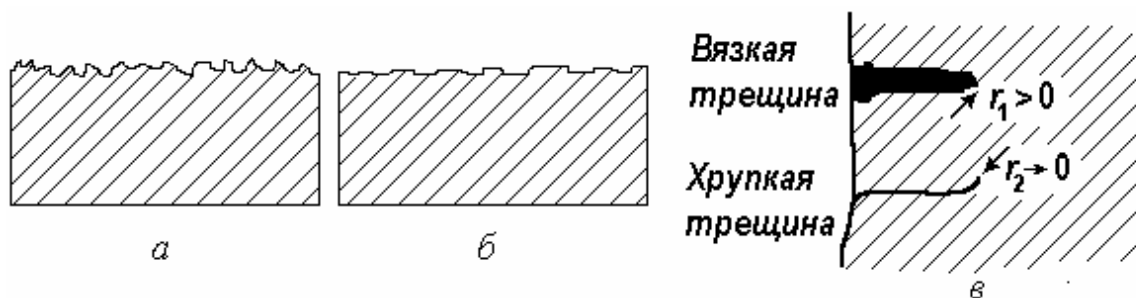


Рис. 2.29. Вид излома при вязком (а) и хрупком (б) разрушении; зародыши вязкой и хрупкой трещины (в)

Хрупкому разрушению предшествует малая пластическая деформация, вязкому – значительная.

Зародыши вязкой и хрупкой трещины тоже отличаются: зародыш хрупкой трещины острый, имеет очень маленький радиус при вершине; зародыш вязкой трещины – тупой, с большим радиусом (рис. 2.29, в).

Расчеты Гриффитса показали, что острая трещина длиной в 1 мкм может в 100 раз снизить предел прочности материала.

## Лекция 5

### Механические свойства металлов

*Механические свойства* определяют поведение металла под нагрузкой. Характеристики механических свойств получают при *механических испытаниях*. Для этого воздействуют на образец из данного материала какой-то силой и замеряют реакцию материала.

Под действием различных внешних сил металл деформируется и разрушается. Но величиной приложенной нагрузки нельзя охарактеризовать условия нагружения. Важно знать, на какую площадь поперечного сечения эта нагрузка действует.

За характеристику нагружения принимают **напряжение** – отношение силы к площади сечения, на которую она действует:

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

Напряжение, действующее на любую произвольно взятую площадку, можно разложить на нормальную составляющую  $\sigma$ , перпендикулярную площадке, и касательную  $\tau$  (см. рис. 2.30, а).

При одинаковой нагрузке  $P$  деформация стержней (см. рис. 2.30, б) будет разной: второй удлинится больше, так как площадь его поперечного сечения меньше.

$$\sigma_1 = \frac{P}{F_1}; \quad \sigma_2 = \frac{P}{F_2}; \quad \sigma_1 < \sigma_2, \quad \text{так как } F_1 > F_2.$$

Напряжение во втором стержне будет больше, поэтому он получит большую деформацию.

Напряжение, которое выдерживает металл, является его основной механической характеристикой, не зависящей от размеров изделия.

**Прочность**

**Прочность** – это способность металла сопротивляться деформации и разрушению под действием внешних и внутренних напряжений.

Государственные стандарты предусматривают получение характеристик прочности при испытаниях на растяжение, сжатие, изгиб, кручение. Все это – *статические испытания*, с постепенным, плавным возрастанием нагрузки.

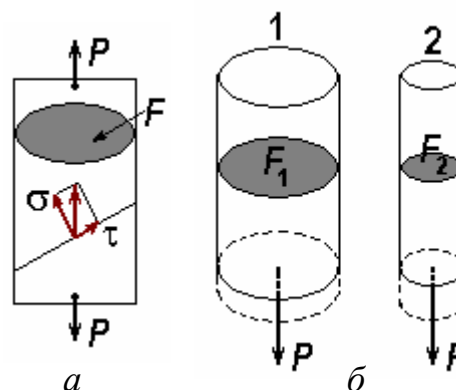


Рис. 2.30. Нормальное и касательное напряжение (а); деформация стержней при одинаковой нагрузке (б)

Наиболее информативно испытание на растяжение на разрывной машине; его и проводят в большинстве случаев для получения стандартных характеристик прочности (рис. 2.31, а).

Разрывная машина снабжена устройством для записи так называемой *диаграммы растяжения* – графика зависимости между приложенной нагрузкой  $P$  и удлинением образца  $\Delta l$  (рис. 2.31, б). Современные

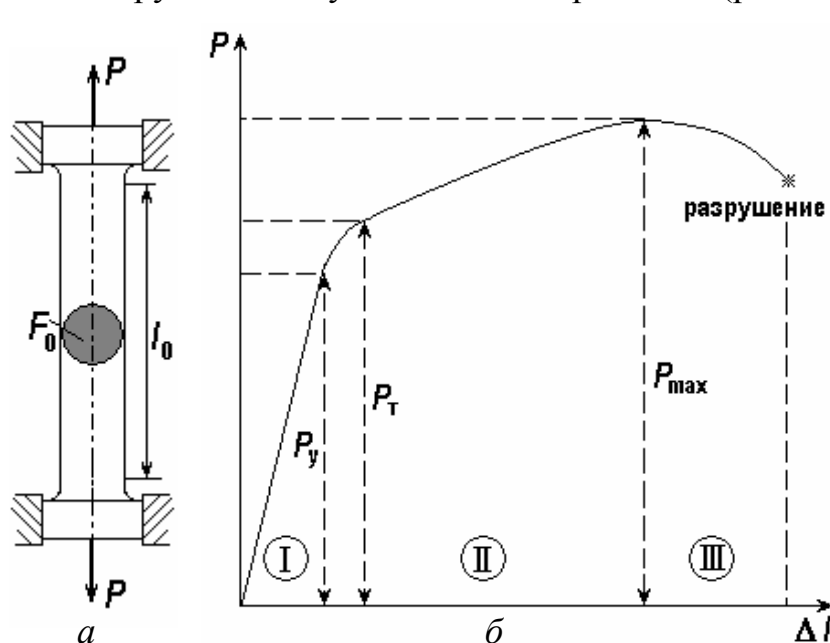


Рис. 2.31. Образец для испытаний на растяжение и схема испытания на разрывной машине (а); диаграмма растяжения пластичного металла (б)

машины имеют выход на компьютер, который не только записывает диаграмму, но и рассчитывает характеристики прочности.

При росте нагрузки  $P$  длина образца  $l$  изменяется нелинейно.

На кривой растяжения можно выделить три участка: I – область упругой деформации, II – область пластиче-



ской деформации, III – область развития трещин. Величина упругой деформации в металлах невелика: менее 1 %. Пластическая деформация у чистых металлов может достигать десятков процентов. Именно в этой области идет активное скольжение дислокаций. При превышении нагрузки  $P_{max}$  на образце возникает местное сужение – *шейка*, и деформация становится сосредоточенной. Дальнейшее развитие деформации в шейке приводит к зарождению трещин и разрушению образца.

Из этого испытания можно получить следующие характеристики прочности:

**предел упругости**  $\sigma_y = \frac{P_y}{F_0}$  [МПа] – это наибольшее напряжение,

после которого образец возвращается к прежней форме и размерам;

**предел текучести**  $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$  [МПа] – это напряжение пластического

течения металла без увеличения нагрузки;

**предел прочности**  $\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}$  [МПа] – это наибольшее напряже-

ние, которое металл выдерживает, не разрушаясь.

Истинный, или физический предел текучести  $\sigma_T$  определить трудно: не у всех металлов образуется «площадка текучести». Поэтому чаще всего определяют **условный предел текучести**  $\sigma_{0.2}$ , который вызывает остаточную деформацию 0,2 %:  $\sigma_T \approx \sigma_{0.2}$ .

Прочностные расчеты чаще ведут по пределу текучести, так как значительная пластическая деформация большинства деталей и конструкций недопустима. Но и предел прочности знать необходимо, так как он показывает, при каком напряжении начнется разрушение.

#### **Пластичность**

**Пластичность** – это способность металла деформироваться без разрушения.

Характеристики пластичности определяют из того же испытания на растяжение. Это

$$\text{относительное удлинение } \delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [\%]}$$

и

$$\text{относительное сужение } \psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100 \text{ [\%]},$$

где  $l_0$  и  $l_k$ , мм – длина образца до и после испытания;

$F_0$  и  $F_K$ , мм<sup>2</sup> – начальная и конечная площадь поперечного сечения образца (рис. 2.31, а).

Относительное удлинение и относительное сужение являются одновременно и критериями надежности: материал, имеющий бóльшие значения  $\delta$  и  $\psi$ , более надежен.

### **Твердость**

**Твердость** – это способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого тела.

Методы измерения, приборы, обозначение, единицы измерения твердости описаны в методических указаниях к лабораторной работе «Определение твердости металлов и сплавов». Изучить самостоятельно!

### **Вязкость**

**Вязкость** – это способность материала сопротивляться разрушению при ударных, динамических нагрузках.

Характеристика вязкости определяется при испытании на ударный изгиб. Это, в отличие от всех предыдущих, динамическое испытание, при котором нагрузка прилагается к образцу с очень большой скоростью, за тысячные доли секунды.

Испытание проводится на маятниковом копре (рис. 2.32).

Тяжелый маятник, поднятый на определенный угол, отпускают. На пути движения маятника находится образец. Удар ножа маятника разрушает его. Произведенная при разрушении работа определяется как разность между потенциальной энергией маятника до и после испытания.

**Ударная вязкость** – это работа разрушения образца, отнесенная к площади поперечного сечения:

$$K_C = \frac{A_p}{F} \text{ [Дж/м}^2\text{]}, \text{ где}$$

$A_p$  – работа разрушения,

$F$  – площадь поперечного сечения образца.

Образец должен иметь надрез – концентратор напряжения. Обозначение ударной вязкости зависит от вида надреза (см. рис. 2.33).

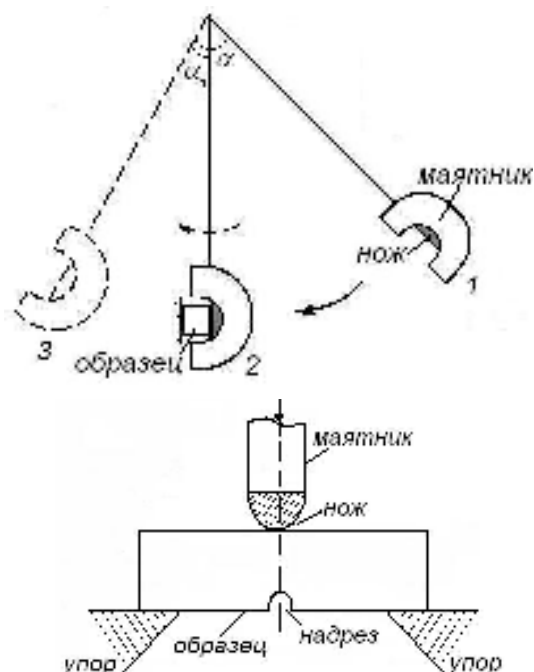


Рис. 2.32. Схема испытания на маятниковом копре

Для одного и того же материала  $KCU > KCV > KCT$ , т. е. чем острее надрез, тем легче разрушается материал.

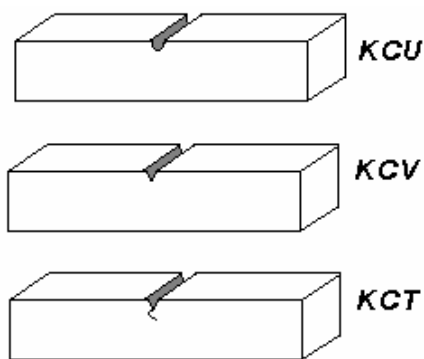


Рис. 2.33. Образцы для испытаний на ударную вязкость

деляют ударную вязкость при радиусе концентратора  $r$ , стремящемся к нулю (рис. 2.34). Это и будет работа распространения трещины  $a_p$ , позволяющая оценить надежность (зародыши трещин в материале есть почти всегда, вопрос в том, будут ли они расти).

#### Некоторые эксплуатационные свойства

В условиях эксплуатации свойства материалов могут не соответствовать стандартным, приведенным в справочниках значениям. В различных агрессивных средах, при действии высоких или низких температур материалы проявляют значительно меньшую прочность и долговечность, чем при нормальных условиях.

#### 1) Хладноломкость

При низких температурах (от 0 до  $-269$  °С, температуры жидкого гелия) увеличивается склонность металла к хрупкому разрушению. При этом резко снижается ударная вязкость ( $KCU$ ,  $KCT$ ) и изменяется строение излома – от волокнистого, матового до кристаллического, блестящего.

Свойство металла хрупко разрушаться, терять вязкость при понижении температуры называется **хладноломкостью**.

Ударная вязкость тоже является критерием надежности материала, гарантией, что он не будет разрушаться хрупко, внезапно.

Строго говоря, ударная вязкость является комплексной характеристикой, включающей удельную работу зарождения трещины  $a_3$  и удельную работу распространения трещины  $a_p$ . Для более достоверной оценки надежности материала методом экстраполяции определяют

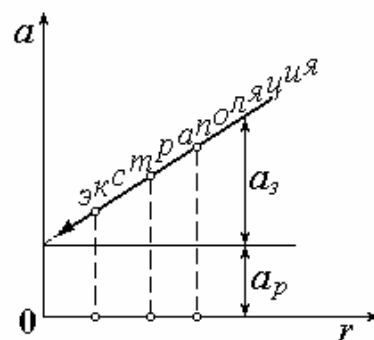


Рис. 2.34. Определение работы зарождения трещины

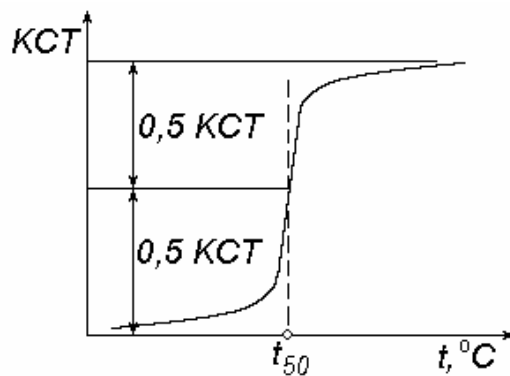


Рис. 2.35. Определение порога хладноломкости

За характеристику хладноломкости принимают **температурный порог хладноломкости**  $t_{50}$ . Это температура, при которой величина ударной вязкости уменьшается вдвое (рис. 2.35). При этом излом имеет строение наполовину вязкое, наполовину хрупкое.

## 2) Выносливость

Многие детали – валы, оси, шестерни – испытывают переменные по величине и направлению нагрузки. Под действием многократно повторяющихся знакопеременных нагрузок в металле накапливаются повреждения, дефекты. Это явление называется *усталостью*.

В таких условиях работы напряжения, меньшие  $\sigma_B$  и даже  $\sigma_T$ , могут вызвать зарождение и рост *усталостной трещины*. Обычно она возникает на поверхности детали и затем подрастает с каждым циклом нагружения. Это постепенно приведет к разрушению.

**Выносливость** – это способность металла противостоять усталости, сопротивляться разрушению при знакопеременных нагрузках.

Характеристики выносливости определяются из испытаний на специальных машинах циклического действия. Нагрузка, действующая на каждую точку поперечного сечения образца, непрерывно меняется по величине и направлению (рис. 2.36).

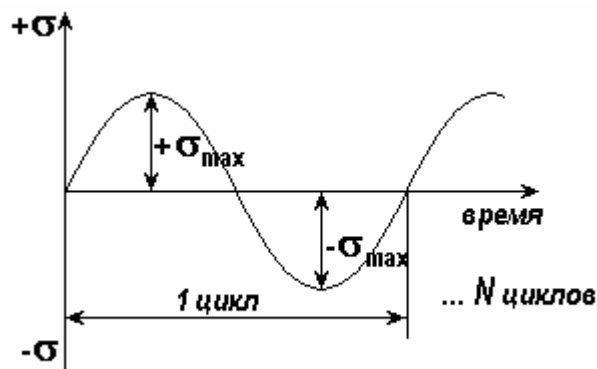


Рис. 2.36. Схема циклического нагружения при усталостных испытаниях

лов и сплавов  $N = 10^8$ .

**Пределом выносливости**, или *пределом усталости*  $\sigma_{-1}$  называется наибольшее напряжение, которое не вызывает разрушения образца после заданного числа циклов нагружения.

При испытании сталей стандартное число циклов нагружения  $N = 10^7$ , при испытании цветных метал-

## Лекция 6

### Структура и свойства деформированных металлов

#### Дислокационные процессы при деформировании

При пластической деформации в каждой плоскости скольжения перемещается множество дислокаций. Выходя на поверхность кристалла, они образуют ступеньки. Видимая под микроскопом ступенька, образо-

ванная множеством дислокаций, называется *линией скольжения*. Группа близко расположенных линий скольжения образует *полосу скольжения*. Ее можно увидеть уже невооруженным глазом. Существование линий и полос скольжения является косвенным доказательством наличия в металле дислокаций.

Вначале скольжение идет легко, но с ростом степени деформации дислокации, которые движутся в пересекающихся плоскостях, начинают мешать друг другу. Возникает сложная дислокационная структура («лес дислокаций»). Казалось бы, при выходе дислокации на поверхность кристалла она исчезает, поэтому плотность дислокаций должна уменьшаться, но на самом деле она растет! Это происходит потому, что в процессе скольжения все время появляются новые дислокации. Их плотность повышается с  $10^6 \text{ см}^{-2}$  до  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Появление новых дислокаций возможно разными способами, но важнейшим из них является *источник Франка-Рида* (рис. 2.37).

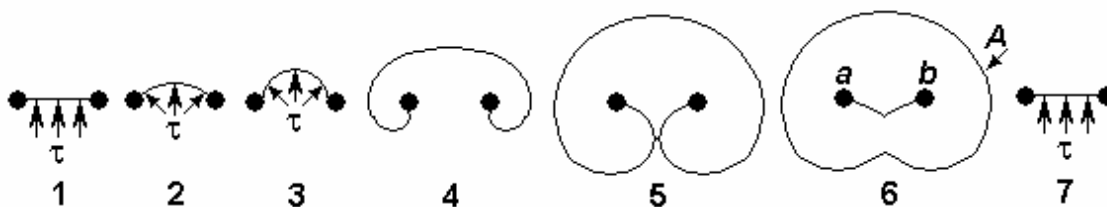


Рис. 2.37. Схема действия источника Франка-Рида

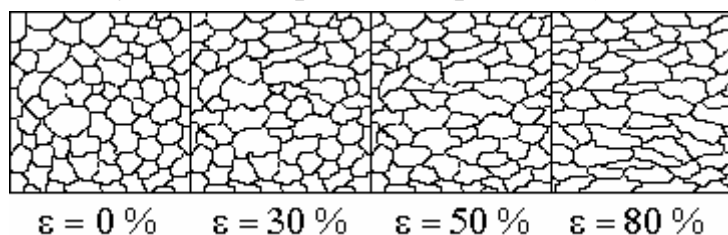
Закрепленный какими-то препятствиями участок дислокации (1) выгибается под действием касательных напряжений  $\tau$  (2), пока не примет форму полуокружности (3). Дальше – самопроизвольное распространение в виде двух спиралей (4, 5). При их встрече возникает расширяющаяся петля  $A$  и отрезок дислокации  $ab$  (6). Отрезок занимает исходное положение и может повторять цикл (7). От одного источника Франка-Рида распространяются сотни новых дислокаций.

#### **Наклеп**

Увеличение плотности дислокаций затрудняет дальнейшее скольжение. Для того чтобы продолжать деформировать металл, нужны большие напряжения. Металл упрочняется, его сопротивление деформированию растет. Это значит, что повышаются его прочностные характеристики ( $HB$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ), а пластичность и вязкость ( $\delta$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ) – снижаются. Это явление называется **деформационным упрочнением** или **наклепом**.

Чем больше степень деформации, тем заметнее изменения в микроструктуре: все больше зерен приобретают неравноосную форму. При

степени деформации 70-80 % все зерна вытягиваются в направлении действующих напряжений (рис. 2.38).



$\varepsilon = 0 \%$      $\varepsilon = 30 \%$      $\varepsilon = 50 \%$      $\varepsilon = 80 \%$

Рис. 2.38. Изменение микроструктуры металла при наклепе ( $\varepsilon$  – степень деформации)

Из графика зависимости механических свойств от степени деформации (рис. 2.39) видно, что металл сильно упрочняется в начале деформирования, затем все медленнее.  $\sigma_T$  растет быстрее  $\sigma_B$ .

У сильно наклепанных металлов предел текучести и предел прочности равны, пластичность же при этом близка к нулю. Это – предельное деформированное состояние металла, предшествующее разрушению. Плотность дислокаций составляет  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ , большую их плотность создать невозможно, так как неизбежно возникают зародыши трещин.

В результате наклепа предел прочности и твердость могут увеличиться в 1,5-3 раза, предел текучести – в 3-7 раз. Металлы с ГЦК решеткой упрочняются сильнее, чем с ОЦК.

Физические свойства при наклепе тоже изменяются, в частности, растет удельное электросопротивление, снижается магнитная проницаемость.

Явление наклепа широко используется в технике для повышения прочности деталей при холодной обработке давлением: обкатка шариками и роликами поверхности готовых деталей, дробеструйный наклеп рессорных листов. Вязкие металлы (латуни, алюминиевые сплавы) лучше обрабатываются резанием после наклепа.

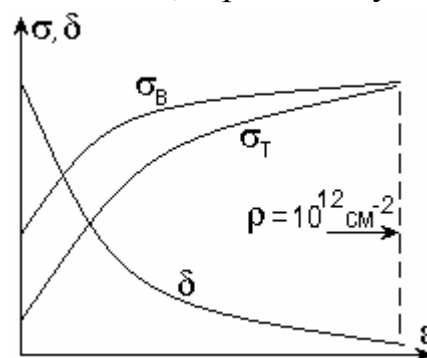


Рис. 2.39. Изменение механических свойств металла при наклепе

### Изменение структуры и свойств деформированного металла при нагреве

Структура, созданная пластической деформацией, обладает повышенным запасом энергии, так как 5-10 % энергии, затраченной на деформирование, переходит во внутреннюю энергию кристалла. Это энергия дефектов кристаллической решетки и упругих искажений.



При комнатной температуре у большинства металлов структура наклепа устойчива. Но при нагреве создаются условия для перераспределения дислокаций и уменьшения их количества, так как атомы получают дополнительную энергию и легче смещаются, занимая равновесные положения.

При нагреве наклепанного металла изменения структуры протекают в две стадии. Первая называется возврат и происходит при температурах ниже  $0,3T_{пл}$ ; вторая идет при температурах выше  $0,3T_{пл}$  и носит название рекристаллизация.

#### **Возврат**

**Возврат** – это изменения тонкой структуры и свойств деформированного металла при нагреве. Микроструктура (размер и форма зерен) остается прежней.

На этой первой стадии изменений возможны два процесса: отдых и полигонизация.

*Отдых* происходит у всех металлов, после любой по величине деформации. При этом уменьшается число вакансий и плотность дислокаций. Твердость и прочность снижаются на 10-15 %, настолько же увеличивается пластичность.

*Полигонизация* идет не во всех металлах, при небольшой степени предшествовавшей деформации. В каждом зерне дислокации образуют «стенки» – малоугловые границы. Зерно делится на *субзерна*, или полигоны, почти свободные от дислокаций (рис. 2.40).

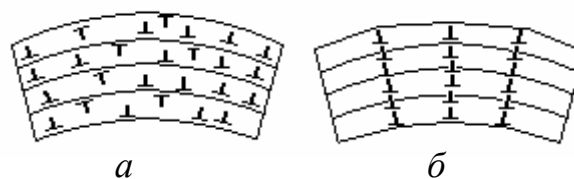


Рис. 2.40. Расположение дислокаций в монокристалле: *а*) до полигонизации; *б*) после полигонизации

Полигонизованная структура устойчива до температуры плавления. Этот процесс идет, например, в железе, алюминии, молибдене.

#### **Рекристаллизация**

**Рекристаллизация** – это зарождение и рост новых зерен, с меньшим количеством дефектов, среди деформированных. Движущей силой процесса является стремление системы к минимальной свободной энергии: так как в новых зернах мало дефектов, их внутренняя энергия меньше.

Температура, при которой появляются и растут новые, более совершенные зерна, называется *температурой рекристаллизации*. Она составляет некоторую долю от температуры плавления и определяется по формуле Бочвара:

$$T_p = a \cdot T_{пл}$$

Коэффициент  $a$  зависит от количества примесей в металле:

для технически чистых металлов  $a = 0,4$ ;

для химически чистых металлов  $a = 0,1-0,2$ ;

для сплавов  $a = 0,6-0,7$ .

Технически чистая медь имеет температуру рекристаллизации  $270\text{ }^\circ\text{C}$ , железо –  $450\text{ }^\circ\text{C}$ , алюминий –  $100\text{ }^\circ\text{C}$ .

Изменение микроструктуры деформированного металла при нагреве показано на рис. 2.41; изменение механических свойств – на рис. 2.42.

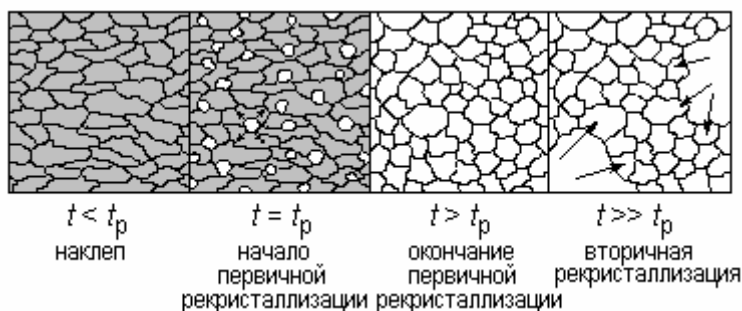


Рис. 2.41. Изменение микроструктуры наклепанного металла при нагреве

Когда все деформированные зерна заменяются новыми, равноосными, это значит, что первичная рекристаллизация завершилась. Новые, недеформированные зерна имеют очень низкую плотность дислокаций ( $10^5-10^6\text{ см}^{-2}$ ) по

сравнению с деформированной структурой. Некоторое время после окончания первичной рекристаллизации новые зерна одновременно подрастают, их размеры выравниваются. Этот процесс называется *собирательной рекристаллизацией*; она влияет на структуру и свойства металла благоприятно. Но затем может начаться *вторичная рекристаллизация*: рост одних зерен за счет других. При этом суммарная поверхность зерен уменьшается, т. е. движущей силой процесса является стремление к минимальной поверхностной энергии. Получаемая разнотернистая структура приводит к одновременному снижению прочности и пластичности. Это – нежелательный процесс.

Рекристаллизация полностью снимает наклеп, металл приобретает равновесную структуру с мини-

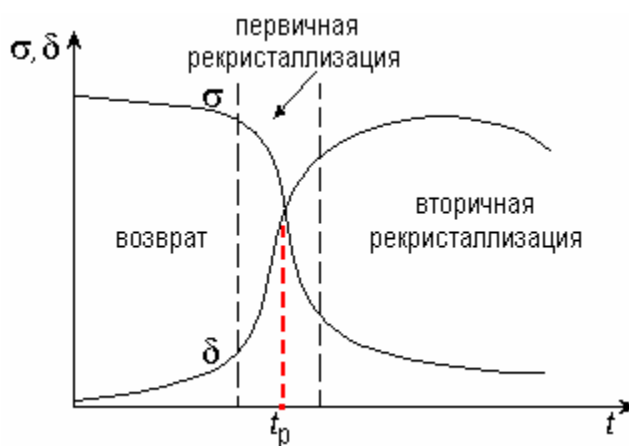


Рис. 2.42. Изменение механических свойств металла при рекристаллизации

мальным числом дефектов кристаллической решетки. Свойства металла после рекристаллизации близки к свойствам отожженного, не наклепанного металла.

#### **Горячая и холодная пластическая деформация**

Деформирование металла при температурах ниже температуры рекристаллизации называется **холодной пластической деформацией**. Металл при холодной деформации наклепывается и сохраняет высокие прочность и твердость. Примеры применения холодной пластической деформации: волочение проволоки, сопровождающееся упрочнением, накатывание резьбы, холодная листовая штамповка.

Деформирование металлов при температурах выше температуры рекристаллизации называется **горячей пластической деформацией**. Металл после горячей деформации остается мягким, пластичным, годным к дальнейшей обработке давлением или резанием. Большая часть металлов и сплавов подвергается горячей обработке давлением еще в прокатных и кузнечно-прессовых цехах металлургических предприятий, затем на машиностроительных заводах.

### **Способы упрочнения металлов и сплавов**

Значительная пластическая деформация деталей машин и конструкций при эксплуатации недопустима. Поэтому повышение прочности металлов и сплавов означает, прежде всего, повышение предела текучести  $\sigma_T$ .

Область II на диаграмме растяжения является областью борьбы за прочность (рис. 2.43). Здесь происходит пластическая деформация, т. е. движение дислокаций:

Чтобы затруднить перемещение дислокаций, нужно создать препятствия для их движения – или избавиться от дислокаций совсем.

#### **Упрочнение за счет создания бездефектных кристаллов**

Бездефектные кристаллы удается вырастить в виде тонких нитей, или «усов» (их длина несколько мм, толщина до 20 мкм). Их прочность действительно близка к теоретически рассчитанной.

Кристаллы крупных размеров вырастить без дефектов не удается.

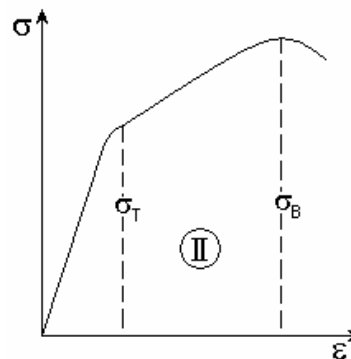


Рис. 2.43. Область пластической деформации

Не совсем ясно, играет в прочности «усов» главную роль отсутствие дефектов или поверхностное натяжение. Изделия, содержащие такие кристаллы, высокой прочностью не обладают.

Можно сказать, что пока этот путь создания высокопрочных материалов не реализован.

### Упрочнение за счет торможения движущихся дислокаций

#### 1) Упрочнение самими дислокациями

В ходе пластической деформации создается такая высокая плотность дислокаций, что они сами начинают взаимно тормозить скольжение друг друга. Возникает так называемый «лес дислокаций».

При повторном испытании уже продеформированного образца предел текучести оказывается больше:  $\sigma_{T2} > \sigma_{T1}$  (рис. 2.44).

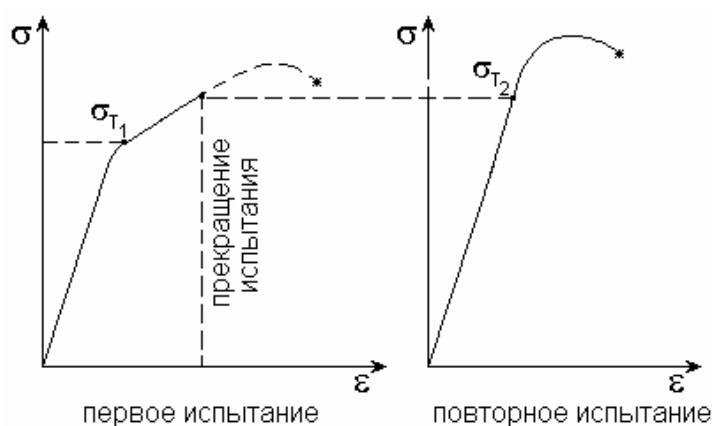


Рис. 2.44. Упрочнение металла при повторном испытании на растяжение

обработка поверхностным пластическим деформированием (обкатка роликами, дорнование отверстий).

#### 2) Упрочнение границами зерен

В мелкозернистом металле площадь поверхности зерен в единице объема больше, чем в крупнозернистом (рис. 2.45). Мелкозернистый металл прочнее, так как на пути скольжения дислокаций встречается больше барьеров – границ зерен:  $\sigma_{T2} > \sigma_{T1}$ .

Увеличение предела текучести зависит от размера зерна следующим образом:

$$\Delta\sigma_T \sim \frac{1}{\sqrt{d}},$$

где  $d$  – диаметр зерна.

Примеры: модифицирование сплавов при выплавке и литье, рекристаллизация сильно наклепанного металла, измельчение зерна при фазовых превращениях.

#### 3) Упрочнение растворенными атомами примесей

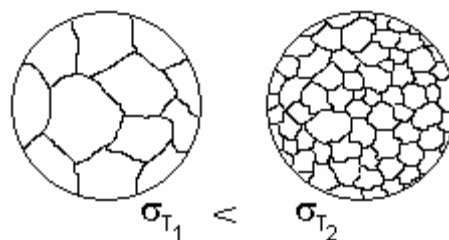


Рис. 2.45. Упрочнение границами зерен

Искажения решетки, вызванные атомами примесей, мешают дислокациям свободно скользить (рис. 2.46).

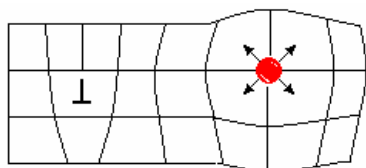


Рис. 2.46. Упрочнение твердым раствором

Упрочнение зависит от количества примеси:

$$\Delta\sigma_T \sim C,$$

где  $C$  – концентрация растворенного компонента.

Примерами применения такого механизма упрочнения являются практически все сплавы в современной технике. Все они являются твердыми растворами. При закалке сплавов создают пересыщенные твердые растворы, добиваясь значительного упрочнения.

#### 4) Упрочнение дисперсными частицами второй фазы

Дисперсные, т. е. очень мелкие, частицы имеют размеры порядка 100 нм. Более крупные частицы не являются таким эффективным препятствием для дислокаций.

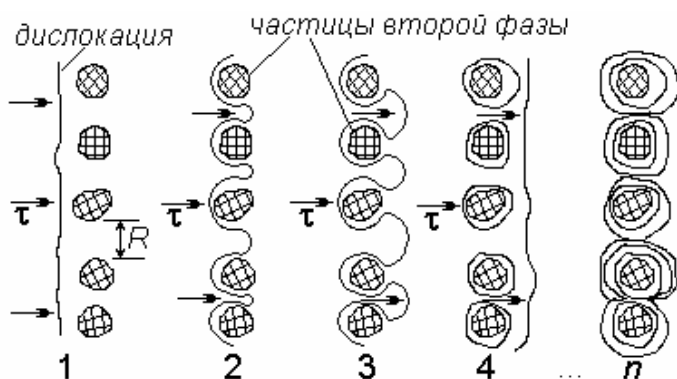


Рис. 2.47. Упрочнение дисперсными частицами второй фазы

Огибая мелкие частицы (рис. 2.47, 2), дислокации замыкаются вокруг них (3), при этом возникают дислокационные петли (4), или кольца. Прохождение множества дислокаций приводит к образованию так называемых колец Орована ( $n$ ). Дальнейшее скольжение дислокаций на этом участке затруднено.

Если частицы второй фазы не округлые, а игольчатые, то дислокации «наматываются» на них, как нитки на веретено.

Упрочнение зависит от расстояния между частицами:

$$\Delta\sigma_T \sim \frac{1}{R},$$

где  $R$  – расстояние между частицами.

По такому механизму упрочняются очень многие сплавы: дуралюмины, бронзы, сплавы титана, некоторые стали.

В большинстве современных высокопрочных материалов используются несколько способов упрочнения одновременно: твердый раствор и мелкие частицы химического соединения, твердый раствор с высокой плотностью дислокаций и т. п.

## Строение сплавов

Чистые металлы применяются сравнительно редко. Основой современной техники являются сплавы, которые имеют гораздо более широкий спектр механических и эксплуатационных свойств. **Сплавы** – это металлические материалы, состоящие из двух и более элементов, в том числе и неметаллов. Входящие в состав сплава вещества принято называть *компонентами* сплава, причем компоненты могут быть простыми (Fe, Cu) и сложными ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{CuAl}_2$ ). При взаимодействии компоненты сплава образуют различные фазы. *Фазой* называется однородная по составу, строению и свойствам часть сплава, отделенная четко выраженной границей от других его частей.

Термин «сплав» говорит о том, что первоначально эти материалы действительно получали только *сплавлением*, то есть перемешиванием в жидком, расплавленном состоянии с последующей кристаллизацией. Но сегодня существует много других способов:

- порошковая металлургия (прессование порошков компонентов, затем спекание их при высокой температуре),
- диффузионное насыщение поверхности одного компонента другим,
- электролиз расплавов,
- кристаллизация из паров в вакууме.

Тем не менее, термин остался. Компоненты, входящие в состав сплава, могут взаимодействовать по-разному. От вида взаимодействия зависят строение и свойства сплава.

### *Взаимодействие компонентов в сплавах*

В расплавленном состоянии большинство металлов растворяются друг в друге без ограничений, образуя жидкий раствор. При кристаллизации они могут образовать подобную структуру – твердый раствор одного компонента в решетке другого. Иногда компоненты вступают в химическое взаимодействие и образуют химическое соединение. Но бывает и так, что между компонентами в твердом состоянии нет никакого взаимодействия, и тогда они кристаллизуются отдельно, каждый образует свои собственные кристаллы, а сплав представляет собой механическую смесь кристаллов исходных компонентов.

Рассмотрим все эти случаи подробнее.

1) **Твердые растворы** возникают, если атомы одного компонента могут встраиваться в кристаллическую решетку другого компонента.



Тот компонент, которого в сплаве больше и решетка которого сохраняется, называется *растворителем*. Компонент, доля которого меньше, занимает какие-то места в решетке растворителя и называется *растворенным веществом*.

Твердые растворы могут быть образованы двумя способами:

а) *Твердые растворы замещения* возникают, если атомы одного компонента замещают атомы другого компонента в его решетке (рис. 2.48).

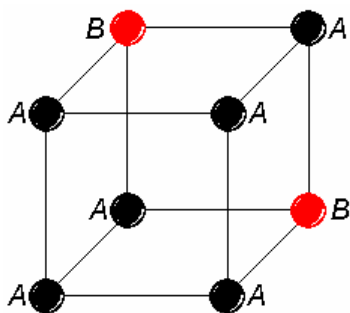


Рис. 2.48. Твердый раствор замещения

Здесь компонент *A* является растворителем, а компонент *B* – растворенным веществом.

Таким образом обычно растворяются друг в друге металлы, если их атомные радиусы близки (разница в размерах атомов не должна превышать 15%). У металлов возможна даже *неограниченная растворимость*, когда атомы компонента *B* замещают атомы компонента *A* в любой пропорции, от 0 до 100%. Для этого, кроме близкого размера атомных радиусов, они должны иметь один тип решетки и одинаковое строение валентной электронной оболочки. Такими парами являются, например, Cu и Ni, Fe<sub>α</sub> и Cr.

Гораздо чаще встречается *ограниченная растворимость*, когда замещение атомов растворителя атомами растворенного компонента возможно до какого-то определенного содержания, называемого *пределом растворимости*. Так, например, растворяются цинк или олово в меди. Предел растворимости цинка в меди составляет 39%.

б) *Твердые растворы внедрения* возникают, если атомы одного компонента (*B*) находятся в порах кристаллической решетки другого компонента (*A*).

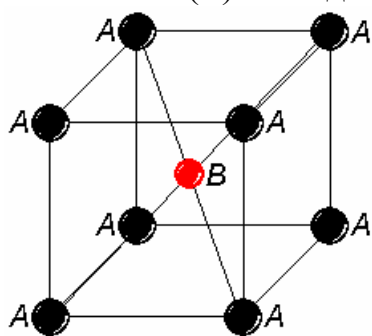


Рис. 2.49. Твердый раствор внедрения

Так неметаллы с маленькими размерами атомов растворяются в металлах (рис. 2.49). Твердые растворы внедрения всегда ограниченные, так как количество пор в решетке ограничено и не любого размера поры годятся для размещения атомов растворенного вещества. Примеры твердых растворов внедрения: углерод в железе, кремний в алюминии.

Под микроскопом твердые растворы выглядят так же, как и чистые металлы: видны только границы зерен

(рис. 2.50). Твердый раствор – это одна фаза, поэтому рентгеноструктурный анализ покажет только решетку металла-растворителя, но ее параметры будут отличаться в большую или меньшую сторону из-за искажений, вызванных растворенным веществом.

Свойства сплавов, представляющих собой твердые растворы, могут очень сильно отличаться от свойств исходных компонентов. Именно

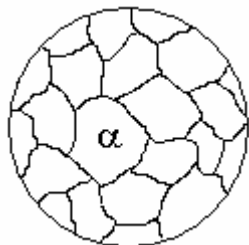


Рис. 2.50. Микроструктура твердого раствора

твердые растворы являются основой большинства современных промышленных сплавов, потому что они дают наибольшие возможности для получения необходимых эксплуатационных свойств.

Обозначают твердые растворы греческими буквами:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , ... или  $A(B)$ , где  $A$  – растворитель,  $B$  – растворенный компонент.

2) **Механическая смесь** кристаллов возникает, если компоненты не могут растворяться друг в друге и не вступают в химическую реакцию.

Такие сплавы представляют собой смесь сросшихся между собой кристаллов исходных компонентов. Под микроскопом в сплаве, представляющем собой механическую смесь кристаллов, видны зерна двух разных видов: зерна  $A$  и зерна  $B$  (рис. 2.51). Это двухфазная структура, поэтому рентгеноструктурный анализ сплава показывает два вида решеток: металла  $A$  и металла  $B$ .

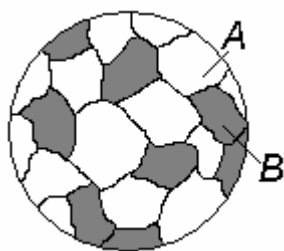


Рис. 2.51. Микроструктура механической смеси кристаллов

Различие между сплавом-твердым раствором и сплавом-механической смесью легко представить на таком простом примере. Строится стена из кирпичей разного цвета: красных и белых, например. В одном случае кирпичи располагаются вперемешку, выбирает их каменщик, не глядя. В другом случае часть стены сложена только из красных кирпичей, а вторая ее половина – только из белых. В обоих случаях получится стена одинакового размера, но первая похожа на твердый раствор, где перемешивание идет на уровне атомов, а вторая – на механическую смесь

кристаллов разных веществ.

Свойства сплава линейно зависят от количества кристаллов того и другого компонента; значения механических и физических характеристик являются промежуточными между свойствами чистых исходных веществ. Поэтому возможности выбора сплава с нужными свойствами ограничены.

Обозначается механическая смесь как сумма двух компонентов:  $A + B$ .

3) **Химическое соединение** возникает, если компоненты могут вступать в химическую реакцию друг с другом и образовывать устойчивое сложное вещество со строго определенным соотношением между атомами одного и другого компонента.

Химическое соединение можно выразить простой формулой  $A_mB_n$ , где  $m$  и  $n$  – натуральные числа.

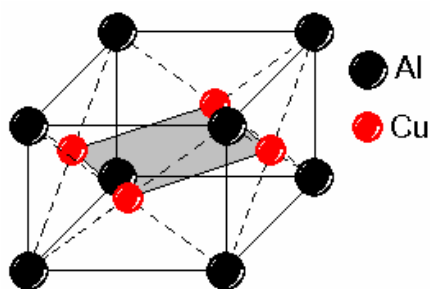


Рис. 2.52. Химическое соединение алюминия с медью

Химические соединения возникают между компонентами с разными кристаллическими решетками или разным строением валентной электронной оболочки.

Пример: медь и алюминий имеют кристаллическую решетку одного типа (ГЦК), но разное строение внешней электронной оболочки. Они образуют химическое соединение  $CuAl_2$  со своей кристаллической решеткой (рис. 2.52).

Такие соединения называются *интерметаллидами*. Их кристаллическая решетка, температура плавления, все физические, химические и механические свойства резко отличаются от свойств исходных компонентов. Как правило, интерметаллидные соединения имеют менее компактные, более сложные кристаллические решетки, чем металлы. Поэтому они тверже и прочнее исходных металлов, но менее пластичны.

Встречаются в сплавах и соединения металлов с неметаллами: карбиды  $Me_xC_y$ , нитриды  $Me_xN_y$  и т. п.

В сплавах химические соединения являются упрочняющими фазами, но состоящие только из химического соединения сплавы применяются редко.

Образовавшееся соединение тоже становится компонентом сплава, оно вступает во взаимодействие с исходными компонентами – простыми веществами.

Под микроскопом химические соединения обычно выглядят как мелкие частицы внутри кристаллов одного из компонентов или твердого раствора (рис. 2.53). Рентгеноструктурный анализ, конечно, покажет новый тип решетки: не исходных компонентов, а их соединения.

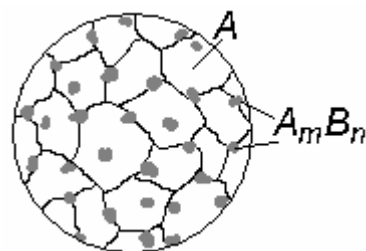


Рис. 2.53. Микроструктура сплава с химическим соединением

Итак, компоненты, образовавшие новый материал – сплав, – невооруженным глазом в нем неразличимы, но различные методы анализа позволяют их обнаружить и определить их количество (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Определение природы фаз в сплавах различными методами

Тип сплава	Что показывают методы исследования:		
	Металлографический анализ	Рентгеноструктурный анализ	Химический анализ
Твердые растворы	1 вид кристаллов: $A(B)$	1 решетка: $A$ , но параметр $\neq$ параметру $A$	2 элемента: $A$ и $B$
Механические смеси	2 вида кристаллов: $A$ и $B$	2 решетки: $A$ и $B$	2 элемента: $A$ и $B$
Химические соединения	1 вид кристаллов: $A_mB_n$	1 решетка: $A_mB_n$	2 элемента: $A$ и $B$

Механические испытания тоже покажут свойства, отличные от свойств исходных компонентов.

### Диаграммы состояния двойных сплавов

Из каждой двух произвольно взятых компонентов можно создать множество сплавов разного состава и свойств. Но перебирать варианты в поисках наилучшего сочетания для конкретной технической цели нерационально. Значит, нужно иметь информацию, позволяющую предварительно оценить возможности обработки сплава и получения нужных свойств. Такую информацию дают диаграммы состояния сплавов.

**Диаграмма состояния** – это графическое изображение фазового состояния сплава в зависимости от температуры и состава.

Диаграмма состояния строится в координатах «температура-состав» и показывает равновесные фазы, возникающие в сплавах при различных сочетаниях этих факторов.

Диаграммы состояния в очень лаконичной форме содержат огромную информацию о сплавах, их свойствах и поведении. Надо только уметь их читать.

#### **Построение диаграмм состояния**

Диаграммы состояния являются *равновесными*, т. е. строятся в условиях очень медленного охлаждения от температуры плавления до комнатной. Фазы, получаемые в таких условиях, соответствуют минимальным значениям свободной энергии.

Для построения диаграмм состояния используют, прежде всего, *метод термического анализа*: строят кривые охлаждения для сплавов с

разным содержанием исходных компонентов. Параллельно изучают состояние сплава, применяя микроанализ, рентгеноструктурный анализ, электронную микроскопию, магнитные методы, определение физических и механических характеристик.

Все изменения фазового состава сплава сопровождаются тепловыми эффектами – выделением или поглощением тепла. На кривой охлаждения эти эффекты отражаются перегибами или остановками. Одновременно изменяются физические и механические свойства сплава. Измеряя их, можно уточнить температуру фазового превращения, если тепловой эффект слабо выражен. Точки перегибов и остановок на кривой охлаждения называются *критическими точками*, или *точками фазовых превращений* данного сплава.

Получив множество кривых охлаждения, критические точки переносят на график в координатах «температура – состав», получая, таким образом, диаграмму состояния (рис. 2.54).

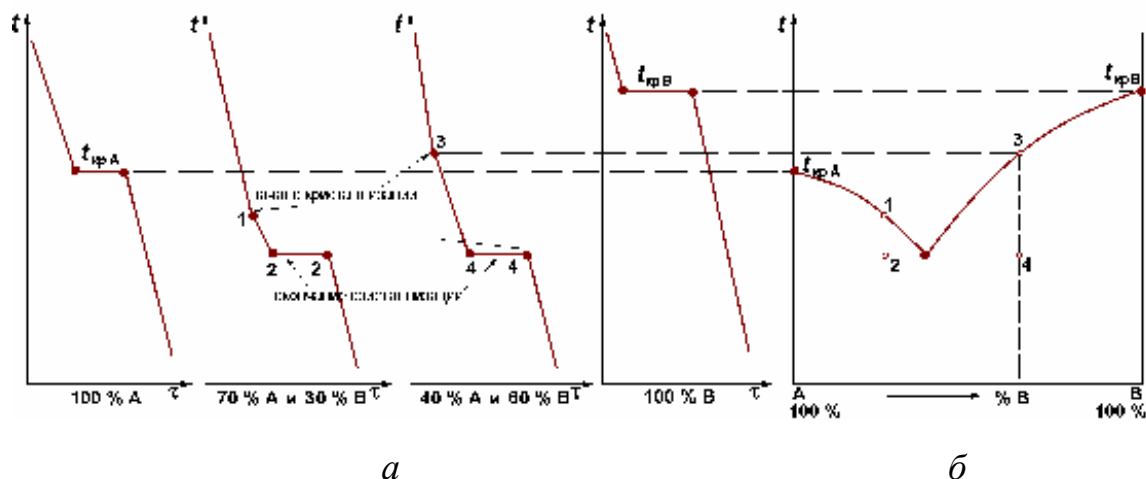


Рис. 2.54. Кривые охлаждения (а) получены экспериментально; диаграмма состояния (б) построена по экспериментальным данным

#### Диаграмма состояния сплавов с неограниченной взаимной растворимостью компонентов

Если компоненты сплава образуют неограниченные твердые растворы, то на диаграмме состояния имеются только две линии: линия начала кристаллизации и линия окончания кристаллизации (рис. 2.55). Каждая из них является совокупностью критических точек для всех сплавов данной системы.

Линию начала кристаллизации 1-2-3 называют линией *ликвидус* (от латинского слова *liqua* – жидкость). Выше этой линии все сплавы системы находятся в жидком состоянии.

Линию окончания кристаллизации 1-4-3 называют линией *solidus* (от латинского слова *solid* – твердое тело). Ниже этой линии все сплавы системы находятся в твердом состоянии.

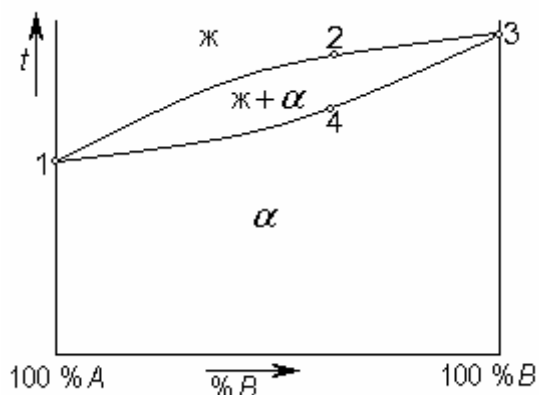


Рис. 2.55. Диаграмма состояния с неограниченной растворимостью

На диаграмме твердый раствор обозначают греческими буквами, например,  $\alpha$ .

В твердом состоянии сплавы с такой диаграммой не имеют фазовых превращений и поэтому не могут подвергаться упрочняющей термообработке.

Механические и физические свойства сплавов, имеющих такую диаграмму состояния, сильно отличаются от свойств исходных компонентов. В частности твердость, прочность, электросопротивление сплавов выше, чем у чистых металлов, а пластичность и магнитная проницаемость – ниже.

По законам физической химии, первые образующиеся из жидкости кристаллики богаче тугоплавким компонентом  $B$ , чем те, что кристаллизуются последними. Так как первые кристаллы зарождаются у стенок литейной формы, а последние – в сердцевине отливки, то по сечению отливка может оказаться химически неоднородной. Поверхностные слои будут богаче тугоплавким компонентом  $B$ , а сердцевина – легкоплавким компонентом  $A$ . Такое явление называется *ликвацией*.

Ликвация может проявляться и в объеме одного кристалла: в центре он окажется обогащен тугоплавким компонентом, а у границ – легкоплавким. Это – *микроликвация* (*внутрикристаллическая* или *дендритная ликвация*).

Ликвация – явление нежелательное. Микроликвация проявляется при большой скорости охлаждения, а при медленном охлаждении успевает пройти диффузия, выравнивающая состав сплава в объеме зерна. Если микроликвация все же возникла, то для ее устранения применяют



диффузионный отжиг: нагрев отливки до температур, близких к солидусу, в течение длительного времени. Но ликвация во всем объеме отливки отжигом не устраняется.

Примеры сплавов с полной взаимной растворимостью компонентов: Cu – Ni, Ag – Au, Mo – W, Mo – V.

## Лекция 8

### Диаграмма состояния сплавов с полным отсутствием растворимости компонентов

Если компоненты сплава не растворяются друг в друге, то из жидкого расплава образуются или кристаллы чистого компонента *A* (в левой части диаграммы состояния), или кристаллы чистого компонента *B* (в правой части диаграммы). Тогда ликвидус диаграммы состоит из двух частей: линия 1-2, на которой начинается кристаллизация компонента *A*, и линия 2-3, на которой начинается кристаллизация компонента *B* (рис. 2.56).

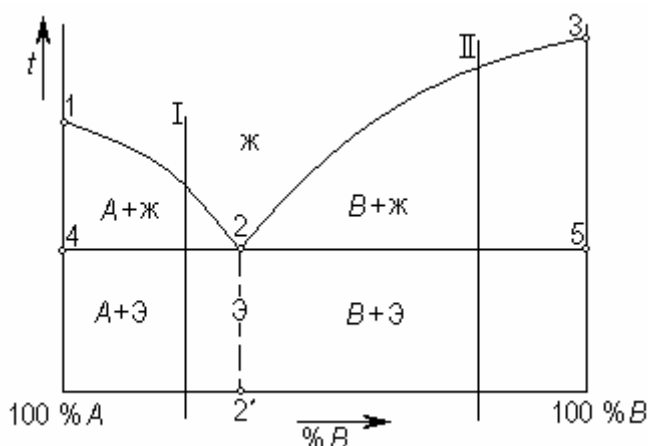


Рис. 2.56. Диаграмма состояния с полным отсутствием растворимости

Итак, ликвидус диаграммы – линия 1-2-3. На этой линии начинается кристаллизация сплавов при охлаждении (и заканчивается плавление при нагреве). Солидус диаграммы – прямая, параллельная оси концентраций: 4-2-5. На этой линии заканчивается кристаллизация сплавов при охлаждении (и начинается плавление при нагреве).

В левой области 1-2-4-1 из расплава кристаллизуется компонент *A*, следовательно, в жидкости содержание компонента *A* убывает, а содержание компонента *B*, наоборот, растет. В правой области 2-3-5-2 идет кристаллизация компонента *B*; при этом содержание компонента *B* в расплаве убывает, а содержание компонента *A*, наоборот, растет.

К моменту достижения температуры солидуса (линии 4-2-5) в любом сплаве концентрация компонентов в жидкости соответствует точке 2.

Точка 2 принадлежит обеим ветвям ликвидуса и обеим областям кристаллизации. Кроме того, она находится одновременно на ликвидусе и на солидусе. Это означает, что сплав состава 2' начинает и заканчива-

ет кристаллизоваться при одной и той же температуре. В этом сплаве при кристаллизации образуются одновременно кристаллы и компонента  $A$ , и компонента  $B$ . Они должны быть очень мелкими, так как температура точки 2 значительно ниже температур кристаллизации обоих компонентов и степень переохлаждения очень велика. Такая смесь очень мелких кристаллов двух компонентов, кристаллизующаяся при постоянной и самой низкой для данной системы температуре, называется **эвтектикой** (от греческого слова «легкоплавкая»).

Сплав состава 2' называют *эвтектическим*; сплавы в левой области диаграммы, до точки 2', называют *доэвтектическими*, а в правой области – *заэвтектическими*.

Из диаграммы видно, что кристаллизация всех сплавов данной системы заканчивается образованием эвтектики. Эвтектика представляет собой мелкозернистую структурную составляющую сплава со своими механическими свойствами. Ее принято обозначать русской буквой «Э». Состав эвтектики кратко можно записать:  $\text{Э} = A + B$ . Важно помнить, что эвтектика – это смесь двух фаз, а не одна фаза.

Структура сплавов состоит из эвтектики и кристаллов чистых компонентов, которые образовались из расплава в начале кристаллизации. В доэвтектических сплавах (сплав I на рис. 2.56) это кристаллы компонента  $A$  и эвтектика (рис. 2.57, *a*), в заэвтектических (сплав II на рис. 2.56) – кристаллы компонента  $B$  и эвтектика (рис. 2.57, *б*).

Сплавы с такой диаграммой тоже не имеют фазовых превращений в твердом состоянии, они всегда двухфазные, и поэтому не могут подвергаться упрочняющей термообработке.

Сплавы для получения отливок должны иметь состав, близкий к эвтектическому, так как именно эвтектика, кристаллизующаяся при постоянной температуре, обладает наилучшими литейными свойствами: малой усадкой и высокой жидкотекучестью. Из эвтектических сплавов делают припои, плавкие вставки, предохранители, их используют в подшипниках скольжения как антифрикционный слой.

Примеры сплавов с полной взаимной нерастворимостью компонентов:  $\text{Pb} - \text{Sb}$ ,  $\text{Pb} - \text{Pd}$ ,  $\text{Ca} - \text{Mg}$ .

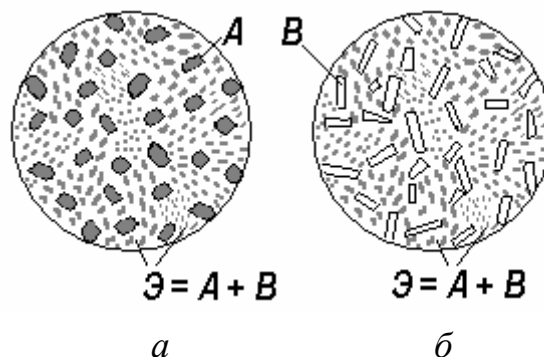


Рис. 2.57. Микроструктура сплавов: *a* – доэвтектического; *б* – заэвтектического

**Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов**

Если компоненты сплава образуют твердые растворы с ограниченной концентрацией, то диаграмма состояния представляет собой сочетание двух предыдущих вариантов (рис. 2.58).

Возьмем пример, когда компонент  $B$  ограниченно растворяется в компоненте  $A$ , но компонент  $A$  в решетку  $B$  не встраивается. Ликвидус диаграммы (линия 1-2-3), как и в предыдущем случае, имеет две ветви. Под кривой 2-3 идет кристаллизация компонента  $B$ , но под кривой 1-2 образуются кристаллы не чистого компонента  $A$ , а твердого раствора компонента  $B$  в решетке компонента  $A$ . Обозначим его буквой  $\alpha$ . Пусть предельная растворимость компонента  $B$  в решетке  $A$  составляет величину, равную отрезку  $A-4'$ , где  $4'$  – проекция точки 4 на ось концентраций. В таком случае солидус диаграммы на участке 1-4 представляет собой кривую, как и на диаграмме с неограниченной растворимостью. А за пределом растворимости, правее точки 4, солидус является прямой, параллельной оси концентраций, как на диаграмме с полной нерастворимостью компонентов. На этом участке, 4-2-5, идет кристаллизация эвтектики, которая состоит из мельчайших кристалликов твердого раствора  $\alpha$  и компонента  $B$ :  $\Xi = \alpha + B$ .

Ниже солидуса 1-4-2-5 все сплавы данной системы находятся в твердом состоянии, но фазовые превращения на этом не заканчиваются. Вспомним, что все твердые тела при охлаждении сжимаются, то есть межатомные расстояния в кристаллической решетке уменьшаются. Это значит, что «чужие» атомы компонента  $B$  начнут вызывать все большие напряжения в решетке растворителя. При бесконечно медленном, равновесном охлаждении эти атомы «выталкиваются» из кристаллов твердого раствора, поскольку система стремится к минимуму свободной энергии, а напряжения от «лишних» атомов этот запас свободной энергии повышают. Атомы компонента  $B$ , уходя из твердого

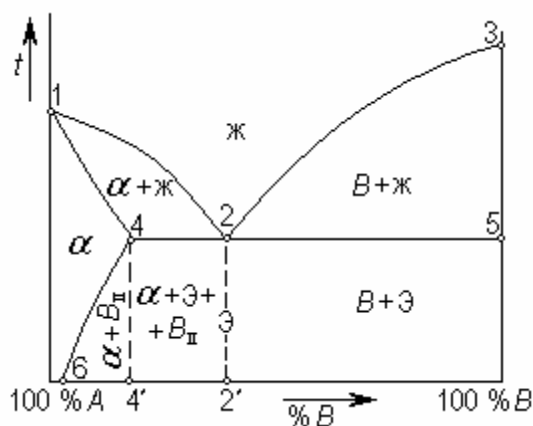


Рис. 2.58. Диаграмма состояния с ограниченной растворимостью

ниже солидуса 1-4-2-5 все сплавы данной системы находятся в твердом состоянии, но фазовые превращения на этом не заканчиваются. Вспомним, что все твердые тела при охлаждении сжимаются, то есть межатомные расстояния в кристаллической решетке уменьшаются. Это значит, что «чужие» атомы компонента  $B$  начнут вызывать все большие напряжения в решетке растворителя. При бесконечно медленном, равновесном охлаждении эти атомы «выталкиваются» из кристаллов твердого раствора, поскольку система стремится к минимуму свободной энергии, а напряжения от «лишних» атомов этот запас свободной энергии повышают. Атомы компонента  $B$ , уходя из твердого

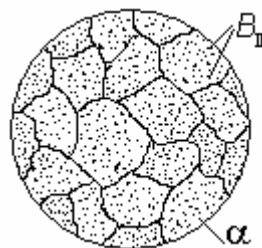


Рис. 2.59. Микроструктура сплава ниже кривой предельной растворимости

раствора, образуют собственные кристаллики, очень маленькие по сравнению с первичными (выросшими из расплава) кристаллами твердого раствора  $\alpha$  (рис. 2.59).

Итак, растворимость при охлаждении снижается; каждой температуре соответствует своя равновесная концентрация растворенного компонента  $B$ . Вот откуда на диаграмме появляется линия 4-6 – линия фазового превращения в твердом состоянии. Ее называют *линией предельной растворимости* компонента  $B$  в компоненте  $A$ . Выше этой линии сплав является однофазным твердым раствором  $\alpha$ , а ниже – двухфазным:  $\alpha + B_{II}$ . Нижний индекс «II» означает в данном случае то, что эти кристаллы компонента  $B$  являются вторичными, т. е. появились при распаде твердого раствора, а не из расплава.

Если бы компонент  $A$  тоже ограниченно растворялся в компоненте  $B$ , то на диаграмме справа тоже появилась бы линия предельной растворимости.

Важная особенность сплавов с концентрацией второго компонента от точки 6 до точки 4': их можно подвергать упрочняющей термической обработке, так как у них есть фазовое превращение в твердом состоянии. Если ускорить охлаждение сплава, то выделение атомов  $B$  из твердого раствора может и не успеть произойти. Поэтому сплавы с переменной растворимостью второго компонента подвергают *закалке* (это нагрев выше линии предельной растворимости и быстрое охлаждение, чтобы не дать атомам  $B$  выделиться из твердого раствора) и *старению* (это нагрев полученного пересыщенного твердого раствора до температур ниже критических, чтобы образовались мельчайшие кристаллики второй фазы). После такой термообработки сплавы становятся значительно прочнее: происходит упрочнение дисперсными частицами второй фазы.

Сплавов с ограниченной взаимной растворимостью компонентов, имеющих диаграмму такого типа, гораздо больше, чем сплавов с диаграммами первых двух видов. Примеры сплавов с ограниченной взаимной растворимостью: Al–Cu, Al–Si, Ag–Cu, Pb–Sn.

***Диаграмма состояния сплавов, в которых образуется химическое соединение компонентов***

Если компоненты сплава  $A$  и  $B$  взаимодействуют между собой с образованием химического соединения  $A_mB_n$ , то диаграмма состояния рассматривается как две отдельные диаграммы, для каждой из которых химическое соединение является одним из компонентов.

Ведь химическое соединение – это новое сложное вещество со своей собственной кристаллической решеткой, температурой плавления и свойствами. При кристаллизации сплава химическое соединение обра-

зует свои кристаллы, которые могут смешиваться с кристаллами исходных компонентов или растворять в своей решетке какую-то их долю.

Диаграммы состояния таких сплавов выглядят более сложными, чем рассмотренные ранее, но если мысленно разделить («разрезать») диаграмму по линии, соответствующей составу химического соединения, то левая и правая части окажутся уже известными простыми диаграммами.

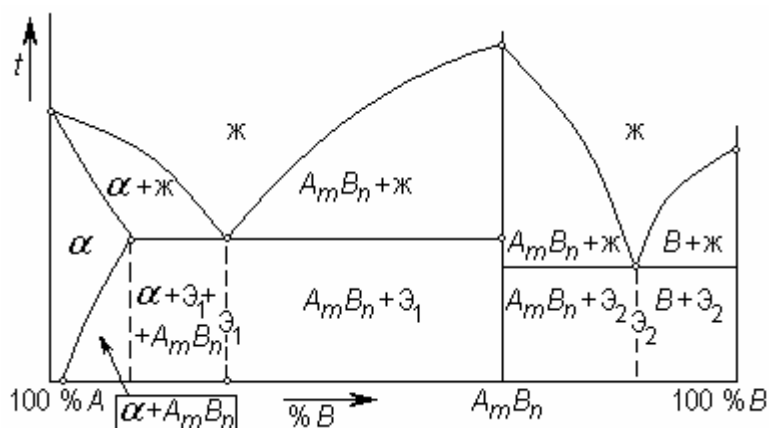


Рис. 2.60. Диаграмма состояния с химическим соединением

На рис. 2.60 левая часть диаграммы (до химического соединения  $A_m B_n$ ) представляет собой уже известную диаграмму с ограниченной растворимостью компонентов, а правая – диаграмму с полным отсутствием растворимости. Эвтектика  $\mathcal{E}_1$  состоит из кристаллов твердого раствора  $\alpha$  и химического соединения  $A_m B_n$ . Твердый раствор  $\alpha$  – это раствор компонента  $B$  в решетке  $A$  (или химического соединения  $A_m B_n$  в решетке компонента  $A$ ). Под кривой предельной растворимости из твердого раствора выделяются кристаллы химического соединения. В правой части диаграммы эвтектика  $\mathcal{E}_2$  строится из кристаллов компонента  $B$  и химического соединения  $A_m B_n$ .

**Зависимость свойств сплава от вида диаграммы состояния (закономерности Курнакова)**

Впервые на зависимости между видом диаграммы и свойствами сплавов в равновесном состоянии указал российский ученый Н.С. Курнаков, и поэтому они называются *правилами Курнакова*. Оказывается, если известны свойства чистых компонентов и вид диаграммы состояния для этой системы сплавов, то можно предсказать свойства любого сплава данной системы.

На рис. 2.61 показаны рассмотренные типы диаграмм состояния сплавов и соответствующее им изменение свойств (твердости по Бринеллю  $HB$  и относительного удлинения  $\delta$ ) при комнатной температуре. Конечно, другие свойства подчиняются таким же закономерностям.

У неограниченных твердых растворов свойства изменяются по криволинейной зависимости (рис. 2.61, а). Они могут иметь, например, более высокие значения прочностных характеристик, чем у чистых компонентов. Особенно сильно проявляется в твердых растворах криволинейная зависимость изменения электросопротивления, что используется при построении диаграмм состояния.

Если сплав представляет собой механическую смесь компонентов, то свойства сплавов изменяются линейно, пропорционально концентрации (рис. 2.61, б). Другими словами – значение любого из свойств сплавов будет изменяться только в пределах свойств чистых компонентов.

В системе сплавов с ограниченными твердыми растворами свойства в области твердого раствора изменяются по криволинейной зависимости, а в областях, где присутствует эвтектика, – по линейной зависимости (рис. 2.61, в).

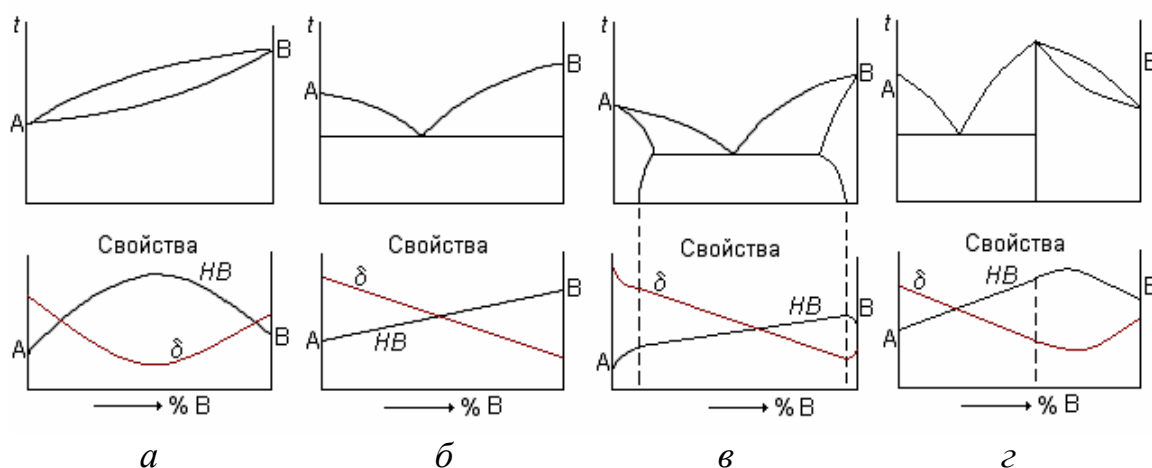


Рис. 2.61. Изменения свойств сплавов в зависимости от концентрации компонентов

Если образуется химическое соединение, то зависимость свойств от состава сплава резко изменяется при переходе через эту точку (рис. 2.61, г).

## Лекция 9

### Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

#### Компоненты и фазы

**Компонентами** в сплавах железа с углеродом являются металл железо и неметалл углерод.

**Железо** (Fe) имеет температуру плавления 1539 °С. В твердом состоянии испытывает два полиморфных превращения. Важнейшее из них – превращение при 911 °С. Ниже этой температуры железо имеет объ-



емно-центрированную кубическую решетку (ОЦК) с параметром  $a = 0,286$  нм (рис. 2.62, *a*). Это  $\alpha$ -железо ( $Fe_\alpha$ ). Выше  $911$  °С существует  $\gamma$ -железо ( $Fe_\gamma$ ) с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК) и параметром  $a = 0,364$  нм (рис. 2.62, *б*).

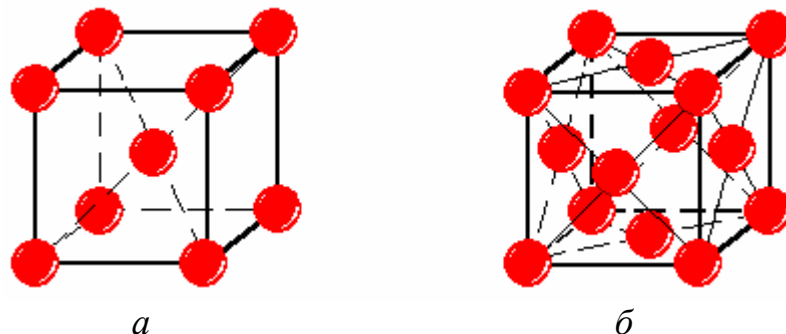


Рис. 2.62. Кристаллическая решетка  $\alpha$ -железа (*a*) и  $\gamma$ -железа (*б*)

$\alpha$ -железо ферромагнитно, а высокотемпературная модификация  $Fe_\gamma$  парамагнитна, что позволяет легко обнаруживать тот и другой вид решетки магнитными методами.

Высокотемпературное превращение  $\gamma$ -железа в  $\delta$ -железо с ОЦК решеткой меньше влияет на структуру и свойства сплавов, поэтому далее не рассматривается. Обозначение  $\beta$ -железо присвоено парамагнитному железу с ОЦК решеткой, которое существует от точки Кюри ( $768$  °С) до  $911$  °С.

Углерод (С) при нормальных условиях существует в виде *графита* с гексагональной слоистой кристаллической решеткой. Углерод не плавится при нагреве, а возгоняется (переходит в газовую фазу) при температуре  $3800$  °С. Он мягкий, непрочный, хорошо проводит электричество.

Модификация *алмаза* с решеткой, где каждый атом имеет четыре равноудаленных соседа, стабильна только при высоких давлениях и температурах. В сплавах с железом алмазная решетка углерода не встречается.

Какие же **фазы** образуют при взаимодействии эти столь непохожие компоненты?

Углерод может растворяться в жидком железе и в решетках обеих полиморфных модификаций, а также образует с железом химическое соединение. Поэтому в сплавах могут присутствовать следующие фазы: жидкий раствор (Ж), феррит (Ф), аустенит (А), цементит (Ц), графит (Г).

*Феррит* – это твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железо с предельной растворимостью  $0,02$  % С. Атомы углерода размещаются в дефектах кристаллической решетки железа, так как поры ОЦК решетки для них слишком малы (рис. 2.63, *a*). Феррит мягок и пластичен:  $\sigma_B = 300$  МПа,  $\delta = 40$  %,  $HB = 80-100$ .

*Аустенит* – это твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железо с предельной растворимостью 2,14 % С. Атомы углерода размещаются в порах ГЦК решетки железа (рис. 2.63, б). Аустенит пластичен, но прочнее феррита:  $HB = 160-200$ , в зависимости от концентрации углерода.

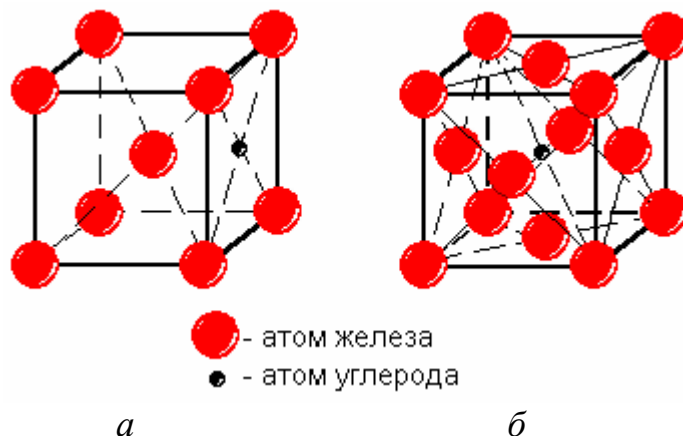


Рис. 2.63. Кристаллическая решетка феррита (а) и аустенита (б)

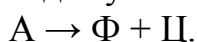
*Цементит*  $Fe_3C$  – это химическое соединение углерода с железом, т.е. карбид железа, содержащий 6,69 % С. Имеет сложную ромбическую решетку, очень тверд и хрупок: его твердость составляет приблизительно 800 $HB$ . Цементит при длительном нагреве свыше 1000 °С разлагается на железо и углерод. При быстром нагреве (лучом лазера) плавится при 1260 °С.

*Графит* – это чистый углерод: мягкий, непрочный, химически стойкий, хорошо проводит электричество.

Кроме перечисленных фаз, в структуре сплавов железа с углеродом присутствуют две **структурные составляющие**: эвтектика и эвтектоид. Что такое эвтектика, Вам уже известно. В системе железо – углерод эвтектика содержит 4,3 % С и кристаллизуется при температуре 1147 °С. Она представляет собой механическую смесь кристаллов аустенита и цементита и называется *ледебурит* (в честь австрийского ученого-металлурга Ледебура):



*Эвтектоид* – это механическая смесь кристаллов двух твердых фаз, которая образуется при распаде твердого раствора (а не кристаллизуется из жидкости, как эвтектика). В системе железо – углерод эвтектоидом является смесь пластинчатых кристаллов феррита и цементита, которая образуется за счет распада аустенита при температуре 727 °С:



Эту смесь, содержащую 0,8 % С, называют *перлитом* (от слова «перламутр»), так как на протравленной поверхности сплава перлит дает

радужную окраску, напоминающую внутренние створки раковины моллюска). Перлит имеет наиболее удачное сочетание механических свойств из всех равновесных структур в сплавах железа с углеродом. В нем мягкие, вязкие пластины феррита чередуются с прочными, твердыми, жесткими пластинами цементита:  $\Pi = \Phi + \text{Ц}$ . Такая структура хорошо сопротивляется самым разным механическим нагрузкам, обладает высокой прочностью и достаточной вязкостью. Твердость перлита составляет 180-220 *HV*, в зависимости от размера зерна.

#### Превращения в сплавах железо – углерод

Диаграмма железо – углерод строится в тех же координатах, что и ранее рассмотренные диаграммы состояния: по оси абсцисс – концентрация углерода в сплавах, по оси ординат – температура (рис. 2.64). Приведенная с некоторыми упрощениями диаграмма заканчивается ординатой, соответствующей химическому соединению железа с углеродом – цементиту (6,69 % C). Правее этой концентрации диаграмму обычно не изображают, так как эти сплавы не имеют практического применения.

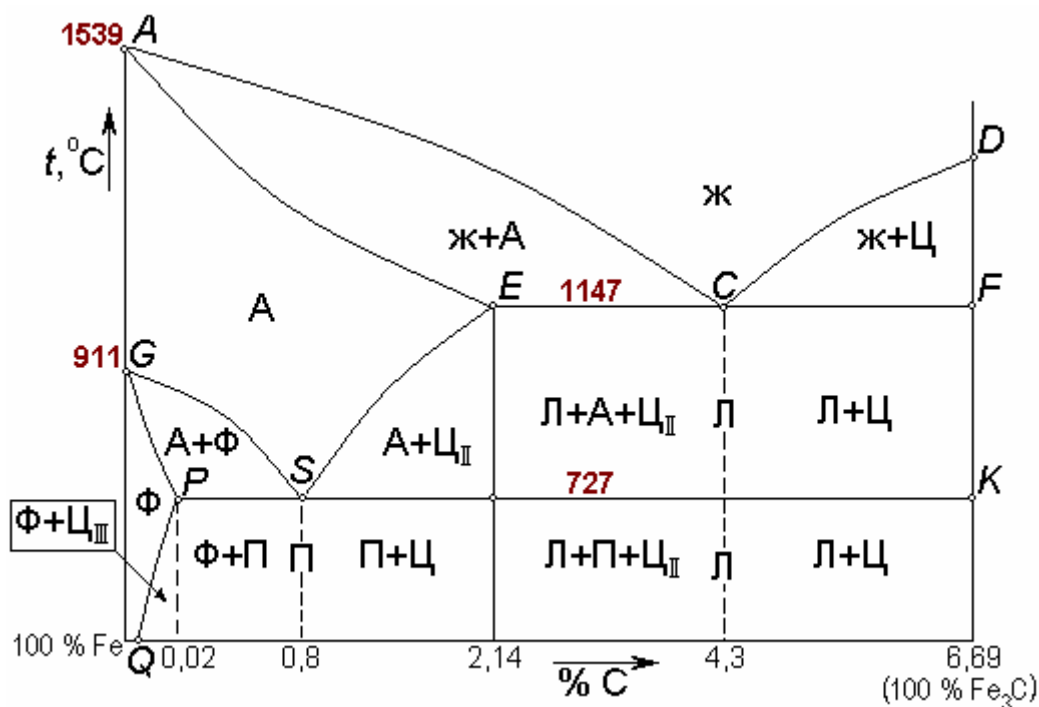
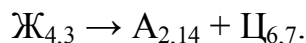


Рис. 2.64. Диаграмма состояния железо – цементит

Линия  $ACD$  – ликвидус диаграммы. В левой части, под кривой  $AC$ , кристаллизуется аустенит, а в правой, под кривой  $CD$ , – цементит. Соллидус диаграммы  $AECF$  состоит из криволинейного участка  $AE$ , на котором заканчивается кристаллизация аустенита, и горизонтального участка  $ECF$ , на котором образуется эвтектика, состоящая из аустенита и цементита:

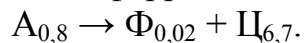


В сплавах, расположенных левее точки *C*, по мере образования аустенита концентрация углерода в жидкости растёт, так как аустенит содержит не более 2,14 % *C*. А в сплавах, расположенных правее точки *C*, наоборот, по мере кристаллизации цементита содержание углерода в жидкости снижается. К моменту достижения температуры 1147 °С жидкий раствор в любом сплаве имеет эвтектическую концентрацию: 4,3 % *C*.

Но с окончанием кристаллизации превращения в сплавах железа с углеродом не заканчиваются. Железо при 911 °С меняет тип решетки, растворимость углерода в нем резко уменьшается. В области *GSP* сосуществуют два твердых раствора: феррит и аустенит. При охлаждении сплавов, содержащих менее 0,8 % *C*, в аустените зарождаются и растут зерна новой, равновесной при низкой температуре, фазы – феррита. При этом концентрация углерода в аустените растёт, так как феррит углерода почти не содержит. К моменту достижения температуры 727 °С аустенит содержит 0,8 % *C*.

Кроме того, по мере охлаждения уменьшается и растворимость углерода в аустените. На диаграмме это отражает линия *SE* – линия предельной растворимости; ниже этой линии углерод выделяется из решетки  $\gamma$ -железа. Но активный атомарный углерод тут же вступает в химическое взаимодействие с железом, образуя карбид  $\text{Fe}_3\text{C}$  (цементит). Этот цементит называют *вторичным*, потому что он выделяется из твердого раствора, а не кристаллизуется из жидкости. Во всех сплавах, содержащих более 0,8 % *C*, при охлаждении из аустенита выделяется цементит. При этом концентрация углерода в аустените снижается: от 2,14 % при 1147 °С до 0,8 % при 727 °С.

Итак, при температуре эвтектоидного превращения (727 °С) аустенит, имеющий эвтектоидную концентрацию (0,8 % *C*), распадается на механическую смесь кристаллов феррита и цементита:



При нормальной температуре все многообразие структур в сплавах железа с углеродом строится из двух равновесных фаз: феррита и цементита.

### ***Стали и чугуны***

Сплавы железа с углеродом издавна разделяли на две большие группы: стали и чугуны.

Границей между этими двумя группами сплавов является точка *E* с содержанием углерода 2,14 % – предел растворимости углерода в железе. Но и задолго до появления точных методов анализа, и вообще материаловедения как науки, мастера плавильного и кузнечного дела пре-

красно отличали сталь от чугуна, получали их и обрабатывали. Эти сплавы имеют совершенно разные технологические свойства: сталь можно ковать, прокатывать, вытягивать в тонкую проволоку, с чугуном же это проделать не удастся, он разрушается от ударных и растягивающих нагрузок. Зато чугун является одним из лучших литейных сплавов, позволяя получать тонкостенные фасонные отливки.

Эта разница в свойствах становится понятна, если проанализировать диаграмму состояния железо – углерод. Все стали (сплавы, содержащие менее 2 % углерода) при нагреве становятся однофазными. Фаза эта – аустенит, твердый раствор на базе железа с ГЦК решеткой. Металлы с таким типом решетки наиболее пластичны. Поэтому сталь – сплав деформируемый.

Чугун же до самой температуры плавления остается двухфазным, и одна из этих фаз – твердый хрупкий цементит, который не позволяет деформировать материал. Но чугуны кристаллизуются в относительно узком интервале температур, заканчивается кристаллизация образованием эвтектики при постоянной температуре. Это значит, что такие сплавы должны иметь хорошие литейные свойства (высокую жидкотекучесть, малую усадку) и не образовывать литейных дефектов. Поэтому чугуны – сплавы литейные.

Надо еще отметить, что фазовые превращения в твердом состоянии позволяют упрочнять сталь термической обработкой. Для чугуна термообработка неэффективна, так как эвтектика – ледебурит – остается неизменной до температуры плавления.

#### **Классификация сплавов железа с углеродом по структуре**

По структуре различают следующие группы сталей:

1) *техническое железо* с содержанием углерода менее 0,02 %. Структура сплава однофазная – феррит (рис. 2.65, а);

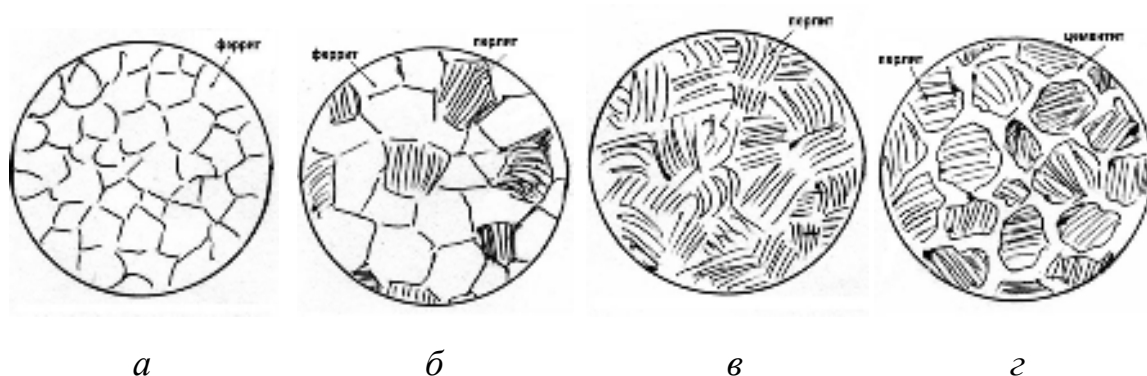


Рис. 2.65. Микроструктура углеродистых сталей:  
 а – техническое железо; б – доэвтектоидная сталь;  
 в – эвтектоидная сталь; г – заэвтектоидная сталь

2) *доэвтектоидные стали* с содержанием углерода от 0,02 до 0,8 %. Структура сплавов состоит из феррита и перлита, причем с увеличением содержания углерода доля перлита в структуре возрастает (рис. 2.65, б);

3) *эвтектоидная сталь* с содержанием углерода 0,8 %. Структура стали – перлит: чередующиеся пластинки феррита и цементита (рис. 2.65, в);

4) *заэвтектоидные стали* с содержанием углерода от 0,8 до 2,14 %. Структура состоит из участков перлита, разделенных хрупкими цементитными оболочками (рис. 2.65, г).

Чугуны, изображенные на диаграмме, относятся к группе *белых чугунов*. В них весь углерод находится в связанном виде – в виде цементита  $Fe_3C$ . По структуре различают следующие разновидности белых чугунов (рис. 2.66):

1) *доэвтектические белые чугуны* с содержанием углерода от 2,14 до 4,3 %. Структура сплавов состоит из эвтектики (ледебурита) и участков перлита;

2) *эвтектический белый чугун* с содержанием углерода 4,3 %. Структура сплава – ледебурит, состоящий из цементита (светлая составляющая) и перлита (темные участки);

3) *заэвтектический белый чугун* с содержанием углерода от 4,3 до 6,69 %. Структура состоит из пластин первичного цементита и ледебурита.

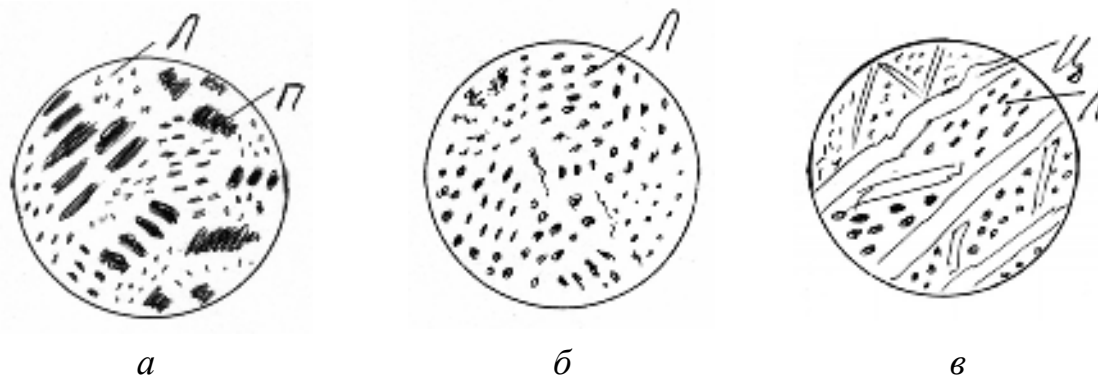


Рис. 2.66. Микроструктура белых чугунов:  
а – доэвтектический белый чугун; б – эвтектический белый чугун;  
в – заэвтектический белый чугун



## Углеродистые стали

Примерно 80 % от всего объема выплавляемой стали составляют углеродистые стали. Оставшиеся 20 % – это стали легированные, в которые специально добавлены различные компоненты для повышения каких-либо эксплуатационных характеристик. Углеродистые стали содержат только железо, углерод и небольшую долю компонентов, неизбежно попадающих в сталь при выплавке: кремний, марганец, серу и фосфор.

Итак, **углеродистые стали** – это сплавы на основе железа, содержащие до 2 % углерода, а также марганец, кремний, серу и фосфор в количествах, зависящих от способа выплавки.

**Влияние углерода на свойства стали**

Углерод – не случайная примесь, а важнейший компонент углеродистой стали, создающий ее свойства.

Машиностроительные заводы получают сталь с металлургических предприятий в отожженном или горячекатаном состоянии. Структура конструкционных сталей (доэвтектоидных) состоит из феррита и перлита, инструментальных – из перлита и цементита.

С увеличением содержания углерода в структуре стали увеличивается количество цементита – очень твердой и хрупкой фазы. Твердость цементита превышает твердость феррита примерно в 10 раз (800HV и 80HV соответственно). Поэтому прочность и твердость стали растут с повышением содержания углерода, а пластичность и вязкость, наоборот, снижаются (рис. 2.67).

При повышении содержания углерода до 0,8 % увеличивается доля перлита в структуре (от 0 до 100 %), поэтому растут и твердость, и прочность. Но при дальнейшем росте содержания углерода появляется вторичный цементит по границам перлитных зерен. Твердость при этом почти не увеличивается, а прочность снижается из-за повышенной хрупкости цементитной сетки.

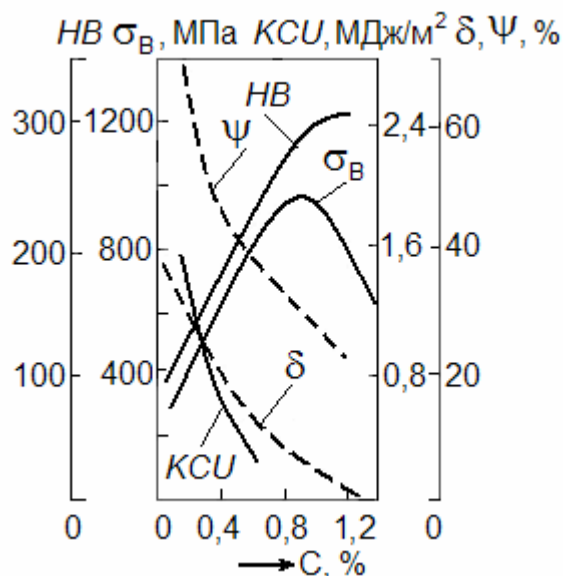


Рис. 2.67. Влияние углерода на механические свойства стали

Кроме того, увеличение содержания углерода приводит к повышению порога хладноломкости: каждая десятая доля процента повышает  $t_{50}$  примерно на  $20^\circ$ . Это значит, что уже сталь с  $0,4\%$  С переходит в хрупкое состояние примерно при  $0^\circ\text{C}$ , т. е. менее надежна в эксплуатации.

Влияет содержание углерода и на все технологические свойства стали: чем больше в стали углерода, тем она труднее обрабатывается резанием, хуже деформируется (особенно в холодном состоянии) и хуже сваривается.

#### ***Влияние постоянных примесей на свойства стали***

Полезные примеси, марганец и кремний, попадают в сталь из исходного материала – чугуна, а также при раскислении.

*Марганец*, содержащийся в углеродистой стали в количестве  $0,3-0,8\%$ , повышает предел прочности, немного снижает вязкость. Он связывает серу в сульфид  $\text{MnS}$ , в этом его главная польза.

Содержание *кремния* в углеродистой стали не должно превышать  $0,4\%$ . Он растворяется в феррите по типу внедрения, поэтому значительно повышает предел текучести. При этом ухудшается штампуемость стали: листовая сталь может давать надрывы при глубокой вытяжке. Сталь, предназначенную для получения деталей холодной листовой штамповкой, кремнием (ферросилицием) не раскисляют.

*Сера* – вредная примесь. Она вызывает *красноломкость* стали: хрупкость при горячей обработке давлением. В сталь попадает, в основном, из доменного топлива – кокса. Сера с железом образует сульфид  $\text{FeS}$ , а  $\text{FeS}$  с железом образует легкоплавкую эвтектику с температурой плавления  $988^\circ\text{C}$ . Под ковку и прокатку стальные слитки нагревают до  $1200^\circ\text{C}$ . Поэтому границы зерен могут оплавиться, и металл разрушится.

Марганец активнее железа взаимодействует с серой и связывает ее в сульфид  $\text{MnS}$ , который эвтектики не образует. Но сульфиды, как любые неметаллические включения, являются концентраторами напряжений, снижают пластичность и вязкость. Поэтому содержание серы в стали должно быть ограничено.

*Фосфор*, напротив, вызывает хладноломкость стали, сдвигая порог хладноломкости в область более высоких температур. Каждая сотая доля процента фосфора повышает  $t_{50}$  примерно на  $25^\circ$ ! Это значит, что фосфор еще опаснее, чем сера. Его содержание еще более ограничено. Для снижения содержания фосфора в стали нужно повышать качество шихты, применять флюсы, удаляющие фосфор.

При выплавке в сталь попадают *газы* (азот, кислород, водород). Это тоже вредные примеси. Они снижают пластичность, увеличивают

склонность к хрупкому разрушению. Оксиды являются местами зарождения трещин. Азот делает сталь непригодной для холодной штамповки. Водород вызывает охрупчивание закаленной стали. Он восстанавливает металлы из оксидов с образованием воды, а вода испаряется при нагреве и вызывает внутренние надрывы в металле – флокены. Содержание газов в стали ограничивается тысячными долями процента.

#### *Классификация углеродистых сталей*

Стали можно подразделять на группы по различным классификационным признакам.

1) *По химическому составу* стали делятся на углеродистые и легированные. В свою очередь, углеродистые стали можно подразделить на низкоуглеродистые (до 0,3 % С), среднеуглеродистые (от 0,3 до 0,6 % С) и высокоуглеродистые (свыше 0,6 % С).

2) *По структуре* стали классифицируют на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные, о чем уже говорилось при рассмотрении диаграммы железо – углерод.

3) *По назначению* можно выделить много различных групп. Основные группы – это строительные стали, конструкционные стали, инструментальные стали. В свою очередь, конструкционные стали делятся на цементируемые стали, улучшаемые стали, рессорно-пружинные стали и т. д.

4) *По степени раскисления* стали подразделяются на спокойные, полуспокойные и кипящие.

*Раскислением* называют последний этап выплавки стали, когда в расплав добавляют более активные, чем железо, металлы с целью отнять у железа кислород, восстановить его из оксида FeO. Марганец и кремний вводятся в жидкую сталь в виде ферросплавов – ферромарганца и ферросилиция, алюминий – в виде металла технической чистоты. Недостаточно раскисленная сталь в изложнице «кипит»: из нее выделяются пузырьки CO, так как идет процесс восстановления железа углеродом, поэтому ее называют кипящей.

*Спокойная сталь* – это хорошо раскисленная сталь. При выплавке в конце процесса осуществляется последовательно раскисление ее марганцем, кремнием и алюминием.

*Полуспокойная сталь* раскисляется только марганцем и алюминием. Поэтому из нее в меньшей степени удален кислород.

*Кипящая сталь* – это плохо раскисленная сталь. Раскисление в этом случае осуществляется только марганцем. В стали к моменту разлива остается кислород, образующий с углеродом газообразный оксид CO. Пузырьки CO поднимаются в жидкой стали к поверхности, создавая видимость «кипения» расплава в изложнице. Они сохраняются в слитке стали при кристаллизации, ухудшая механические свойства.

5) Классификация сталей *по качеству* лежит в основе маркировки углеродистых сталей. *Качество стали* – это металлургическое понятие. Оно определяется содержанием вредных примесей: серы, фосфора и газов. Чем этих примесей меньше, тем качество стали выше. Дальнейшая обработка, механическая или термическая, не способна изменить качество стали, сложившееся в процессе выплавки. Выделяют четыре группы сталей:

Стали <b>обыкновенного качества</b>	<b>Качественные</b> стали	<b>Высококачественные</b> стали	<b>Особо высококачественные</b> стали
ГОСТ 380-94	ГОСТ 1050-88		
$\leq 0,05 \% S$	$\leq 0,04 \% S$	$\leq 0,025 \% S$ и $P$	$\leq 0,015 \% S$ и $P$
$\leq 0,04 \% P$	$\leq 0,035 \% P$		

#### **Маркировка углеродистых сталей**

**Стали обыкновенного качества** изготавливают следующих марок: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6 и Ст3Г, Ст5Г с повышенным содержанием марганца. Буквы Ст обозначают «сталь», цифры – условный номер марки в зависимости от химического состава. С увеличением номера марки увеличивается содержание углерода и марганца в стали. Например, в стали марки Ст1 содержится 0,06-0,12 % С и 0,25-0,5 % Mn; в стали марки Ст6 – 0,38-0,49 % С и 0,5-0,8 % Mn. Стали Ст3Г и Ст5Г содержат около 1 % Mn. Чем больше номер марки, тем выше прочностные свойства и ниже пластичность стали. Например, сталь марки Ст1 имеет  $\sigma_b = 320-400$  МПа и  $\delta > 33 \%$ , а сталь марки Ст6 –  $\sigma_b = 600-720$  МПа и  $\delta = 11-16 \%$ .

В конце марки ставятся буквы «кп», «пс» или «сп», показывающие степень раскисления стали при выплавке. Они означают соответственно «кипящая», «полуспокойная» и «спокойная». Например, Ст3кп, Ст4пс.

Содержание кремния в стали определяется степенью раскисления. Кипящая сталь почти не содержит кремния (не более 0,05 %). В полуспокойной стали доля кремния составляет 0,05-0,15 %, в спокойной – 0,15-0,3 %.

Степень раскисления сказывается на свойствах стали и ее стоимости. Кипящие стали самые дешевые, но у спокойных более высокие механические свойства, меньшая склонность к хладноломкости. Зато кипящие стали можно использовать для получения деталей листовой штамповкой с глубокой вытяжкой. Спокойные стали с повышенным содержанием кремния сильно упрочняются при деформировании, так что возможно появление надрывов при штамповке.

Стали обыкновенного качества поставляются в горячекатаном состоянии. Их структура и свойства заданы при получении изделий на ме-

таллургическом заводе. Поэтому при изготовлении деталей на предприятиях-потребителях металла без применения горячей обработки механические свойства стали будут соответствовать гарантированному ГОСТом для данной марки уровню.

Если из этих сталей получают изделия с применением горячей обработки (ковки, штамповки), то структура и, следовательно, свойства стали меняются. Для улучшения структуры и свойств после изготовления изделия горячей обработкой давлением может проводиться термическая обработка – отжиг или нормализация.

Металлургические заводы выпускают стали обыкновенного качества в виде проката самого различного профиля и размеров. Это могут быть прутки круглого, квадратного, шестигранного сечения; уголки, швеллеры, листы, трубы, балки и т. д.

Стали обыкновенного качества, особенно стали марок Ст2, Ст3, применяются для изготовления сварных конструкций (фермы, рамы).

В сельскохозяйственном машиностроении из сталей Ст3, Ст4 делают валики, оси, рычаги, получаемые холодной штамповкой, цементируемые шестерни, червяки, поршневые кольца.

Среднеуглеродистые стали Ст5 и Ст6 применяют для более нагруженных изделий: рельсов, валов, железнодорожных колес.

**Качественные стали.** Гарантируется и химический состав, и механические свойства. Поставляются в виде проката и нормализованных поковок.

Марки *конструкционных* качественных сталей обозначаются содержанием углерода в сотых долях процента:

05, 08, 10, 15, 20, ... 45, 50, ... 85.

В марках спокойных качественных сталей степень раскисления не указывается. Кипящими (почти не содержащими кремния) могут быть стали марок 05, 08, 10, 15, 20; полуспокойными (около 0,17 % Si) – стали 08, 10, 15, 20.

Примеры марок качественных сталей: 35, 70, 08кп, 10пс.

Назначение конструкционных качественных сталей:

Стали марок 05, 08, 10 – для получения деталей из листа глубокой вытяжкой.

Стали 15, 20, 25 – для изготовления мелких деталей, работающих в нормализованном состоянии (крепеж, втулки, трубы, змеевики), а также для цементируемых деталей (кулачки, малонагруженные шестерни).

Стали 30, 35, 40, 45, 50, 55 – улучшаемые стали. Они упрочняются закалкой с высоким отпуском. Детали работают в условиях усталостного износа (шатуны, оси, маховики, зубчатые колеса, коленчатые валы).

Стали марок 50, 55 и 60 могут подвергаться нормализации и поверхностной закалке ТВЧ. Так упрочняют шейки коленчатых валов, кулачки распределительных валиков, зубья шестерен, длинные валы и ходовые винты.

Стали 60-85 и близкие к углеродистым стали 60Г, 65Г, 70Г применяют в качестве рессорно-пружинных.

Марки *инструментальных* качественных сталей обозначаются буквой «У» и содержанием углерода в десятых долях процента:

У7, У8, У9, ... У14.

**Высококачественные стали** содержат пониженное количество вредных примесей, благодаря чему менее склонны к хрупкому разрушению, более надежны при эксплуатации. Обозначение марок такое же, как и у качественных сталей, но в конце марки ставится буква «А»: 45А, У10А.

**Особо высококачественные стали** содержат еще меньше вредных примесей и неметаллических включений. Этого можно добиться только за счет двойного переплава. Способ переплава указывается в конце марки через дефис: «-Ш» – электрошлаковый, «-ВД» – вакуумно-дуговой, «-ШД» – электрошлаковый и вакуумно-дуговой и т. п. Именно это обозначение говорит об особо высоком качестве стали. Но углеродистые стали с таким уровнем качества не выплавляют, так как это делает сталь неоправданно дорогой. Только легированные стали для особо ответственных назначений подвергают двойному переплаву:

30ХГС-Ш, 5ХНТ-ВД, ШХ15-Ш.

## Лекция 11

### Чугуны

**Чугуны** – это сплавы на основе железа, содержащие от 2 до 5 % углерода, а также марганец, кремний и вредные примеси. Это литейный и передельный материал.

Допустимые количества полезных и вредных примесей в чугунах примерно в 5-10 раз больше, чем в сталях.

В зависимости от того, в какой форме содержится углерод, различают следующие виды чугунов: белые, в которых весь углерод связан в карбид железа  $Fe_3C$  (рис. 2.68, а), серые с пластинчатым графитом (рис. 2.68, б), ковкие – с хлопьевидным графитом (рис. 2.68, в) и высокопрочные – с шаровидным графитом (рис. 2.68, г).

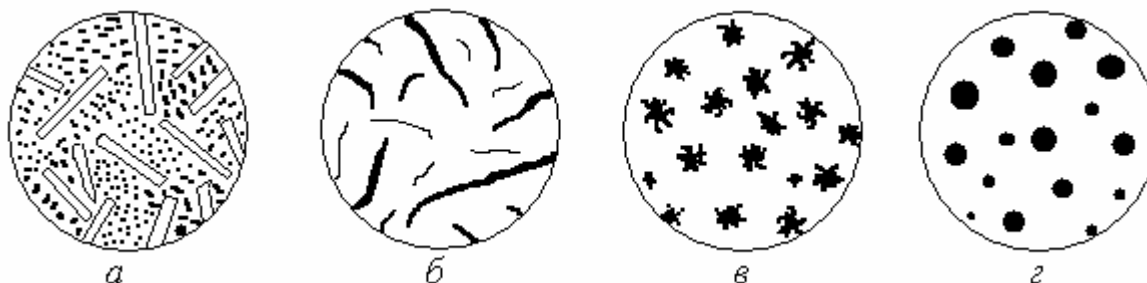


Рис. 2.68. Виды чугунов:

а – белый заэвтектический; б – серый; в – ковкий; г – высокопрочный  
(б, в, г – структура металлической основы не показана)



### Белые чугуны

Белые чугуны содержат углерод только в связанном виде – в виде цементита. В зависимости от содержания углерода они подразделяются на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические. В структуру любого белого чугуна входит эвтектика – ледебурит. В момент образования он состоит из аустенита и цементита, а при температуре ниже 727 °С – из перлита и цементита.

Излом белого чугуна светлый, блестящий – «белый», отсюда и название. Твердость составляет 450-500 *НВ*, материал очень хрупкий и твердый. Резанием (лезвийным инструментом) не обрабатывается, для изготовления деталей не используется.

Применяют *отбеленные* чугунные детали, у которых сердцевина имеет структуру серого чугуна, а с поверхности есть слой белого чугуна толщиной 5-7 мм. Так можно изготавливать прокатные валки, тормозные колодки, шары мельниц для размола горных пород, лемехи плугов, зубья ковшей экскаваторов, доски в драгах, – то есть, изделия, от которых требуется высокая твердость и износостойкость поверхности.

Для получения структуры белого чугуна в отливке необходимо быстрое охлаждение, а также минимальное содержание кремния и присутствие марганца и хрома («отбеливающих» компонентов).

Главное назначение белого чугуна – передел в ковкий чугун.

### Серые чугуны

В *сером чугуне* весь углерод или его часть находятся в свободном виде – в виде графита.

Диаграмма состояния железо – цементит является метастабильной (не совсем равновесной). При очень медленном охлаждении расплавленного чугуна реализуется стабильная, равновесная диаграмма железо – графит. Ее точки и линии смещены чуть влево и вверх (рис. 69, а).

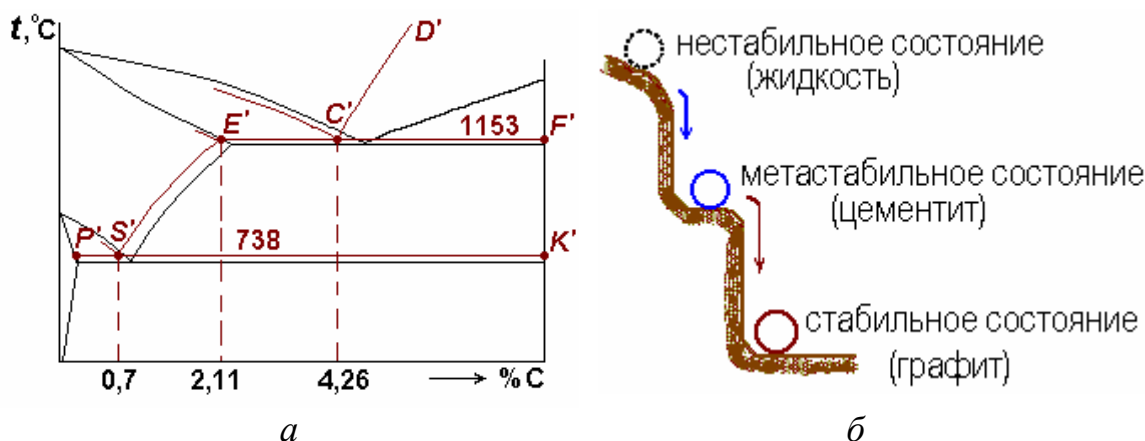


Рис. 2.69. Равновесная диаграмма состояния железо-графит (а) и схема, иллюстрирующая вероятность образования графита и цементита (б)

Графит в сером чугунае – это кристаллы сложной формы – «розетки», растущие из одного центра в виде сильно искривленных лепестков (рис. 2.70, а). В плоскости шлифа графит виден как отдельные пластинки, прямолинейные или изогнутые, так как плоскость шлифа пересекает графитные лепестки. Такой графит называют *пластинчатым*.

Металлическая основа серого чугуна может быть ферритной, перлитной или смешанной – феррито-перлитной (рис. 2.70, б). Излом серого чугуна темно-серого цвета, а в ферритном чугунае, в котором весь углерод содержится в виде графита, – бархатно-черного.

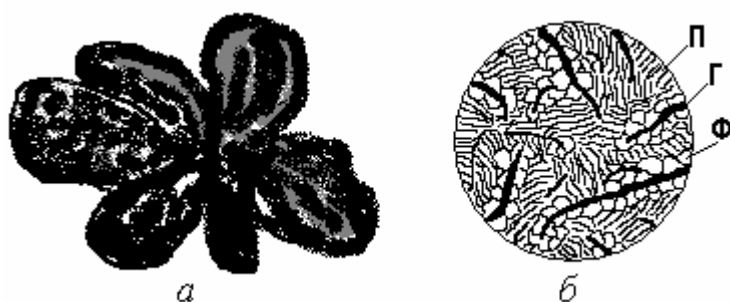


Рис. 2.70. Графитное включение в сером чугунае (а); микроструктура серого феррито-перлитного чугуна (б)

Механические свойства серых чугунов зависят от структуры основы и от количества, формы и размеров графитовых включений. Перлитные серые чугуны тверже и прочнее, ферритные – наименее

прочные, феррито-перлитные – имеют промежуточные характеристики. Графит играет роль надрезов, трещин в металлической основе. Прочность графита при растяжении несопоставима с прочностью металла, поэтому пластичность чугунов очень мала ( $\delta \leq 0,5 \%$ ), а предел прочности при растяжении значительно ниже, чем у стали. (Говорят, что чугун – это сталь, испорченная графитом.) Но на сжатие графит работает хорошо:

$$\sigma_{\text{В сжатия}} = 2 \cdot \sigma_{\text{В изгиба}} = 4 \cdot \sigma_{\text{В растяжения}}$$

Серый чугун – самый дешевый литейный сплав. Имеет высокую жидкотекучесть и малую усадку, что позволяет получать тонкостенные фасонные отливки. Хорошо обрабатывается резанием: дает мелкую сыпучую стружку, графит является твердой смазкой и уменьшает тем самым износ инструмента. Благодаря графиту, в сером чугунае быстро затухают механические колебания, в том числе звуковые, что позволяет уменьшить шум при работе оборудования. Чугун нечувствителен к надрезам на поверхности деталей (в отличие от стали).

Детали из чугуна изготавливают литьем с последующей обработкой резанием. Для получения структуры серого чугуна в отливке сплав должен содержать много кремния и углерода, но мало марганца, чтобы не образовался цементит.

ГОСТ 1412-85 включает 6 основных марок серого чугуна. Чугун – единственный сплав, в марке которого зашифрован не химический состав, а механические свойства. Например, марка СЧ12 означает: серый чугун с пределом прочности при растяжении 120 МПа (12 кг/мм<sup>2</sup>).

Серые чугуны применяют для изготовления деталей, работающих с небольшими нагрузками, в основном, на сжатие. Это колонны, опоры, корпуса, станины, крышки, суппорты, зубчатые колеса, канализационные трубы, ванны, батареи.

#### **Высокопрочные чугуны**

В высокопрочных чугунах графит имеет шаровидную форму.

Они содержат 2,7-3,5 % углерода. Их модифицируют в ковше магнием (0,02-0,08 %). Модификатор не позволяет растущему кристаллу графита принять естественную форму розетки. Атомы магния образуют тонкий слой на поверхности зародыша графита, увеличивая его поверхностную энергию. Стремление системы к минимальной свободной энергии приводит к тому, что графит кристаллизуется в виде шариков (у шара поверхность при заданном объеме минимальна). Металлическая основа может быть такой же, как у серых чугунов (рис. 2.71).

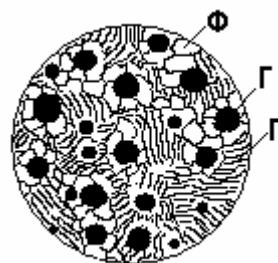


Рис. 2.71. Микроструктура высокопрочного феррито-перлитного чугуна

Такой вид чугунов был создан с целью повысить механические свойства чугуна, сохранив его преимущества перед сталью. Предел прочности при растяжении  $\sigma_B$  и относительное удлинение  $\delta$  у высокопрочных чугунов выше, чем у серых, так как шаровидные включения графита – более мягкие концентраторы напряжения, чем пластинчатые (рис. 2.72).

Маркировка высокопрочных чугунов по ГОСТ 7293-85 аналогична маркировке серых. Например, ВЧ90 означает: высокопрочный чугун с пределом прочности при растяжении 900 МПа (90 кг/мм<sup>2</sup>).

Такие чугуны выдерживают значительные растягивающие нагрузки, поэтому применяются для более ответственных деталей: куз-

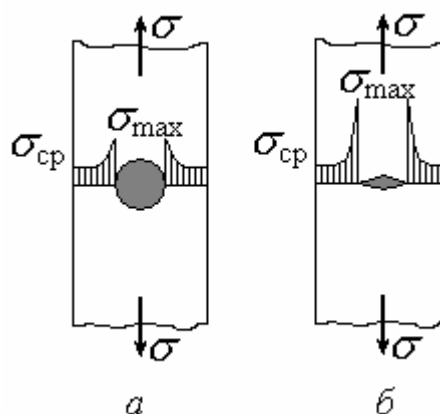


Рис. 2.72. Мягкий (а) и острый (б) концентраторы напряжения

нечно-прессового оборудования, станин прокатных станков, коленчатых валов автомобилей, поршней, вентилях, крыльчаток, распределительных валов. Отливки из высокопрочного чугуна широко используются в автомобиле- и тракторостроении вместо более дорогих стальных поковок. Их можно подвергать упрочняющей термообработке. Есть смысл выплавлять легированные высокопрочные чугуны для особых условий эксплуатации – с повышенной вязкостью при отрицательных температурах, жаропрочные, коррозионно-стойкие.

### **Ковкие чугуны**

В *ковких чугунах* графит имеет *хлопьевидную* форму. Такой графит получается при отжиге белого доэвтектического чугуна с содержанием углерода 2,5-3 %. Его еще называют углеродом отжига.

При нагреве до температур, близких к солидусу, цементит в белом чугуне распадается на исходные компоненты: железо и углерод.

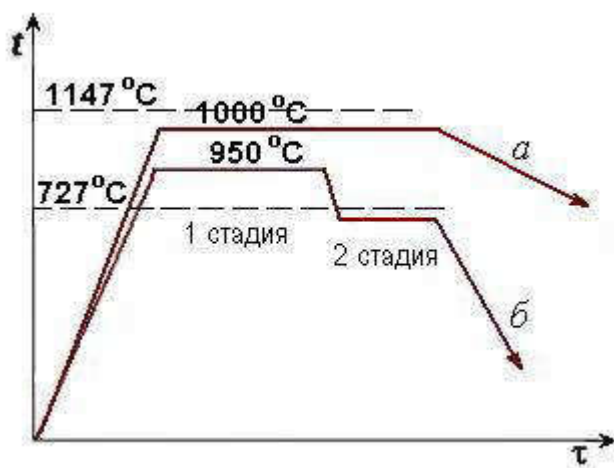
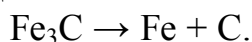


Рис. 2.73. Режимы отжига на перлитный (а) и ферритный (б) ковкий чугун

Режим отжига может быть различным. Во время выдержки при температуре 1000 °C распадается цементит эвтектики и получается перлитный ковкий чугун (рис. 2.73, режим а). Если сделать отжиг в две стадии, с выдержкой вначале немного ниже 1147 °C, а затем чуть ниже температуры перлитного превращения, то на первой стадии распадется цементит эвтектики, а на второй – цементит, входящий в перлит (рис. 2.73, режим б).

При таком режиме получается ферритный ковкий чугун, самый мягкий и пластичный (рис. 2.74, а). Отжиг на ковкий чугун – длительная процедура, он занимает до 70-80 часов. Поэтому ковкий чугун самый дорогой.

Маркировка ковких чугунов по ГОСТ 1215-92 включает характеристику не только прочности, но и пластичности. Например, КЧ45-7 означает ковкий чугун с пределом прочности при растяжении 450 МПа (45 кг/мм<sup>2</sup>) и относительным удлинением 7 %. Но несмотря на повышенную пластичность материала, название «ковкий» – условное, ковать его нельзя.

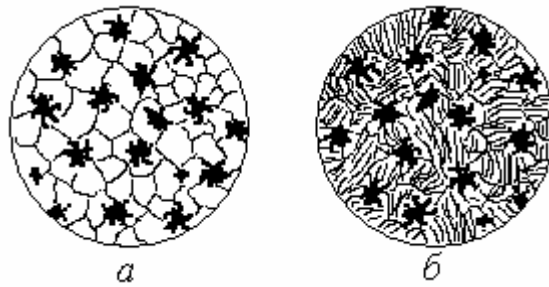


Рис. 2.74. Ферритный (а) и перлитный (б) ковкий чугун

Ковкие чугуны применяют для мелких деталей, работающих с вибрациями, ударами: крюков, скоб, картеров, ступиц и т. д.

## Лекция 12

### Термическая обработка стали

**Термическая обработка** – совокупность операций нагрева и охлаждения с целью изменить структуру и свойства сплава в нужном направлении.

Различают *упрочняющую* термическую обработку, при которой повышаются твердость, прочность и износостойкость, и *разупрочняющую* обработку, повышающую пластические свойства и вязкость, но снижающую твердость и сопротивление деформации и разрушению.

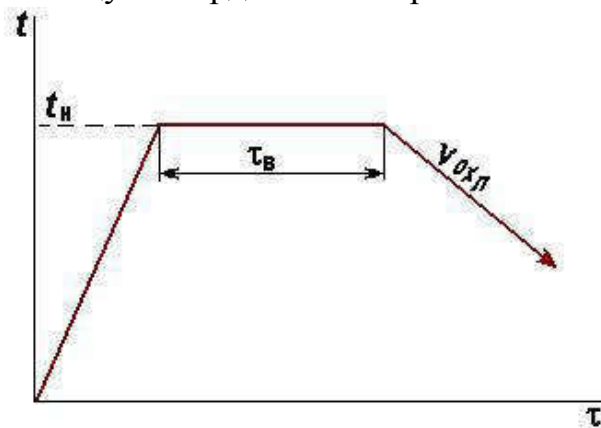


Рис. 2.75. Графическое изображение режима термической обработки

охлаждения  $v_{охл.}$  (рис. 2.75).

Термическая обработка стали основана на фазовых превращениях, происходящих при нагреве ее выше критических температур и охлаждении с различными скоростями.

Для стальных изделий широко применяются оба варианта термической обработки.

Любую операцию термической обработки можно представить графически в виде кривой в координатах «температура – время», включающей участки нагрева, выдержки и охлаждения. Главные параметры, определяющие результат термической обработки, – температура нагрева  $t_n$ , время выдержки  $\tau_в$  и скорость



### Превращения при нагреве стали

Температуры превращений, или критические точки, при нагреве стали принято обозначать (рис. 2.76):

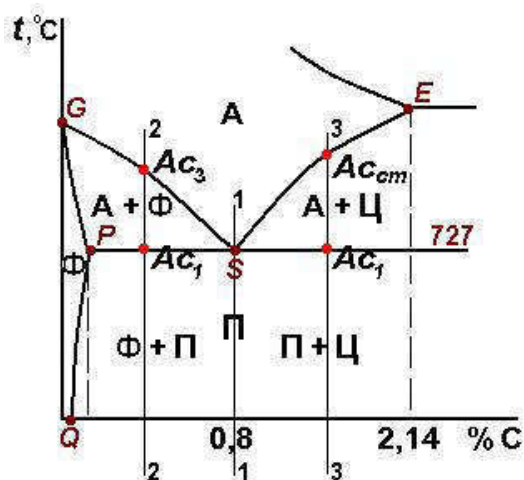


Рис. 2.76. Критические точки при нагреве стали

- начало превращения феррита в аустенит ( $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ ) –  $Ac_1$  (эти точки расположены на линии  $PSK$ );
- завершение превращения феррита в аустенит ( $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ ) –  $Ac_3$  (эти точки лежат на линии  $GS$ );
- окончание растворения цементита в аустените –  $Ac_{cm}$  (точки находятся на линии  $SE$ ).

Точки  $A_2$  относятся к магнитному, а не фазовому превращению, которое мы здесь не рассматриваем.

Следует обратить внимание на то, что точки  $Ac_3$  и  $Ac_{cm}$  – свои для каждой стали, а точка  $Ac_1$  – одна для

всех углеродистых сталей:  $727^\circ C$ .

Обозначение критических точек буквой «А» происходит от французского слова «*arreter*» – «остановка» (площадка на кривой охлаждения). Индекс «с» означает первую букву французского слова «*chauffer*» – *нагревать*; при охлаждении стали те же самые точки обозначаются индексом «r» («*refroidir*» – *охлаждать*):  $Ar_3, Ar_1$ .

Рассмотрим превращения, происходящие при нагреве эвтектоидной стали (рис. 2.76, состав 1-1).

Нагрев от комнатной температуры до линии  $PSK$  не приводит к каким-либо изменениям структуры, она остается перлитной. При достижении температуры  $Ac_1 = 727^\circ C$  начинается превращение перлита в аустенит. В ферритных участках, на границах между ферритом и цементитом, возникают зародыши новой фазы – аустенита (рис. 2.77, а). Кристаллическая решетка железа перестраивается из кубической объемно-центрированной в кубическую гранецентрированную:  $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ . Стимул превращения – разница в свободной энергии новой и старой фазы: при повышенных температурах  $\gamma$ -железо обладает меньшим запасом свободной энергии и является равновесной фазой. Превращение идет по диффузионному механизму за счет присоединения все новых атомов железа к растущему кристаллу аустенита. Цементит постепенно растворяется в образовавшихся аустенитных зернах.

Для эвтектоидной стали  $Ac_3 = Ac_1 = 727^\circ C$ , т. е. превращение начинается и заканчивается при одной и той же температуре. (Поступаю-



щая при нагреве энергия расходуется на образование новой поверхности раздела.)

Дальнейший нагрев от  $A_{c3}$  до солидуса не приводит к фазовым превращениям, но с ростом температуры растет зерно аустенита (рис. 2.77, б, в). Это объясняется тем, что в крупнозернистой структуре поверхность границ зерен меньше, поэтому меньше и поверхностная энергия, т. е. крупнозернистая структура является термодинамически более стабильной. Одновременно за счет диффузии выравнивается содержание углерода в твердом растворе (сразу после превращения бывшие ферритные и цементитные участки сильно отличаются по концентрации углерода).

При нагреве доэвтектоидной стали (рис. 2.76, состав 2-2) в перлитных участках происходят те же самые превращения при температуре  $A_{c1} = 727 \text{ }^\circ\text{C}$ . Затем, при увеличении температуры до  $A_{c3}$ , избыточный феррит постепенно превращается в аустенит путем зарождения и роста зерен новой фазы. Дальнейший нагрев сопровождается выравниванием концентрации углерода за счет диффузии и ростом зерна аустенита.

При нагреве заэвтектоидной стали (рис. 2.76, состав 3-3) отличие одно: в интервале от  $A_{c1}$  до  $A_{cm}$  происходит растворение избыточного цементита в аустените.

#### *Зерно аустенита и свойства стали*

В каждой перлитной колонии зарождается несколько зерен аустенита, поэтому при нагреве происходит измельчение зерна. Но важно помнить, что нагрев до слишком высоких температур неизбежно приведет к его росту. При этом возможно возникновение двух видов дефектов:

а) *Перегрев* – укрупнение зерна аустенита выше балла, допустимого по условиям работы детали. Перегретая сталь имеет пониженную пластичность и ударную вязкость. Но этот брак можно исправить повторным нагревом до нормальных температур.

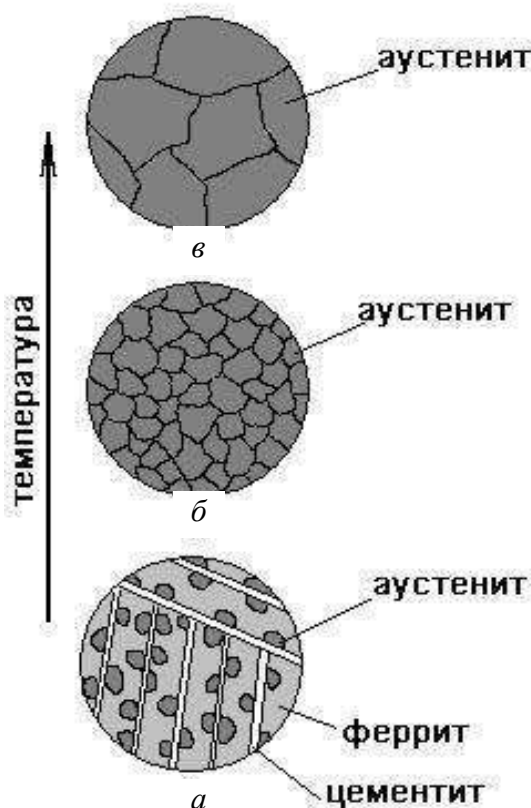


Рис. 2.77. Изменение структуры стали при нагреве

б) *Пережог* – окисление и оплавление границ зерен при температурах, близких к солидусу. Появление оксидов на границах аустенитного зерна – неисправимый брак, такая сталь имеет камневидный излом и очень высокую хрупкость. Ее отправляют на переплав.

Не во всех сталях рост зерна при нагреве идет с одинаковой скоростью. У сталей, раскисленных кремнием и марганцем, наблюдается очень быстрый рост зерна аустенита, их называют *природно-крупнозернистыми*. А стали, раскисленные еще и алюминием, являются *природно-мелкозернистыми*: до 1000–1100 °С зерно в них почти не растет.

Величина зерна влияет на все механические свойства стали, но особенно сильно – на ударную вязкость *KCU*. Чем крупнее зерно аустенита перед закалкой, тем больше вероятность возникновения трещин при закалке. И в эксплуатации такая сталь будет менее надежной, чем мелкозернистая.

Величина зерна является одним из важнейших контрольных показателей качества термической обработки. Ее оценивают номером или баллом шкалы по ГОСТу металлографическим методом, сравнивая видимую в микроскопе структуру со стандартной шкалой.

#### *Превращения аустенита при охлаждении*

Диаграммы состояния строятся для равновесного, очень медленного охлаждения. Но в практике термообработки скорость охлаждения всегда конечна. С ростом скорости охлаждения увеличивается степень переохлаждения аустенита  $\Delta t$ , т. е. превращение аустенита начинается при температуре, все более низкой по сравнению с равновесной. Здесь наблюдается такая же закономерность, как и при кристаллизации.

От степени переохлаждения зависит не только скорость протекания, но и сам механизм превращения переохлажденного аустенита, а значит, структура и свойства его продуктов.

Как правило, охлаждение осуществляется непрерывно, но изучать *кинетику* превращения (протекание процесса во времени) удобнее в *изотермических* условиях (при постоянной температуре). Поэтому для каждой стали построена своя *диаграмма изотермического превращения аустенита* в координатах «температура – время». Ее еще называют *С-образной диаграммой* (по форме кривых). Построение ведется экспериментально, по изменению каких-либо свойств, обычно магнитных. С-образная диаграмма для эвтектоидной стали (0,8 % С) приведена на рис. 2.78.

Две кривые, напоминающие по форме букву «С», показывают начало (кривая *a-a*) и окончание (кривая *b-b*) превращения аустенита в другие структуры. Слева от линии *a-a* расположена область переохлаж-

денного аустенита. Как видно из диаграммы, время существования аустенита при температурах ниже  $A_{r1}$  различно и зависит от степени переохлаждения. Минимальная устойчивость аустенита проявляется при  $\approx 550$  °С: время до начала превращения составляет всего 1 секунду. При 700 °С это время равно 10 с, а при 300 °С – уже 60 с. Справа от линии  $b-b$  – область продуктов превращения, равновесных при определенных температурах.



Рис. 2.78. Диаграмма изотермического превращения аустенита для стали с 0,8 % С

**Диффузионное (перлитное) превращение переохлажденного аустенита.** В диапазоне температур 727–550 °С (рис. 2.78, область I) процесс распада аустенита идет диффузионным путем за счет перераспределения атомов углерода в твердом растворе. Естественные колебания содержания углерода в объеме каждого зерна аустенита происходят все время, но выше температуры  $A_1$  они не приводят к фазовым превращениям. Ниже критической точки  $A_1$  аустенит становится термодинамически неустойчивым. Поэтому, как только в зерне аустенита возникает участок с повышенной концентрацией углерода, в этом участке сразу же образуется кристаллик новой фазы – цементита. Как правило, это происходит на границах зерен, где зарождение и рост новой фазы облегчается повышенной дефектностью решетки. К растущему кристаллу цементита присоединяются атомы углерода из соседних областей, и в этих обедненных углеродом участках происходит полиморфное превращение  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ . Так появляются зародыши безуглеродистой фазы – феррита.

Растущий кристалл феррита отталкивает атомы углерода, которые не могут встроиться в его решетку, поэтому рядом с ним возникает область, обогащенная углеродом, где образуется еще один кристалл цементита (см. рис. 2.79, б).

Образующиеся кристаллы феррита и цементита имеют пластинчатую форму и растут параллельно друг другу в обе стороны от границы

зерна. Одновременно зарождаются перлитные колонии и в других участках зерна аустенита (рис. 2.79, в). Диффузионное превращение продолжается до полного исчезновения исходной фазы – аустенита (рис. 2.79, г). Коротко можно записать этот процесс следующим образом:

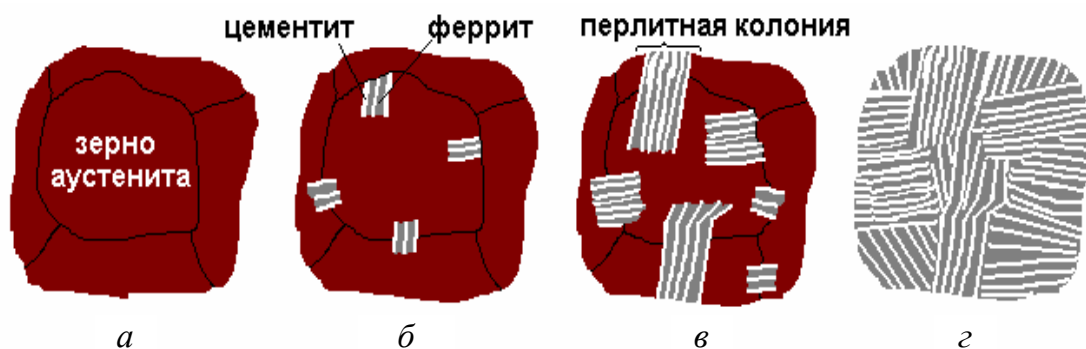
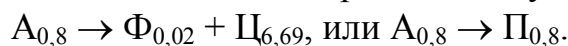


Рис. 2.79. Зарождение и рост перлитных колоний в аустените

Чем больше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения аустенита и тем больше кристалликов новых фаз возникает в единице объема каждую секунду (как и при кристаллизации). Поэтому, чем ниже температура превращения аустенита в феррито-цементитную смесь, тем мельче пластинки этих равновесных фаз. Их величину оценивают средней суммарной толщиной  $\Delta$  соседних пластинок феррита и цементита, которую называют *межпластиночным расстоянием* (рис. 2.80).

Продукты перлитного превращения по величине зерна (или по *дисперсности* структуры) условно подразделяют на перлит, *сорбит* и *троостит*. Механические свойства зависят от величины зерна: твердость и прочность стали возрастает с измельчением продуктов диффузионного распада, а пластичность и вязкость – уменьшается (табл. 2). Оптимальное сочетание пластичности и вязкости имеет сорбит.

Названия *сорбит* и *троостит* происходят от фамилий ученых Сорби и Труста, изучавших эти структуры.

Поскольку в каждом зерне аустенита возникает несколько перлитных колоний, то очевидно, что при перлитном превращении тоже происходит измельчение зерна стали.

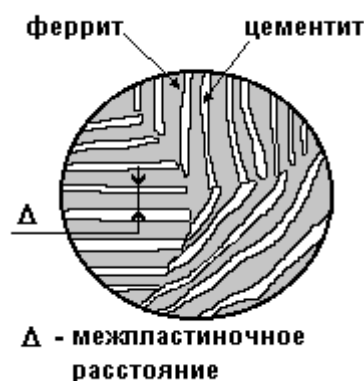


Рис. 2.80. Определение межпластиночного расстояния

Таблица 2.3

## Продукты диффузионного превращения аустенита

Структура	Температура образования, °С	Межпластиночное расстояние, мкм	Твердость, НВ
перлит	> 670	0,5–0,7	170–230
сорбит	590–640	0,3–0,4	230–330
троостит	550–580	0,1–0,2	330–400

## Лекция 13

**Бездиффузионное (мартенситное) превращение переохлажденного аустенита.** С понижением температуры коэффициент диффузии углерода в железе уменьшается. При большой скорости охлаждения можно переохладить аустенит до такой температуры, когда диффузия практически не идет. Для эвтектоидной стали это примерно 250 °С. Ниже 250 °С, в области III, превращение переохлажденного аустенита происходит по бездиффузионному механизму (см. рис. 2.78).

Горизонтальные линии, ограничивающие эту область, обозначены на диаграмме  $M_n$  и  $M_k$ .  $M_n$  – температура начала, а  $M_k$  – температура окончания бездиффузионного превращения.

Чтобы переохладить аустенит до температуры  $M_n$ , нужно достичь скорости охлаждения, превышающей величину  $V_{кр}$ . *Критическая скорость охлаждения  $V_{кр}$*  – это минимальная скорость, при которой аустенит не распадается диффузионным путем на феррито-цементитную смесь. Геометрически – это касательная к кривой начала распада (к линии *a-a*).

Переохлажденный до точки  $M_n$  аустенит претерпевает полиморфное превращение  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ , которое происходит бездиффузионно, т. е. не сопровождается перераспределением атомов углерода. Превращение развивается по *сдвиговому* механизму: за счет одновременного смещения всех атомов кристаллической решетки железа по определенным плоскостям на расстояние меньше межатомного. При этом меняется тип решетки, а соседние атомы так и остаются соседними. Весь углерод, растворенный в решетке  $\gamma$ -железа, остается после превращения в решетке  $\alpha$ -железа.

Образно можно представить разницу между диффузионным и бездиффузионным превращениями так. Если стоящим в строю солдатам командир скамандует: «Вольно! Разойдись!» – то каждый из них пойдет своим путем, независимо от остальных. Строй сломается, соседи, стоявшие рядом, окажутся далеко друг от друга. Это – диффузионное превращение. Если же команда была: «Два шага вперед! Нале-



во!» – то все солдаты шагнут и повернутся одновременно. При этом весь строй сместится на новое место, но сохранится тот же самый порядок и соседи останутся соседями. Это – бездиффузионное превращение.

В результате бездиффузионного превращения гранцентрированная кубическая решетка аустенита перестраивается в объемно-центрированную.

Но поскольку в этой решетке остается весь имеющийся в стали углерод (в данном случае 0,8 %), то каждая элементарная ячейка  $\alpha$ -железа искажается, вытягивается и из кубической становится тетрагональной (рис. 2.81). Мерой искажения решетки является так называемая *тетрагональность* – отношение высоты элементарной ячейки  $c$  к стороне основания  $a$ . Тетрагональность  $c/a$  возрастает при увеличении содержания углерода в твердом растворе.

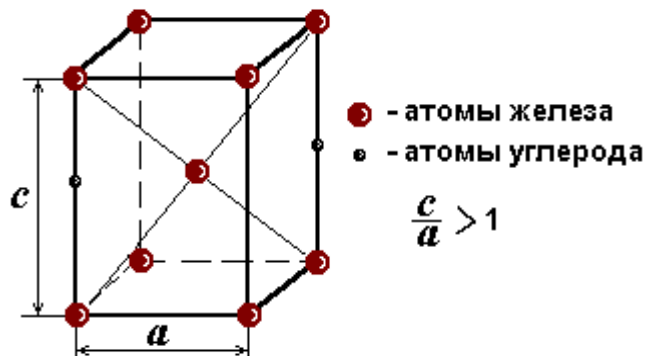


Рис. 2.81. Элементарная ячейка мартенсита

Полученная таким образом структура представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в тетрагональной решетке  $\alpha$ -железа и называется *мартенситом*.

(Название дано в честь немецкого ученого А. Мартенса.)

Мартенситный кристалл имеет форму пластины, похожей на выпуклую линзу. Первая возникшая в зерне аустенита мартенситная пластина ограничена размерами этого зерна, следующие образующиеся пластины не пересекают друг друга и не переходят через границы зерен аустенита, т. е. имеют меньший размер (рис. 2.82). Очевидно, что при мартенситном превращении, как и при перлитном, тоже происходит измельчение зерна стали.

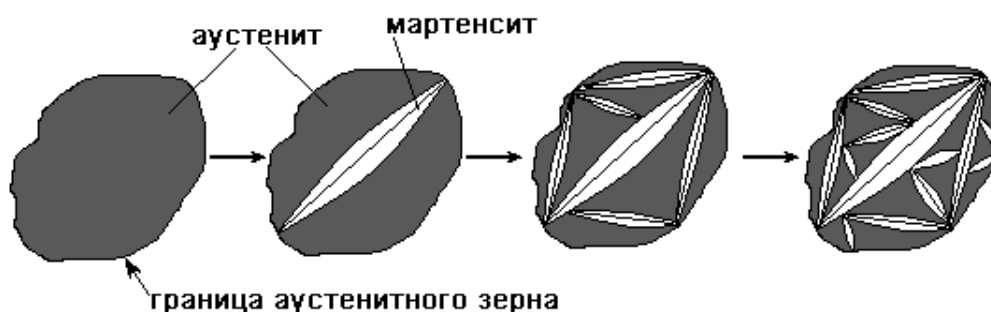


Рис. 2.82. Образование пластин мартенсита



Мартенсит имеет очень высокую твердость: при содержании углерода 0,8 % она составляет 65 HRC (670 HB), а относительное удлинение и ударная вязкость близки к нулю. Мартенсит является хрупкой структурой, пластически не деформируется и режущим инструментом не обрабатывается.

Высокая твердость мартенсита объясняется сильным упрочнением за счет одновременного действия всех четырех механизмов торможения движущихся дислокаций:

- 1) растворенными атомами углерода;
- 2) деформационным упрочнением при росте мартенситных кристаллов;
- 3) измельчением зерен;
- 4) дисперсными частицами цементита Fe<sub>3</sub>C.

Наибольший вклад в упрочнение дают искажения кристаллической решетки  $\alpha$ -железа внедренными атомами углерода. Поэтому твердость мартенсита будет тем больше, чем больше в нем углерода (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Продукты диффузионного превращения аустенита							
Содержание углерода в мартенсите, %	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Твердость, HRC	40	48	55	59	62	65	66

Пластины мартенсита образуются с огромной скоростью, равной скорости звука в стали ( $\approx 5$  км/с). Иногда возникает звуковой эффект. Характерная особенность мартенситного превращения: оно развивается только при непрерывном охлаждении до точки  $M_K$ . При увеличении содержания углерода температуры точек  $M_H$  и  $M_K$  понижаются, и мартенситное превращение смещается в область более низких температур (рис. 2.83).

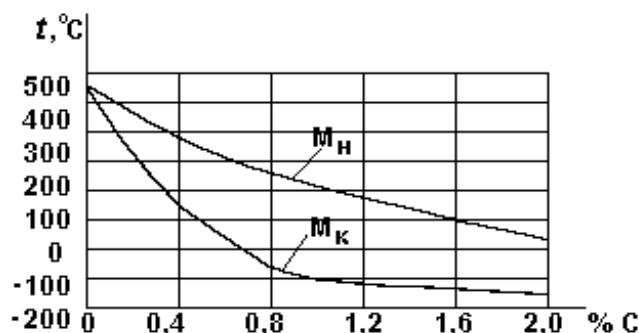


Рис. 2.83. Зависимость температур начала и окончания мартенситного превращения от содержания углерода в стали

Это означает, что в реальных условиях термической обработки весь мартенситный интервал не проходит: обычно охлаждение осуществляется до температуры цеха, т. е. до  $\approx 20$  °С. Поэтому мартенситное превращение в сталях, содержащих более 0,6 % С, до конца не доходит, и в стали после закалки остается некоторое количество аустенита. Его называют *остаточным аустенитом*.

Количество остаточного аустенита в закаленной стали зависит от содержания в ней углерода и температуры охлаждающей среды. Оно может составлять несколько процентов у высокоуглеродистых сталей и несколько десятков процентов у легированных сталей.

Для того чтобы остаточный аустенит исчез, инструментальные (высокоуглеродистые) стали обрабатывают холодом.

***Промежуточное (бейнитное) превращение переохлажденного аустенита.*** В диапазоне 500–250 °С (рис. 2.78, область II) происходит промежуточное превращение, которое начинается с диффузионных процессов, а затем продолжается бездиффузионно, как мартенситное.

Промежуточное превращение начинается с диффузии углерода, в результате чего в аустените образуются участки, обогащенные и обедненные углеродом. Затем в бедных углеродом участках процесс развивается бездиффузионным путем, как при образовании мартенсита (поскольку температура начала мартенситного превращения  $M_n$  повышается с уменьшением содержания углерода в твердом растворе). В богатых же углеродом участках аустенита образуются мельчайшие кристаллики цементита.

В результате получается структура, представляющая собой тонкие иглы феррита (или малоуглеродистого мартенсита, так как содержание углерода в нем  $\approx 0,1$  %) и мелкие частицы цементита. Она называется *бейнитом* и имеет механические свойства, промежуточные между свойствами мартенсита и перлитных структур: 370–450 НВ.

#### ***Превращения при нагреве мартенсита***

Мартенсит является неравновесной структурой. Атомы углерода, внедренные в кристаллическую решетку  $\alpha$ -железа, создают внутренние напряжения. Каждый такой атом является точечным дефектом. Кроме того, в мартенсите велика плотность дислокаций ( $10^9$ – $10^{12}$  см<sup>-2</sup>). Поэтому мартенсит обладает повышенным запасом внутренней энергии. При комнатной температуре он может сохраняться неограниченно долго, но как только нагрев придаст атомам углерода дополнительную энергию, необходимую для диффузии, начнется превращение мартенсита в более равновесные фазы.

При нагреве мартенсита углерод выделяется из  $\alpha$ -твердого раствора, образуя при этом цементит Fe<sub>3</sub>C. Мартенсит распадается на ферри-

то-цементитную смесь. В зависимости от температуры и времени превращения могут возникнуть структуры сорбита и троостита. Они имеют зернистое, а не пластинчатое строение, в отличие от сорбита и троостита, полученных при распаде переохлажденного аустенита (рис. 2.84).

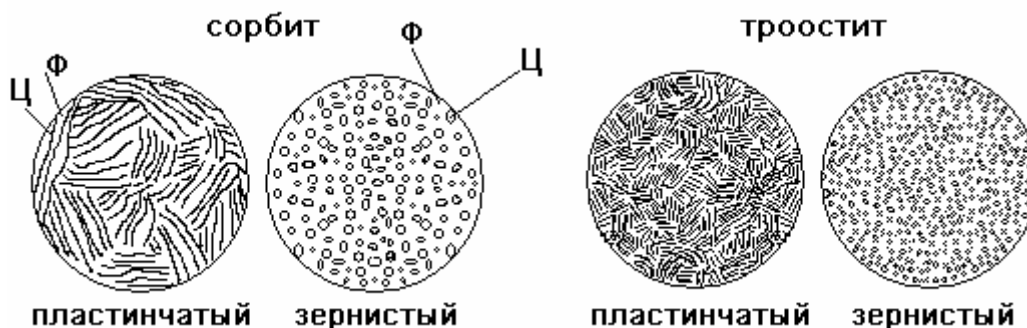


Рис. 2.84. Микроструктура пластинчатых и зернистых феррито-цементитных смесей с разной величиной зерна

Итак, при нагреве мартенсита идут следующие процессы:

- 1) снижение содержания углерода в мартенсите и образование цементита;
  - 2) уменьшение внутренних напряжений;
  - 3) рост частиц цементита;
- превращение остаточного аустенита в мартенсит (важно для сталей с содержанием углерода  $> 0,6\%$ , и особенно – для легированных).

## Лекция 14

### Основные виды термообработки стали

#### Отжиг

Отжиг является разупрочняющей термической обработкой.

**Отжигом I рода** называют нагрев стали с неравновесной в результате предшествующей обработки структурой до (или ниже) температуры фазового превращения.

Обычно причиной появления неравновесной структуры является холодная обработка давлением или ускоренное охлаждение после горячей обработки. Температурный режим отжига I рода не связан с фазовыми превращениями в стали.

**Цель:** Перевести сталь в более устойчивое, равновесное состояние.

**Пример:** рекристаллизационный отжиг для снятия наклепа; смягчающий отжиг для улучшения обрабатываемости резанием (его еще называют низким).

**Отжигом II рода** называют нагрев стали выше температуры фазового превращения с последующим медленным охлаждением (вместе с печью).

**Цель:** Получить устойчивое, равновесное состояние (как на диаграмме).

**Разновидности:**

1) *Полный отжиг* доэвтектоидных (конструкционных) сталей выполняется с целью полной фазовой перекристаллизации.

Для этого сталь нагревают на  $30-50^\circ$  выше критической точки  $A_{c3}$  (т. е. линии  $GS$ ) и после небольшой выдержки медленно охлаждают. Практически детали охлаждаются вместе с печью со скоростью  $30-100^\circ\text{C}/\text{ч}$  (рис. 2.85).

При нагревании феррит и перлит доэвтектоидной стали превращаются в аустенит. Затем, при медленном охлаждении, распад аустенита происходит в верхней части С-образной диаграммы с образованием новых зерен феррита и перлита. Таким образом, если структура была дефектная (крупные зерна, зерна искаженной формы и т. п.), то при полном отжиге она исправляется, получается однородной и мелкозернистой. Сталь после отжига имеет хорошие пластические свойства и низкую твердость. Это обеспечивает хорошую обрабатываемость стали резанием и давлением.

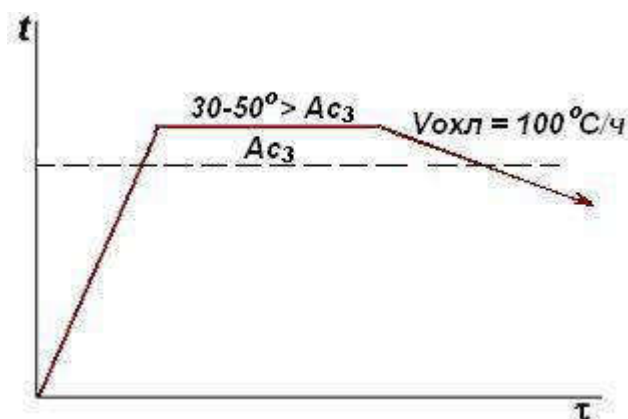


Рис. 2.85. Режим полного отжига

Отжиг полностью снимает остаточные напряжения.

2) *Неполный отжиг* заэвтектоидных (инструментальных) сталей выполняется с целью получения структуры зернистого перлита. Для этого сталь нагревают на  $30-50^\circ$  выше критической точки  $A_{c1}$  (т. е. линии  $PSK$ ). Применяют несколько различных режимов (рис. 2.86).

В результате отжига цементитные пластины растворяются только отчасти, и при охлаждении получают сферические, а не пластинчатые кристаллы це-

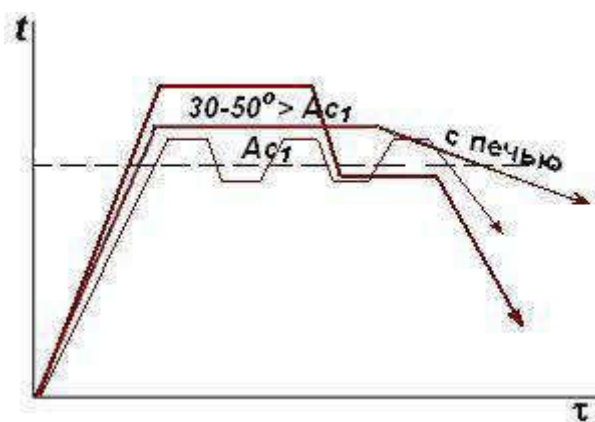


Рис. 2.86. Режим неполного отжига

ментита. Поэтому такой отжиг называют еще *сфероидизирующим*. Инструментальные стали со структурой зернистого перлита мягче и пластичнее, чем с пластинчатым перлитом. Этот способ отжига повышает обрабатываемость стали и улучшает ее структуру перед закалкой.

При неполном отжиге доэвтектоидной стали ферритная составляющая структуры не изменяется, так как феррит сохраняется при нагреве. Поэтому полного исправления структуры не происходит.

3) *Диффузионный отжиг* стальных отливок и поковок выполняют с целью устранения неоднородности литой или деформированной структуры. Устранение микроликвации достигается за счет диффузионных процессов. Поэтому, чтобы обеспечить высокую скорость диффузии, сталь нагревают до высоких температур в аустенитной области (близких к солидусу). Для сталей это чаще всего температуры 1000-1200 °С. При этих температурах делается длительная выдержка (8-15 ч) и затем медленное охлаждение. Выравнивание состава стали улучшает механические свойства, особенно пластичность.

Температурные интервалы нагрева стали при отжиге показаны на рис. 2.87.

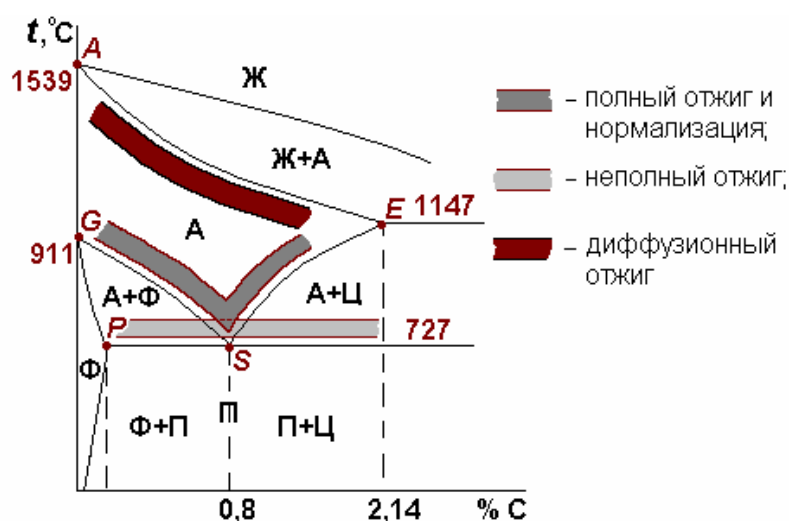


Рис. 2.87. Температурные интервалы нагрева стали при отжиге

### **Нормализация**

Нормализация является разновидностью отжига II рода с ускоренным охлаждением.

**Нормализация** заключается в нагреве стали до температур на 50-70° выше линии *GSE* (рис. 2.87) и в охлаждении на воздухе после небольшой выдержки. В этом случае распад аустенита происходит в верхней части С-образной диаграммы, но при несколько меньших температурах, чем при отжиге. Это связано с более быстрым охлаждением.

Поэтому при нормализации получается более мелкая перлитная структура, чем при полном отжиге. Может даже образоваться сорбит – более мелкая, чем перлит, феррито-цементитная смесь.

Для доэвтектоидных сталей нормализация часто заменяет полный отжиг как более производительная и экономичная операция.

После нормализации сталь тверже и прочнее, чем после полного отжига. Микроструктура тоже отличается от равновесной: феррит образует сетку вокруг участков перлита. (Кажется, что в стали больше углерода, чем есть на самом деле.)

### **Закалка**

Закалка – это упрочняющая термическая обработка, которая таким образом изменяет структуру стали, чтобы максимально повысить твердость и прочность.

**Закалка** заключается в нагреве стали выше температуры фазового превращения с последующим достаточно быстрым охлаждением (со скоростью больше критической).

Цель: получение неравновесной структуры – пересыщенного твердого раствора углерода в  $\alpha$ -железе – мартенсита. Практическая цель – получение максимальной твердости, возможной для данной марки стали.

Быстрое охлаждение при закалке необходимо, чтобы углерод не успел выделиться из твердого раствора – аустенита – и остался в решетке железа после охлаждения.

Чтобы закалить сталь, необходимо правильно выбрать температуру нагрева и скорость охлаждения. Эти два параметра являются определяющими при проведении закалки.

Чтобы закалить сталь, необходимо правильно выбрать температуру нагрева и скорость охлаждения. Эти два параметра являются определяющими при проведении закалки.

При выборе температуры нагрева действует следующее правило: доэвтектоидные стали нагреваются под закалку на 30-50° выше критической точки  $A_{c3}$ , а заэвтектоидные – на 30-50° выше точки  $A_{c1}$  (рис. 2.88). Не-

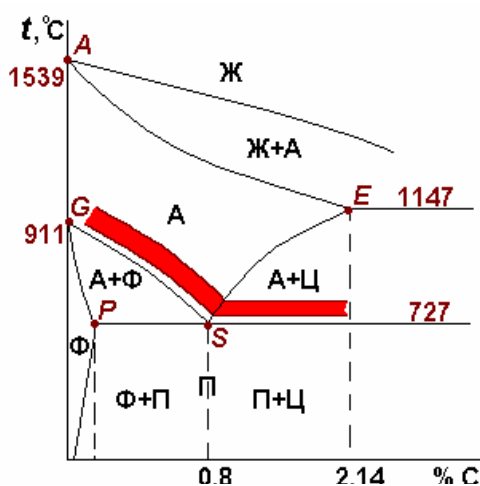


Рис. 2.88. Температурный интервал нагрева стали под закалку

большое превышение критической точки необходимо, так как в печах для термообработки неизбежны некоторые колебания температуры относительно заданного значения.

Почему закалочная температура выбирается для доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей по-разному?



В структуре доэвтектоидных сталей ниже линии  $GS$  присутствует феррит. Если закалить сталь из этой температурной области, то аустенит превратится в твердый и прочный мартенсит, а феррит не изменится, так как он является равновесной фазой. Поскольку феррит очень мягкий, то его присутствие в закаленной стали снижает ее твердость. Цель закалки не будет достигнута. Поэтому необходим нагрев до более высоких температур (выше линии  $GS$ ), где феррит уже отсутствует.

Закалка из однофазной (аустенитной) области, с температур выше  $A_{c3}$ , называется *полной*. Так закаливают доэвтектоидные (конструкционные) стали.

Для заэвтектоидных сталей такой высокий нагрев не требуется, так как выше точки  $A_1$ , но ниже линии  $SE$  структура состоит из аустенита и цементита. При закалке из этой области аустенит превратится в мартенсит, а цементит сохранится, так как он является равновесной фазой. Наличие в закаленной стали такой твердой структурной составляющей полезно, потому что мелкие частицы цементита являются дополнительными препятствиями для движения дислокаций, повышают твердость и износостойкость.

Закалка из двухфазной области, где присутствуют аустенит и цементит, или аустенит и феррит, называется *неполной*. Такой закалке подвергают заэвтектоидные (инструментальные) стали.

*Критическая скорость охлаждения* при закалке углеродистых сталей составляет не менее  $400\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Такая скорость достигается при охлаждении в воде или водных растворах солей ( $\text{NaCl}$ ) и щелочей ( $\text{NaOH}$ ), увеличивающих охлаждающую способность воды. При этом деталь необходимо энергично перемещать в закалочной жидкости, чтобы удалять с поверхности металла образующийся пар, который замедляет охлаждение. Критическая скорость охлаждения легированных сталей значительно ниже, поэтому применяют более мягкие закалочные среды – минеральные масла или растворы полимеров.

Закалка является наиболее «жесткой» из всех операций термообработки, так как сталь испытывает резкое снижение температуры. При этом в деталях возникают большие внутренние напряжения. Они складываются из термических напряжений, возникающих из-за разности температур на поверхности и в сердцевине детали при быстром охлаждении, и структурных напряжений, образующихся за счет объемных изменений при мартенситном превращении.

Эти напряжения могут привести к деформации детали и даже образованию трещин. Особенно это опасно в отношении деталей сложной формы, имеющих концентраторы напряжений в виде проточек, отверстий, углов, галтелей и т. п.

По способу охлаждения различают:

1) *Непрерывную закалку (закалку в одной среде)* – (рис. 2.89, кривая 1). Это наиболее простой способ, но при этом в детали появляются большие внутренние напряжения.

2) *Закалку в двух средах, или прерывистую закалку* (рис. 2.89, кривая 2). При этом способе сталь быстро охлаждается в интервале температур 750–400 °С, а затем деталь переносится в другую, более мягкую, охлаждающую среду, и в мартенситном интервале охлаждение происходит замедленно.

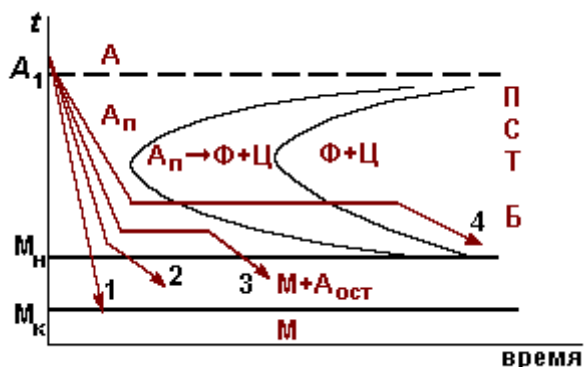


Рис. 90. Разновидности закалки по способу охлаждения

Это приводит к уменьшению внутренних напряжений и снижает вероятность появления трещин. Примером такой закалки может быть процесс с охлаждением вначале в воде, а затем в масле.

3) *Ступенчатую закалку* (рис. 2.89, кривая 3), при которой нагретую деталь погружают в жидкую среду с температурой на 20-30° выше точки  $M_n$ . При этом обеспечивается быстрое охлаждение стали в верхней области температур, а затем делается выдержка, во время которой температура по сечению детали выравнивается, и термические напряжения уменьшаются. Затем детали вынимаются из закалочной ванны, и дальнейшее охлаждение происходит в другой среде, чаще всего на воздухе или в масле. В этом случае мартенситное превращение происходит при медленном охлаждении, в условиях меньших внутренних напряжений. В качестве жидких сред для ступенчатой закалки используют расплавы щелочей, селитры, легкоплавких металлов.

4) *Изотермическую закалку* (рис. 2.89, кривая 4). Она существенно отличается от других способов. Здесь выдержка в охлаждающей среде при температуре бейнитного превращения продолжается до полного распада аустенита. Во всех предыдущих случаях при закалке происходит образование мартенситной структуры, а в этом случае – бейнита.

При изотермической закалке напряжения в детали минимальны, исключается образование трещин, деформации значительно меньше. У некоторых легированных сталей (пружинных, штамповых) этот способ закалки позволяет получать оптимальное сочетание прочности и пластичности.

Итак, ступенчатая и прерывистая закалка уменьшают закалочные напряжения, поскольку разница температур на поверхности и в центре детали уменьшается. Но из-за очень маленького периода существования

переохлажденного аустенита в углеродистых сталях ступенчатую и изотермическую закалку чаще применяют для легированных сталей.

Возможные **дефекты закалки**:

а) *перегрев* – крупное зерно;

б) *пережог* – окисление границ зерен, очень крупное зерно;

в) *недогрев* – у доэвтектоидных сталей закалка из интервала  $A_{c1}$ - $A_{c3}$  приводит к двухфазной структуре (мартенсит + феррит) и низким механическим свойствам;

г) *коробление* и *трещины* – вызываются внутренними напряжениями. Удельный объем мартенсита больше удельного объема аустенита, что вызывает напряжения в структуре стали. Особенно это опасно для деталей сложной формы и при сложении структурных напряжений с термическими, возникшими из-за разности температур на поверхности и в центре детали.

Чтобы избежать коробления, тонкие изделия – пилы, ножовочные полотна, бритвы – охлаждают заневоленными в специальных закалочных прессах.

С технологией закалки тесно связаны два важных понятия.

*Закаливаемость* – это способность стали получать высокую твердость при закалке. Закаливаемость зависит от содержания углерода в стали и характеризуется максимальной возможной твердостью (*HRC*) для данной марки.

*Прокаливаемость* – это способность стали получать закаленный слой определенной глубины. Скорость охлаждения уменьшается от поверхности детали к центру, поэтому при большой толщине детали может оказаться, что в ее сердцевине скорость охлаждения меньше критической (рис. 2.90). В этом случае на мартенсит закалится только поверхностный слой детали, а сердцевина будет незакаленной, с мягкой феррито-перлитной структурой.

Для характеристики прокаливаемости стали в справочниках приводят величину критического диаметра. *Критический диаметр* – это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в конкретной охлаждающей среде.

Чем больше прокаливаемость стали, тем лучше. Углеродистая сталь при охлаждении в воде имеет критический диаметр всего 10-15 мм. Прокаливаемость стали зависит от содержания легирующих элементов, которые затрудняют диффузионный распад аустенита, уменьшая тем самым критическую скорость охлаждения при закалке. Чем больше легирующих элементов в стали, тем выше ее прокаливаемость.

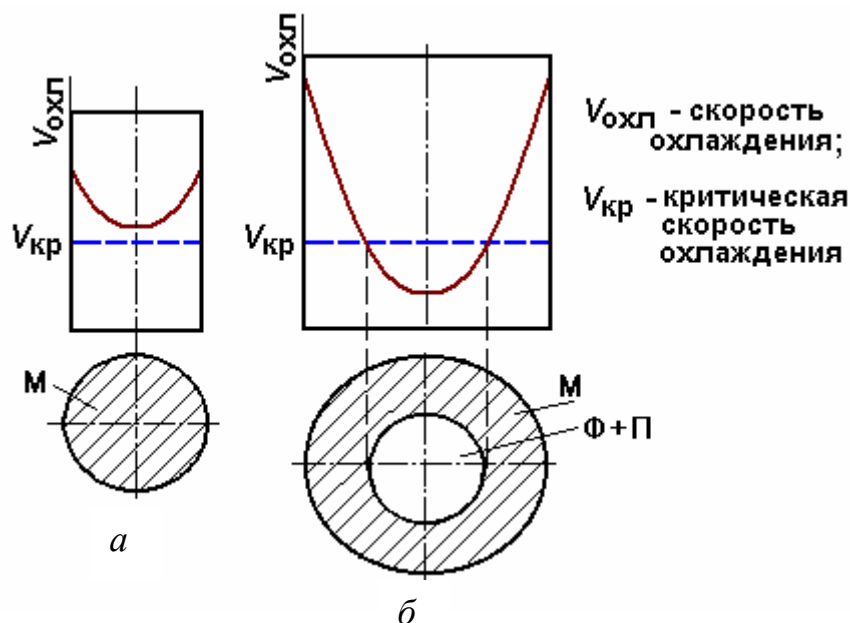


Рис. 2.90. Изменение скорости охлаждения по сечению деталей:  
 а – малого диаметра; б – большого диаметра

## Лекция 15

### Отпуск

Закаленная сталь очень твердая, но она хрупкая, у нее низкая пластичность и большие внутренние напряжения. В таком состоянии изделие не работоспособно, не надежно в эксплуатации. Поэтому для уменьшения внутренних напряжений и повышения пластичности после закалки всегда следует еще одна операция термической обработки, которая называется отпуск.

**Отпуск** – это нагрев закаленной стали до температур ниже критических с последующим охлаждением, обычно на воздухе.

Цель отпуска – создание требуемого комплекса эксплуатационных свойств стали, получение более устойчивой, чем после закалки, структуры, уменьшение внутренних напряжений.

Отпуск – последняя операция в технологической цепочке термообработки стали, поэтому полученная при отпуске структура должна обеспечивать свойства, необходимые при работе детали.

В процессе отпуска происходит распад мартенсита за счет выделения из него углерода, тем более полный, чем больше температура и время выдержки. Поэтому уменьшаются внутренние напряжения и плотность дислокаций. Остаточный аустенит при отпуске превращается в мартенсит.

По температуре нагрева отпуск подразделяется на 3 вида: низкий, средний и высокий.

При *низкотемпературном* (или *низком*) *отпуске* (150-200 °С) из мартенсита выделяется часть избыточного углерода с образованием мельчайших карбидных частиц. Но поскольку скорость диффузии здесь еще мала, некоторая часть углерода в мартенсите остается.

Такая структура представляет собой малоуглеродистый мартенсит и очень мелкие карбидные частицы. Ее называют *отпущенный мартенсит*.

В результате низкого отпуска уменьшаются внутренние напряжения, немного увеличивается вязкость и пластичность, твердость почти не снижается. Детали могут работать в условиях, где необходима высокая твердость и износостойкость.

Низкий отпуск применяют для режущего и мерительного инструмента, деталей подшипников качения.

*Среднетемпературный* (или *средний*) *отпуск* проводится при более высоких температурах – 300-450 °С. При этом из мартенсита уже выделяется весь избыточный углерод с образованием цементитных частиц. Тетрагональные искажения кристаллической решетки железа снимаются, она становится кубической. Мартенсит превращается в феррито-цементитную смесь с очень мелкими, в виде иголочек, частицами цементита, которая называется *трооститом отпуска*.

Средний отпуск еще уменьшает внутренние напряжения, увеличивает вязкость, при этом прочность остается высокой, а предел текучести и предел выносливости достигают максимума. Такому отпуску подвергают рессоры, пружины и другие упругие элементы, а также штамповый инструмент.

В интервале 500-650 °С скорость диффузионных процессов уже настолько возрастает, что при распаде мартенсита образуется феррито-цементитная смесь с более крупными, сферической формы, зернами цементита. Такой отпуск называется *высокотемпературным* (или *высоким*); получаемая структура – *сорбит отпуска*.

В результате высокого отпуска сильно возрастают вязкость и пластичность стали, внутренние напряжения снимаются почти полностью, твердость и прочность снижаются, но все же остаются достаточно высокими.

Закалка с высоким отпуском называется *термическим улучшением* стали. Такой обработке подвергают детали машин, работающие в условиях знакопеременных и ударных нагрузок: валы, рычаги, шестерни и др.

Время выдержки при низком отпуске составляет от 1 до 10-15 часов, так как при таких низких температурах диффузия углерода идет

медленно. Для среднего и высокого отпуска обычно достаточно 1-2 часа. Для дисков газовых и паровых турбин, валов, цельнокованных роторов в теплоэнергетике требуется до 8 часов, потому что их структура должна быть максимально стабильной.

Изменение механических характеристик углеродистой стали при отпуске показано на рис. 2.91.

Итак, с повышением температуры и продолжительности отпуска увеличиваются пластические свойства стали, но снижаются ее твердость и прочность. В практике термической обработки стали режим отпуска назначают в соответствии с требуемыми свойствами, которые определяются условиями работы детали.

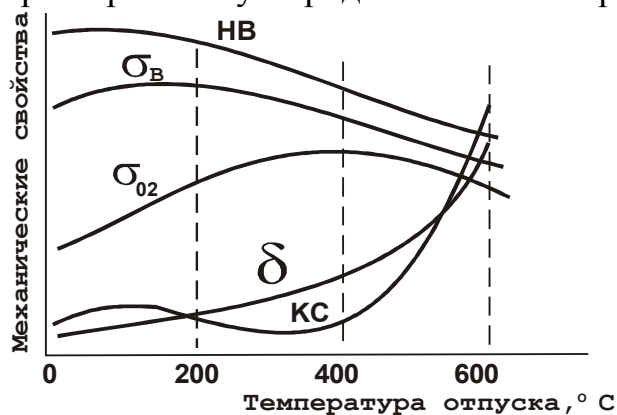


Рис. 2.91. Зависимость механических характеристик стали от температуры отпуска

#### **Поверхностное упрочнение**

Для некоторых деталей при эксплуатации необходима высокая твердость и износостойкость поверхности в сочетании с хорошей вязкостью в сердцевине. Это касается деталей, работающих в условиях износа с одновременным действием динамических нагрузок (например, шестерни, пальцы, скрепляющие звенья трака гусеничных машин).

В таких случаях подвергают упрочнению не всю деталь, а только тонкий (несколько мм) поверхностный слой.

**Поверхностная закалка** — это нагрев до закалочных температур только поверхностного слоя детали с последующим быстрым охлаждением и образованием мартенситной структуры только в этом слое.

Осуществляют такую закалку быстрым нагревом поверхности, при котором сердцевина не успевает прогреваться за счет теплопроводности. При таком нагреве температура по сечению детали резко падает от поверхности к центру.

После охлаждения в сечении детали получаются три характерных зоны с разной структурой и свойствами (рис. 2.92).

В зоне I после закалки получается мартенситная структура с максимальной твердостью, так как эта зона нагревалась выше критической температуры  $A_{c3}$ .

В зоне II после закалки в структуре, кроме мартенсита, будет присутствовать и феррит. Следовательно, твердость там будет ниже.



В зоне III нагрев и охлаждение не приводят к каким-либо изменениям структуры. Значит, здесь сохраняется исходная феррито-перлитная структура с низкой твердостью, но высокими пластическими свойствами.

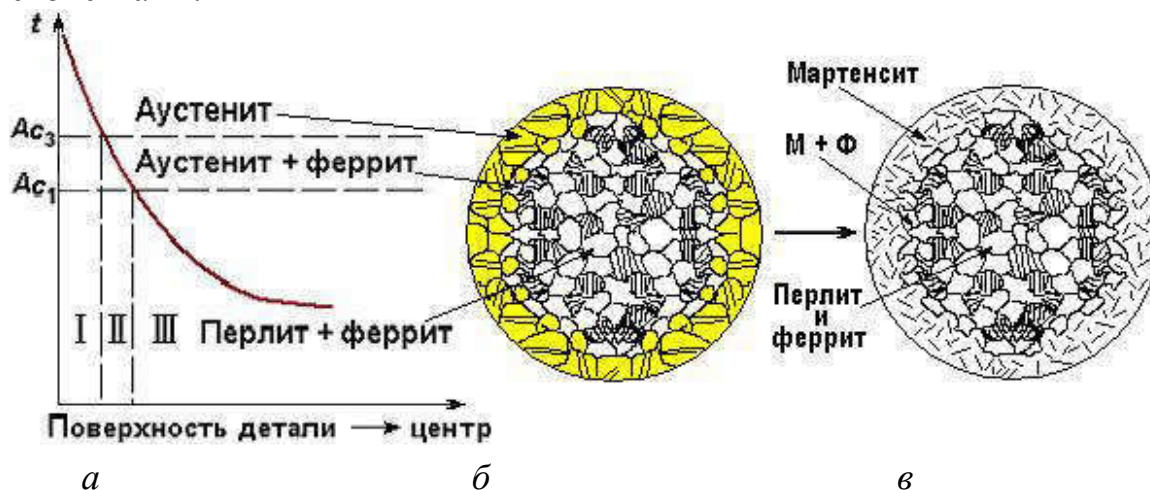


Рис. 2.92. Поверхностная закалка стали:

*a* – распределение температур по сечению; *б* – структура при поверхностном нагреве; *в* – структура после закалки

После поверхностной закалки деталь может сопротивляться динамическим нагрузкам за счет вязкой сердцевины и хорошо работать в условиях износа благодаря твердой поверхности.

Быстрый нагрев поверхности, необходимый при такой технологии, осуществляется чаще всего индукционным способом (*закалка ТВЧ*). Деталь помещается в индуктор, подключенный к генератору тока высокой частоты. Переменное магнитное поле высокой частоты наводит в тонком поверхностном слое металла вихревые токи, и нагрев осуществляется за счет сопротивления металла протеканию этих токов. Немедленно после нагрева, который длится секунды, деталь помещают в спрейер для охлаждения.

Поверхностная закалка должна сопровождаться низким отпуском.

Чем выше частота внешнего переменного магнитного поля, тем тоньше слой, в котором сосредоточены вихревые токи. Поэтому глубина закаленного слоя может легко регулироваться и составляет от десятых долей миллиметра до 3–5 мм. Операцию закалки ТВЧ можно полностью автоматизировать. Способ очень производительный; коробление и окисление поверхности детали при этом минимально.

Иногда для поверхностной закалки используют и другие способы нагрева: газопламенный, лазерный, в расплавах солей, в электролитах.

Для такого способа термообработки созданы специально стали пониженной прокаливаемости, например, 55ПП (0,55 % С и не более 0,5 % примесей).

**Химико-термическая обработка** стали (ХТО) – это диффузионное насыщение поверхности стальных деталей различными элементами с целью упрочнить поверхность и защитить металл от коррозии.

Существует много разновидностей ХТО, но в любом случае необходимо получить насыщающую атмосферу с высокой концентрацией активного элемента в атомарном виде. Атомы или ионы адсорбируются поверхностью металла, а затем за счет диффузии проникают вглубь. В результате образуется диффузионный слой, отличающийся от основного металла химическим составом, структурой и свойствами.

#### Разновидности ХТО:

1) **Цементация** – это насыщение поверхности стали углеродом. Применяется для низкоуглеродистых сталей (20, 20Х и т. д.).

Выполняется при высокой температуре – 930 °С. Атомарный углерод получают при диссоциации метана:  $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$ . Толщина науглероженного слоя составляет до 2 мм. Структура слоя – заэвтектоидная сталь (перлит и цементит).

Высокая прочность поверхности достигается после закалки и низкого отпуска цементованной детали. Твердость цементованного слоя составляет 62 HRC (или 750 HV); в сердцевине получается структура сорбита с твердостью 30-45 HRC.

Цементацию применяют для зубчатых колес, валов, пальцев.

2) **Азотирование** – это насыщение поверхности стали азотом. Применяется для легированных сталей (38Х2МЮА, 35ХЮА).

Выполняется при температуре 500-520 °С. Атомарный азот получают при разложении аммиака:  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ . Толщина азотированного слоя – не более 0,6 мм. Структура слоя – нитриды железа  $\text{Fe}_2\text{N}$  и легирующих элементов.

Азотирование является заключительной операцией, т. е. выполняется после механической обработки и закалки с отпуском. Твердость и износостойкость азотированного слоя еще выше, чем цементованного: до 1100 HV. Повышается также коррозионная стойкость. Недостаток: процесс очень длительный (десять часов).

Применяется также ионное азотирование в тлеющем разряде.

Азотируют коленчатые валы, гильзы цилиндров двигателей внутреннего сгорания.

3) **Нитроцементация** – это одновременное насыщение поверхности стали углеродом и азотом. Применяется для сталей 18ХГТ, 25ХГТ.

Температура процесса ниже, чем при цементации – 850 °С. Толщина диффузионного слоя 0,2-0,8 мм. Структура слоя – карбонитриды железа и легирующих элементов.

Закалка выполняется непосредственно из печи, где осуществлялась нитроцементация. Затем проводится низкий отпуск. Твердость нитроцементованного слоя составляет 58-62 HRC (до 700 HV). Твердость и износостойкость получают промежуточными между цементацией и азотированием.

Нитроцементацию широко применяют для обработки деталей автомобилей и тракторов.

4) *Диффузионная металлизация* – это насыщение поверхности стали металлами, повышающими жаростойкость (алюминий) и коррозионную стойкость (хром).

## Лекция 16

### Раздел II Металлические конструкционные материалы

С двумя группами металлических конструкционных материалов Вы уже познакомились: это углеродистые стали и чугуны. Кроме углеродистых, существует очень большое разнообразие марок сталей легированных. Это объясняется тем, что сталь является уникальным материалом: она сочетает высокую жесткость (модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа), статическую и циклическую прочность с достаточно высокой надежностью работы конструкций. Получать нужное сочетание механических свойств можно как за счет изменения состава стали (содержания углерода и легирующих элементов), так и путем термической и химико-термической обработки.

Другие конструкционные материалы (сплавы алюминия, магния, титана, меди, полимеры) уступают стали по жесткости, прочности, надежности.

### Легированные стали

Слово «легирование» в переводе с латинского означает «улучшение». Легирующие элементы добавляют для повышения конструкционной прочности стали и придания ей особых эксплуатационных свойств.

Для металлоконструкций и деталей, работающих в тяжелых условиях нагружения, используют легированные стали, а не углеродистые.

В первую очередь стараются применять недорогие и недефицитные элементы, особенно для деталей массового изготовления. Это *марганец, кремний, хром*. Дополнительно стали легируют элементами, сдерживающими рост зерна: *титаном, ванадием, бором*. Но для особо ответственных деталей приходится применять гораздо более дорогие и дефицитные *никель, молибден, вольфрам, ниобий* и др.

По количеству легирующих элементов стали подразделяют на *низколегированные* (содержат не более 2,5 % легирующих элементов), *легируемые* (содержание легирующих элементов от 2,5 до 10 %) и *высоколегированные* (более 10 % легирующих добавок).

В строительстве широко применяются низколегированные стали, в машиностроении – легированные. Высоколегированные стали имеют специальное назначение: коррозионно-стойкие, жаропрочные, немагнитные и т. д.

#### **Влияние легирующих элементов на свойства стали**

1. Основной структурной составляющей конструкционных сталей является феррит (до 90 %). Поэтому легирующие элементы должны в первую очередь *упрочнять феррит*. (Цементит в упрочнении не нуждается.) Максимальное упрочнение феррита создают кремний, марганец и никель (рис. 2.93, а). Эти элементы не образуют собственных карбидов, поэтому содержатся только в твердом растворе. Кремний к тому же растворяется по типу внедрения, что дает особенно эффективное упрочнение.

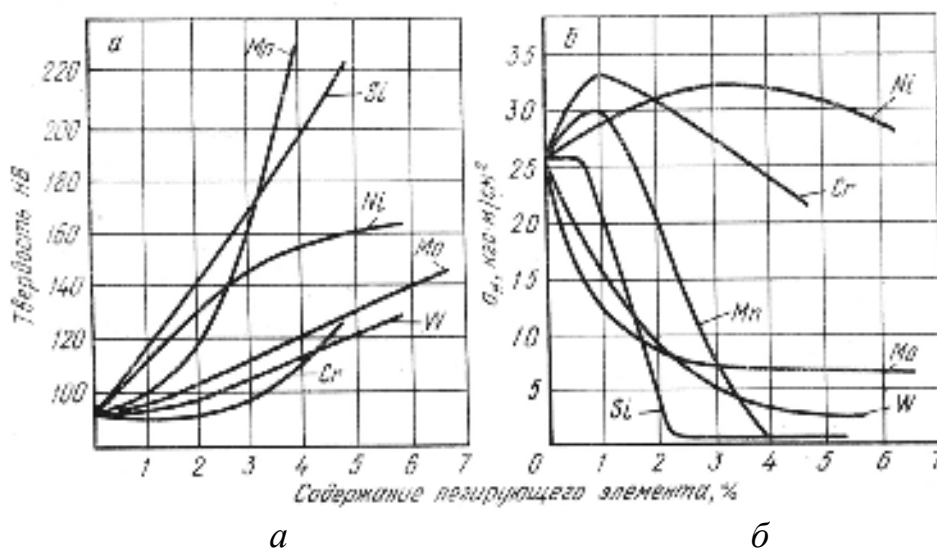


Рис. 2.93. Влияние легирующих элементов на механические свойства стали:  
а – на твердость в отожженном состоянии; б – на ударную вязкость

На пластичность легирующие элементы почти не влияют, но *снижают ударную вязкость* при добавлении их более 1 % (рис. 2.93, б).

Отсюда следует, что легирование должно быть рациональным: добавлять нужно минимально необходимое количество каждого элемента, причем предпочтительно использовать комплекс легирующих элементов, а не какой-то один.

2. Легирующие элементы *повышают критические температуры* стали, поэтому температурные интервалы термообработки для легированных сталей выше, чем для углеродистых сталей.

3. Легирующие элементы *снижают критическую скорость охлаждения* при закалке стали. Для распада аустенита углеродистой стали нужна диффузия углерода. Маленькие атомы углерода перемещаются в кристаллической решетке железа легко. А для распада аустенита легированной стали должна пройти диффузия легирующих элементов. Их атомы по размеру сравнимы с атомами железа, и диффузия идет медленнее. Переохлажденный аустенит оказывается устойчивее (рис. 2.94).

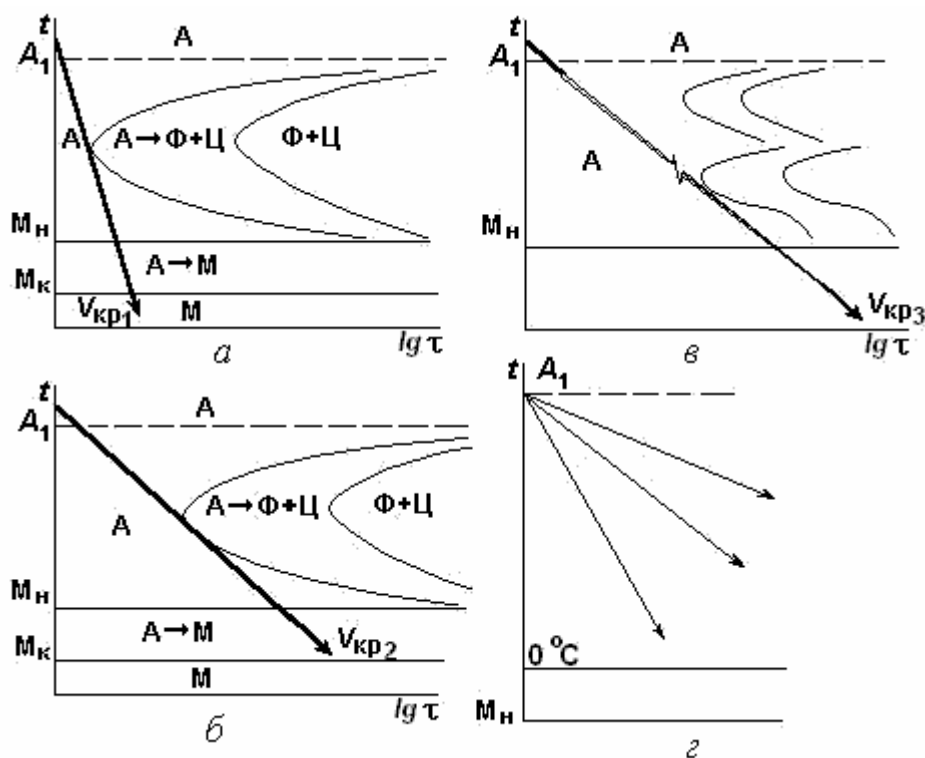


Рис. 2.94. Диаграммы изотермического распада аустенита:  
 а – углеродистая сталь (закалка в воде); б – низколегированная сталь (закалка в масле); в – высоколегированная сталь (закалка на воздухе); г – легированная Ni или Mn сталь (не закаливается)

Соотношение критических скоростей закалки сталей на рис. 2.94:

$$V_{кр3} \ll V_{кр2} \ll V_{кр1}.$$

Сталь с диаграммой, показанной на рис. 2.94, г, – аустенитного класса, точка  $M_H < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



Поэтому легированные стали можно закаливать с меньшей скоростью охлаждения, в более мягких средах. Это уменьшает деформацию изделий и опасность образования трещин.

4. Снижая критическую скорость охлаждения, легирующие элементы *увеличивают прокаливаемость* стали, особенно при комплексном легировании. Есть стали, которые прокаливаются в любом сечении. Поэтому для крупных ответственных деталей и для мелких деталей сложной формы применяют только легированные стали.

5. Легирующие элементы *измельчают зерно стали*. Это способствует увеличению прочности, пластичности, ударной вязкости, снижает порог хладноломкости. Десятые доли процента ванадия, титана, ниобия, циркония особенно сильно измельчают зерно, так как образуют трудно растворимые в аустените карбиды.

6. Легирующие элементы *повышают устойчивость мартенсита к отпуску*. После отпуска при одинаковой температуре легированные стали будут прочнее (легирующие элементы упрочняют феррит и образуют более мелкие карбидные частицы, чем цементит).

7. Легирующие элементы *придают сталям особые физические и химические свойства*: коррозионную стойкость, высокую упругость, износостойкость, способность не окисляться при нагреве, особые магнитные свойства и т. п.

#### **Маркировка легированных сталей**

В начале марки ставится число, указывающее содержание углерода в сотых долях процента. Затем идут буквы, обозначающие легирующие элементы. За каждой буквой следует цифра: содержание этого легирующего элемента в целых процентах. При содержании 1-1,5 % цифра не ставится. Буква «А» в конце марки означает пониженное содержание вредных примесей.

А – азот (в середине марки)	К – кобальт	Т – титан
Б – ниобий	Н – никель	Ф – ванадий
В – вольфрам	М – молибден	Х – хром
Г – марганец	П – фосфор	Ц – цирконий
Д – медь	Р – бор	Ч – РЗМ
Е – селен	С – кремний	Ю – алюминий

«А» в начале марки означает автоматную сталь (для скоростной обработки на станках-автоматах).

#### **Строительные низколегированные стали**

Эти стали содержат не более 0,22 % С и небольшое количество не дефицитных легирующих элементов: Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V, Ti. Никель и медь добавляют потому, что они понижают порог хладноломкости и увеличивают коррозионную стойкость.



Марки: 09Г2С, 14Г2, 15ГФ, 15ХСНД, 10ХНДП. Низкое содержание углерода необходимо для хорошей свариваемости. Они прочнее углеродистых сталей. Имеют низкий порог хладноломкости. Их применение позволяет экономить металл в строительных конструкциях.

Поставляют в виде листов и сортового фасонного проката, иногда в нормализованном состоянии.

Есть сталь 16Г2АФ – она содержит ванадий и азот, поэтому в ней образуется карбонитрид ванадия, что способствует сохранению очень мелкого зерна (11-12 балл) и низкому порогу хладноломкости.

Примеры применения:

Мосты для автотранспорта – 15ХСНД, 16Г2АФ; сварные резервуары и ёмкости – 10Г2С1, 12Г2СМФ; трубы большого диаметра – 17ГС в нормализованном состоянии, для менее ответственных труб применяют горячекатаную сталь.

#### ***Цементуемые стали***

Содержат 0,15-0,25 % С, суммарное содержание легирующих элементов – не более 6-7 %.

После цементации, закалки и низкого отпуска цементованный слой должен иметь твердость 58-62 HRC, а сердцевина – 30-42 HRC.

Для мелких деталей простой формы применяют хромистые стали: 15Х, 20Х, 20ХФ. Они прочнее аналогичных углеродистых.

Для крупных, ответственных деталей, работающих с динамическими нагрузками, используют стали с никелем: 12ХНЗА, 12Х2Н4А.

Сталь 18Х2Н4ВА прокаливается практически в любом сечении, при любой скорости охлаждения в ней получается мартенситная структура. Ее порог хладноломкости –80 °С: выше этой температуры излом вязкий. Она предназначена для крупных тяжело нагруженных деталей (например, коленвал тепловозного двигателя).

Для средненагруженных зубчатых колес в автомобильной и тракторной промышленности, в станкостроении применяют стали 18ХГТ, 25ХГТ, 25ХГМ.

#### ***Улучшаемые стали***

Это стали для очень широкого круга деталей: коленчатых валов, осей, штоков, шатунов, деталей турбин и компрессоров. Содержат 0,3-0,5 % С.

Термообработка: закалка с высоким отпуском. Структура – сорбит. Имеют высокий предел текучести, предел выносливости, ударную вязкость, сопротивление росту трещины. Механические свойства зависят от термообработки, особенно – от температуры отпуска.

Средненагруженные детали, работающие без больших динамических нагрузок, делают из сталей 30Х, 40Х, 50Х, 40ХФА.

Для ответственных сварных конструкций применяют *хромансили* – 20ХГС, 25ХГС, 30ХГС. Они имеют высокую прочность и хорошую свариваемость.

Стали с никелем обладают высокой прокаливаемостью, пределом текучести и ударной вязкостью. Это 40ХН, 50ХН, 40ХН2МА. Они работают при динамических нагрузках, при отрицательных температурах. Из них делают валы и роторы турбин, детали компрессоров и редукторов.

#### ***Автоматные стали***

Это стали для массового производства мелких неотчетственных деталей (крепеж и т. п.). Они позволяют проводить обработку резанием с большой скоростью, увеличить стойкость инструмента и повысить качество поверхности.

Стали А12, А20, А40Г содержат повышенное количество серы (до 0,3 %), фосфора (до 0,05 %), марганца. Дело в том, что сульфиды марганца способствуют образованию короткой и ломкой стружки и оказывают смазывающее действие на резец. Фосфор дополнительно увеличивает твердость и охрупчивает сталь. В массовом производстве важно, чтобы стружка была мелкой и сыпучей (стружка надлома, а не скалывания или сливная), поэтому пришлось пойти даже на ухудшение механических свойств стали.

Легируют автоматные стали также Pb (АС14), Se, Te, Ca, но все эти добавки понижают конструкционную прочность стали. Зато скорость резания увеличивается на 40 % при неизменной стойкости инструмента. Или можно увеличить стойкость в 2-7 раз при постоянной скорости резания.

#### ***Рессорно-пружинные стали***

Они должны иметь высокий модуль упругости  $E$ , предел упругости  $\sigma_y$  и предел выносливости  $\sigma_{-1}$ . (Надо не забывать, что именно модуль упругости определяет жесткость материала, его сопротивление упругой деформации:  $E = \sigma/\delta$ .)

Рессорно-пружинные стали имеют повышенное содержание углерода по сравнению с другими конструкционными сталями: 0,5-0,7 %.

Термообработка: закалка и отпуск на троостит (420-500 °С), либо изотермическая закалка на нижний бейнит.

Мелкие пружины делают из углеродистых сталей 65–85 и 60Г–70Г.

Более крупные пружины и рессоры (толщиной до 18 мм) – из сталей 55С2, 60С2, 70С3А.

Для ответственных пружин и рессор автомобилей применяют стали 50ХФА, 50ХГФА.

Для тяжело нагруженных, крупных, особо ответственных пружин – 60С2ХА и 60С2Н2А.

Выбор легирующих элементов: кремний упрочняет феррит, марганец увеличивает прокаливаемость, хром и ванадий уменьшают склонность к росту зерна при нагреве, никель позволяет работать в условиях динамических нагрузок.

Для повышения предела выносливости готовые пружины и рессорные листы наклепывают дробеструйной обработкой. В поверхностном слое создаются напряжения сжатия, что повышает  $\sigma_{-1}$  в 1,5-2 раза.

#### ***Шарикоподшипниковые стали***

Подшипники качения – ответственные детали станков, автомобилей, электродвигателей, определяющие их точность и производительность. Шарики или ролики, катясь по наружному и внутреннему кольцам, испытывают истирание и контактную усталость. Поэтому главные свойства шарикоподшипниковых сталей – высокая твердость, износостойкость и сопротивление контактной усталости.

Для достижения этих свойств нужна высокоуглеродистая хромистая сталь ШХ15 (1 % С и 1,5 % Cr). Для крупных колец используют сталь ШХ15СГ (1 % С, 1,5 % Cr, 0,5 % Si и 1,5 % Mn): она прокаливается на большую глубину.

Типичная причина отказа узла – разрушение шариков или роликов и усталостное выкрашивание их поверхности. Поэтому очень важно, чтобы сталь не содержала неметаллических включений – источников разрушения. Для этого применяют электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплав: ШХ15-Ш, ШХ15-ВД.

Термообработка заключается в закалке с охлаждением в масле и низком отпуске. Структура: мартенсит и мелкие карбиды. Твердость колец и роликов должна составлять 60-65 HRC, шариков – 62-66 HRC.

#### ***Износостойкие стали***

Это стали для деталей, работающих в условиях абразивного трения, высокого давления и ударов: траков гусеничных машин, ковшей экскаваторов, крестовин железнодорожных рельсов.

В таких условиях применяют высокомарганцевую литую аустенитную сталь 110Г13Л (1,1 % С и 13 % Mn). После закалки в воде эта сталь имеет структуру аустенита, она мягкая и вязкая. Но в процессе эксплуатации при ударных нагрузках в аустените возникает множество дефектов, и он упрочняется. Кроме того, под действием напряжений происходит мартенситное превращение. Твердость с 200 HB возрастает до 600 HB.

Но в условиях чисто абразивного износа эта сталь неэффективна. Применяют карбидные сплавы (до 4 % С, много Cr, W, Ti), в структуре

которых до 50 % составляют карбиды. Но это уже не стали. Их применяют в литом виде и как наплавочные материалы.

## Лекция 17

### Жаропрочные стали

Это стали для деталей, работающих в условиях повышенных температур (свыше  $0,3T_{пл}$ ). Детали парогенераторов, газовых турбин должны работать при таких температурах длительно и надежно.

**Жаропрочность** – способность материала противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах, т. е. длительно сопротивляться деформированию и разрушению.

Нагрев ослабляет межатомные связи в металле. Поэтому снижается модуль упругости  $E$ , пределы прочности и текучести, твердость. Поведение металла в этих условиях определяется диффузионными процессами. Как следствие, возникает явление **ползучести**: при напряжениях, меньших предела текучести, медленно нарастает пластическая деформация (рис. 2.95).

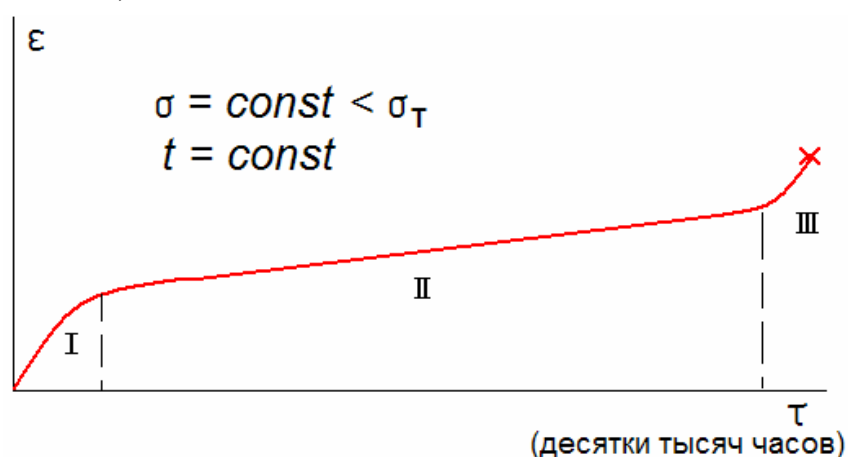


Рис. 2.95. Кривая ползучести:

- I – неустановившаяся стадия (скорость деформации велика, но постепенно затухает);
- II – установившаяся стадия (скорость деформации мала и постоянна);
- III – стадия разрушения (скорость деформации резко возрастает)

Разумеется, III стадия недопустима при работе изделия. Задача выбора и обработки жаропрочного материала состоит в том, чтобы сделать II стадию как можно длиннее (десятки и сотни тысяч часов). Если при постоянном напряжении увеличивать температуру эксплуатации (или наоборот), то II стадия сокращается и разрушение наступает быстрее.

Жаропрочность оценивается следующими критериями:

$\sigma_{1/100000}^{550} = 100$  МПа – *предел ползучести* (запись означает, что при напряжении 100 МПа и температуре 550 °С деформация не превысит 1 % за 100 тыс. часов);

$\sigma_{10000}^{600} = 130$  МПа – *предел длительной прочности* (при температуре 600 °С металл выдержит напряжение 130 МПа в течение 10 тыс. часов, а дальше – не гарантируется).

Предел длительной прочности всегда меньше  $\sigma_B$ , определенного при кратковременном испытании при той же температуре (и, тем более, меньше стандартной характеристики  $\sigma_B$ ).

Для перлитного класса жаропрочных сталей предел ползучести при 550 °С за 100 тыс. часов ниже 100 МПа; предел длительной прочности для мартенситного и мартенсито-ферритного класса сталей может достигать 180 МПа.

Ползучесть может развиваться следующими способами:

1) за счет *движения дислокаций* (скольжения и переползания – перемещения дислокаций вверх или вниз относительно плоскости скольжения);

2) за счет *зернограничного скольжения*, когда идет сдвиг зерен относительно друг друга вдоль общих границ (это возможно только при мелком зерне);

3) за счет *диффузионного переноса атомов* вдоль растянутых границ зерен. У растянутых границ зерен легче образуются вакансии, поэтому туда устремляются атомы из других граничных областей (рис. 2.96).

Для повышения жаропрочности необходимо ограничить подвижность дислокаций и замедлить диффузию.

Структура жаропрочного материала должна быть крупнозернистой (с меньшей протяженностью границ), с однородным распределением мелких упрочняющих частиц внутри зерен и на границах.

Дисперсные частицы повышают жаропрочность эффективнее, чем твердый раствор. Чем мельче частицы и меньше расстояния между ними, тем эффективнее упрочнение.

Идеальным для работы при повышенных температурах является монокристалл. Уже используют лопатки газовых турбин, представляющие собой единое монокристаллическое образование. Ограничением для широкого применения является высокая цена.

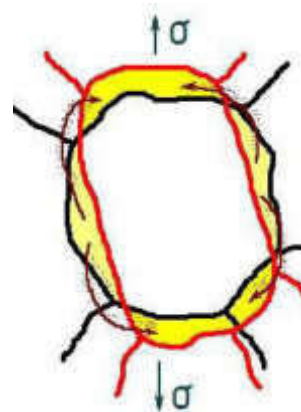


Рис. 2.96. Диффузия вдоль растянутых границ зерен

Поликристаллические материалы упрочняют малыми добавками компонентов, которые располагаются по границам зерен и уменьшают скорость диффузии (бор, церий, редкоземельные металлы). В никелевых сплавах для этой цели служат карбиды.

ГЦК-решетка железа сопротивляется ползучести лучше, чем ОЦК, так как межатомные связи в ней прочнее. Полигонизованная структура тоже затрудняет развитие ползучести.

Предельные рабочие температуры металлических конструкционных материалов:

Алюминиевые сплавы	300-350 °С
САП (спеченная алюминиевая пудра)	500-550°С
Магниевые сплавы	300-350 °С
Титановые сплавы	500-600 °С
Стали	450-700 °С
Никелевые сплавы	700-1000 °С

При температурах свыше 1000 °С могут работать тугоплавкие металлы и керамика (SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, графит).

Основой котлостроения являются *перлитные жаропрочные стали*. Они применяются при температурах до 580 °С. Технологичны, недороги. Содержат 0,25-0,3 % С и легирующие элементы: хром, молибден, ванадий.

Марки: 12Х1МФ, 25Х2М1Ф.

Критерий жаропрочности:  $\varepsilon = 1\%$  за  $10^4$  или  $10^5$  часов.

Структура: легированный феррит и равномерно распределенные в нем частицы карбидов (пластинчатой формы). Недопустимые изменения структуры – появление зернистого перлита, рост карбидов, образование графита. Все эти изменения ведут к снижению прочности и развитию ползучести.

Термическая обработка направлена на создание максимально стабильной структуры, так как эксплуатироваться изделия в теплоэнергетике должны годами. Стали подвергают нормализации при 1000 °С и высокому отпуску при 650-750 °С в течение 2-3 часов.

Из перлитных жаропрочных сталей изготавливают трубы пароперегревателей, паропроводов и других частей теплоэнергетических установок, а также валы и цельнокованные роторы, плоские пружины, крепеж.

*Мартенситные жаропрочные стали* прочнее и выдерживают температуру до 650 °С. Это так называемые *сильхромы* (например, 40Х10С2М), легированные хромом и кремнием, а также 11Х11Н2В2МФ, 15Х11МФ, 18Х12ВМБФР. Последние имеют  $\sigma_{10000}^{550} = 150 \div 170$  МПа.



Сильхромы стойки к окислению в парах и топочных газах. Критерий жаропрочности – предел ползучести с допустимой деформацией  $\varepsilon = 0,1 \%$  за  $10^4$  или  $\varepsilon = 1 \%$  за  $10^5$  часов. Их закаливают с  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  и отпускают при  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Применяют для клапанов ДВС.

Они плохо свариваются и труднее перлитных сталей обрабатываются резанием.

*Аустенитные жаропрочные стали* работают до  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Подразделяются на однофазные (12X18H10T), стали с карбидным упрочнением и стали с интерметаллидным упрочнением.

Надо отметить, что, вдобавок к ползучести, при воздействии высоких температур идет *релаксация (снижение) напряжений*. Затянутые резьбовые соединения ослабевают, так как идет пластическая деформация, и доля упругой деформации снижается.

#### ***Жаростойкие стали***

***Жаростойкостью*** называют способность металла сопротивляться коррозионному воздействию газов при высоких температурах.

С повышением температуры и скорости движения газовой среды возрастает скорость окисления. Полированные поверхности окисляются медленнее.

Удовлетворительная жаростойкость у Cu, Fe, Ni, Mo: они образуют плотные, но дефектные оксидные пленки.

Хорошая жаростойкость у Al, Zn, Sn, Pb, Cr, Mn, Be: оксидные пленки на их поверхности плотные, с хорошими защитными свойствами.

Отличной жаростойкостью обладают Ag, Au, Pt.

Низкая жаростойкость Mo, W, Ta, Nb не позволяет использовать их без жаростойких покрытий в качестве жаропрочных материалов.

Чистое железо имеет предельную рабочую температуру на воздухе  $560 \text{ }^\circ\text{C}$ . Легированные стали – до  $1000\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для повышения жаростойкости стали легирующий элемент должен иметь большее сродство к кислороду, чем основа сплава.

Жаростойкие ферритные стали: 08X17T, 15X25T (нежаропрочные); жаростойкие аустенитные стали: 20X23H18, 20X25H20C2 (имеют хорошую жаропрочность).

В различных печах применяют детали из сплавов X13Ю4 (до  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ ), X23Ю5T (до  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ), нихрома X20H80 (до  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Из нихрома делают муфели, нагреватели, направляющие, детали конвейеров.

#### ***Коррозионно-стойкие стали***

***Коррозия*** – это разрушение металлов под действием окружающей среды. В коррозионно-стойких сталях этот процесс идет с малой скоростью.

*Электрохимическая коррозия* идет в растворах электролитов: влажной почве, атмосфере, в морской и речной воде. Металл растворя-

ется из-за коррозионного тока между более и менее электроположительными участками сплава.

Электроположительными, не подверженными электрохимической коррозии, являются металлы: Pt, Au, Ag, Cu (а также Sn и Pb во многих средах). Но и электроотрицательные металлы тоже могут противостоять коррозии: Ti, Al, Cr. Они *пассивируются*, т. е. образуют защитные пленки оксидов на поверхности.

В коррозионно-стойких сталях основным легирующим элементом является хром. Его количество должно превышать 12,5 %, так как только при таком содержании он образует сплошную пленку оксида  $Cr_2O_3$  на поверхности стали, и скорость коррозии резко снижается (рис. 2.97).

При нормальной температуре во влажном воздухе, воде, некоторых кислотах используют *хромистые стали*:

12X13 (штампо-сварные емкости, арматура),

20X13 и 30X13 – шестерни, пружины, валы,

40X13 – хирургический и бытовой режущий инструмент.

Сталь 12X13 относится к мартенсито-ферритному классу:  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение проходит не полностью; 20X13 и остальные – мартенситного класса, имеет полное  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение.

Термообработка хромистых сталей состоит в закалке и высоком отпуске.

При повышенной температуре в тех же средах применяют *хромоникелевые стали*: 12X18Н10Т, 17X18Н9 и др. Благодаря никелю их структура после закалки – аустенит. Титан должен связывать углерод, чтобы хром находился в твердом растворе, а не в карбидах. Иначе, при недостатке хрома в твердом растворе, возникает опаснейшее явление: *межкристаллитная коррозия*. Причиной является выделение карбидов хрома на границах зерен при нагреве. Границы обедняются хромом (<12,5 %), и развивается коррозия. Эти стали свариваются и штампуются, можно делать трубопроводы, емкости, оболочки, вакуумные камеры.

Стали 04X18Н10, 08X18Н10, 12X18Н10Т считаются стабилизированными (не склонными к межкристаллитной коррозии). Сталь 17X18Н9 склонна к межкристаллитной коррозии, ее можно использовать только до 400 °С и нельзя сваривать. В некоторых марках дефицитный никель частично заменен марганцем: 10X14Г14Н4Т.

Термообработка сталей – закалка в воде.

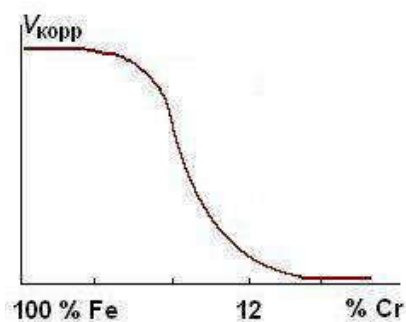


Рис. 2.97. Зависимость скорости коррозии стали от содержания хрома

## Цветные металлы и сплавы

Именно с цветных металлов началось применение металлов человеком. Вначале это были самородные металлы: медь, золото, серебро, затем олово и свинец.

Характерные особенности цветных металлов:

- окраска,
- большая пластичность,
- низкая твердость,
- низкая температура плавления,
- отсутствие полиморфных превращений.

Общепринято подразделение цветных металлов на следующие группы:

Благородные	Легкие	Легкоплавкие	Тугоплавкие
Pt, Ag, Au, [Cu]	Be, Mg, Al, [Ti]	Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg	W, Mo, Ta, Nb

*Благородными*, или драгоценными называют металлы, очень трудно поддающиеся окислению, при обычных условиях не вступающие в химические реакции. «Драгоценные» – относительное понятие: еще в XIX в. платина, месторождения которой имеются на Урале, вовсе не считалась драгоценным металлом, в отличие от золота: из нее делали ковши, обручи и другие хозяйственные изделия.

*Легкие* металлы имеют малый удельный вес и, соответственно, высокую удельную прочность.

*Легкоплавкие* металлы имеют низкие температуры плавления, применяются обычно для литых изделий. Самый легкоплавкий металл – ртуть ( $t_{пл} = -39\text{ }^\circ\text{C}$ , при комнатной температуре является жидкостью).

*Тугоплавкие* металлы имеют температуры плавления выше, чем у железа. Самый тугоплавкий металл – вольфрам ( $t_{пл} = 3410\text{ }^\circ\text{C}$ ). Надо заметить, что не все ученые-металловеды относят тугоплавкие металлы к цветным, некоторые считают их черными или выделяют в отдельную группу.

### *Алюминий и его сплавы*

Алюминий относится к легким металлам:  $\gamma = 2,7\text{ г/см}^3$ .  $t_{пл} = 660\text{ }^\circ\text{C}$ . Достоинствами алюминия являются малая плотность, высокая электропроводимость, большая удельная прочность. Например, сплав алюминия В96 имеет предел прочности  $\sigma_B = 700\text{ МПа}$  и удельную прочность  $\sigma_B/\gamma = 23\text{ км}$ . (Для стали эта характеристика не превышает 15 км.)

По объему производства алюминий и его сплавы занимают второе место в мире после железа.

Полезные свойства *технического алюминия* применяется в следующих областях:

- 1) высокая пластичность – для получения тонких фольг (упаковка, обкладки конденсаторов, декоративное применение);
- 2) высокая электропроводимость (65 % от проводимости меди) – в электротехнике (линии электропередач, жилы кабелей);
- 3) высокая коррозионная стойкость (пленка оксида  $Al_2O_3$  толщиной 10 мкм защищает поверхность металла) – в быту, для хранения продуктов питания, агрессивных жидкостей;
- 4) высокая отражательная способность – для изготовления прожекторов, рефлекторов, экранов ТВ;
- 5) высокая теплопроводность – для изготовления теплообменников в холодильниках.

Примеры изделий: трубопроводы, палубные надстройки судов, провода, кабели, шины, рамы, стеллажи, стойки, офисная мебель, цистерны (молочные и др.).

Алюминий с большинством легирующих элементов образует химические соединения и ограниченные твердые растворы. Сплавы алюминия подразделяют на *литейные* и *деформируемые, упрочняемые и не упрочняемые* термической обработкой. Обобщенная диаграмма состояния алюминий – легирующий элемент (рис. 2.98) позволяет подразделить сплавы следующим образом:

- Д – деформируемые сплавы,
- Л – литейные сплавы,
- Н – не упрочняемые термообработкой сплавы,
- У – упрочняемые термообработкой сплавы.

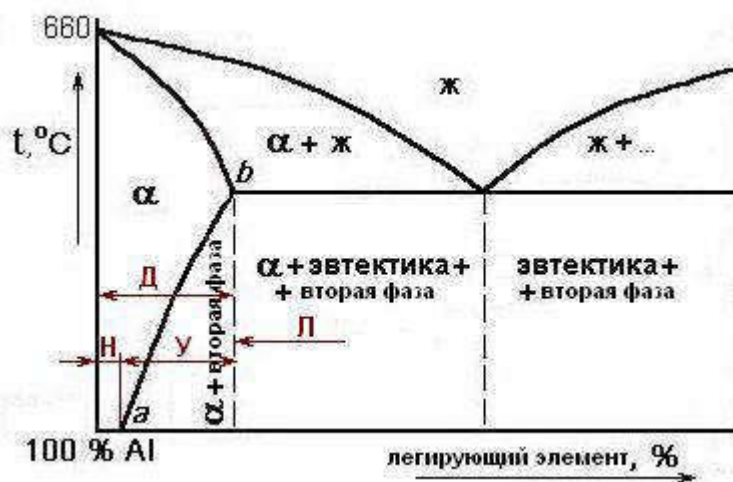


Рис. 2.98. Диаграмма состояния алюминий – легирующий элемент

1. Деформируемые сплавы алюминия, не упрочняемые термической обработкой.

Это сплавы с магнием и марганцем. Марки обозначаются АМг и АМц. Применяются для изделий, получаемых глубокой вытяжкой и сваркой, т. е. штампованных конструкций. Сварка производится неплавящимся вольфрамовым электродом в аргоне или электроконтактная. Пластичные, коррозионно-стойкие. Упрочняются за счет наклепа. Способны к структурному упрочнению (пресс-эффект: выделение мелких интерметаллидных частиц при обработке давлением).

Примеры изделий: сварные емкости, трубопроводы бензина и масла, рамы, кузова, корпуса и мачты судов.

2. Деформируемые сплавы алюминия, упрочняемые термической обработкой.

Это, прежде всего, самые распространенные алюминиевые сплавы – дуралюмины. Слово «дуралюмин» в переводе с французского означает «твердый алюминий». Обозначаются дуралюмины буквой «Д» и порядковым номером марки. Кроме того, в эту группу входят ковочные алюминиевые сплавы (обозначение АК), авиали (АВ), высокопрочные алюминиевые сплавы (В).

Марки дуралюминов: Д1 – нормальный, Д16 – «супердуралюмин», Д18 – заклепочный. Все они содержат медь (около 4 %), магний и марганец.

Медь – главный легирующий элемент, поэтому превращения в сплавах можно рассмотреть на примере диаграммы состояния Cu – Al (рис. 2.99).



Рис. 2.99. Диаграмма состояния алюминий – медь

Фазы, равновесные при комнатной температуре:  $\alpha$ -твердый раствор меди в алюминии,  $\text{CuAl}_2$  – химическое соединение, интерметаллид. Эвтектика состоит из этих двух фаз:  $\Xi = \alpha + \text{CuAl}_2$ .

Линия  $ab$  – линия предельной растворимости меди в кристаллической решетке алюминия. Сплавы под этой кривой (от 0,2 до 5,7 % Cu) могут упрочняться термообработкой: закалкой и старением. Но механизм упрочнения здесь иной, чем у сталей, закаливаемых на мартенсит.

В отожженном сплаве частицы  $\text{CuAl}_2$  довольно крупные; сплав мягок и пластичен (см. рис. 2.101,  $a$ ).

При нагреве под закалку (выше линии  $ab$ ) частицы  $\text{CuAl}_2$  растворяются, атомы меди (и других легирующих элементов) образуют твердый раствор замещения в решетке алюминия.

При быстром охлаждении, подавляющем диффузию (в холодной воде), твердый раствор сохраняется, но при комнатной температуре он становится пересыщенным ( $\alpha'$ ), см. рис. 2.101,  $b$ . Его твердость и прочность невелики, всего на 25 % выше, чем у отожженного сплава, так как это – твердый раствор замещения.

С течением времени при комнатной температуре происходит *естественное старение*: в пересыщенном твердом растворе появляются участки, обогащенные медью. Вокруг них кристаллическая решетка искажается, что затрудняет перемещение дислокаций (рис. 2.101,  $b$ ). Сплав становится прочнее. Естественное старение идет 5-7 суток.

При нагреве такой процесс идет быстрее. Это – *искусственное старение*. Чем выше температура искусственного старения, тем быстрее идет распад твердого раствора. В участках, обогащенных медью, формируются частицы  $\text{CuAl}_2$ . При повышении температуры и увеличении выдержки зернышки  $\text{CuAl}_2$  растут. Расстояние между ними увеличивается, и эффект упрочнения снижается, так как  $\Delta\sigma_T \sim \frac{1}{R}$ , где  $R$  – расстояние между частицами.

На самом деле процессы при старении дуралюмина развиваются в несколько этапов (табл. 2.5). Вначале образуются только обогащенные медью и магнием участки в твердом растворе. Их называют *зонами Гинье-Престона (ГП)* по именам ученых, открывших это явление. Они представляют собой диски диаметром 4-6 нм и толщиной несколько атомных слоев (зоны ГП-1). При естественном старении этим все и заканчивается. Но при повышенной температуре или длительной выдержке эти зоны растут, и размещение атомов в них становится упорядоченным (зоны ГП-2). Более высокие температуры приводят к образованию на месте этих зон тонких пластин промежуточной фазы  $\theta'$  состава  $\text{CuAl}_2$ , но с дру-

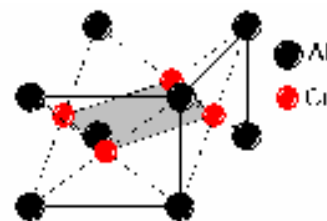


Рис. 2.100. Кристаллическая решетка фазы  $\text{CuAl}_2$



гим типом кристаллической решетки. Наконец, при 200-250 °С образуется стабильная  $\theta$ -фаза  $\text{CuAl}_2$  (рис. 2.100).

Таблица 2.5

Структура и свойства дуралюмина после старения

Вид старения	$t, ^\circ\text{C}$	Изменения в структуре	Изменение свойств
Естественное и низкотемпературное искусственное старение	$\leq 100-150$	Зоны ГП1	$\uparrow \sigma_T; \sigma_T/\sigma_B \leq 0,7;$ $\uparrow \delta, KCU$ , коррозионная стойкость
Длительное искусственное старение	100-150	Зоны ГП2	
Искусственное старение	150-200	$\theta'$ -фаза	$\sigma_T/\sigma_B$ до 0,95; $\downarrow \delta, KCU$ , коррозионная стойкость
Искусственное старение	200-250	$\theta$ -фаза	

Такие же процессы идут и в других сплавах на основе алюминия. Разница только в составе и строении образующихся фаз.

Итак, упрочняющая термообработка дуралюмина: закалка с 500-510 °С, естественное старение 5-7 суток или искусственное старение (для сплавов, работающих при повышенной температуре).

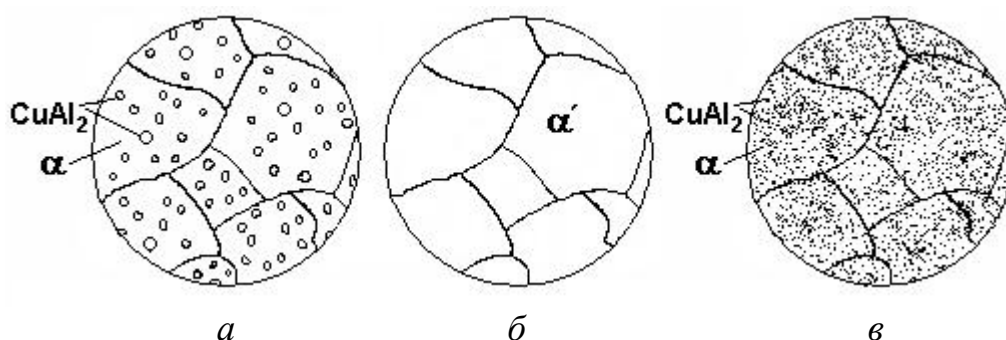


Рис. 2.101. Микроструктура дуралюмина:  
 $a$  – после отжига;  $b$  – после закалки;  $v$  – после старения

В результате закалки и естественного старения дуралюмин Д16 приобретает прочность  $\sigma_B = 540$  МПа, что превышает прочность некоторых сталей обыкновенного качества.

Сплав *авиаль* (АВ) – менее прочный, чем дуралюмин, но более пластичный (содержит  $\leq 0,5$  % Cu и Si).

*Ковочные алюминиевые сплавы* (АК) содержат те же компоненты, что и дуралюмин, и, кроме того, кремний. Детали получают ковкой или штамповкой при 450-475 °С, затем следует закалка и искусственное старение. Применяют для изготовления деталей сложной формы.

*Высокопрочные алюминиевые сплавы* (В95, В96) после термической обработки имеют  $\sigma_B = 600-700$  МПа; предел текучести почти равен пределу прочности. Это сплавы системы Al – Zn – Mg – Cu, иногда с

добавлением Cr или Zr. Для повышения коррозионной стойкости листы плакируют чистым алюминием с добавкой 1 % Zn.

Все алюминиевые сплавы этой группы – авиационные. Из них делают лопасти винтов, шпангоуты, тяги управления, обшивку самолетов, стрингеры, лонжероны.

### *3. Литейные алюминиевые сплавы.*

Маркируются буквами АЛ. Цифра после букв означает номер марки. Содержат кремний, медь или магний.

*Силумины* – сплавы алюминия с кремнием – имеют наилучшие литейные свойства. Для измельчения зерна их модифицируют натрием (смесью солей NaCl + NaF).

Некоторые литейные сплавы можно упрочнять термической обработкой. Для разных видов литья разработаны различные сплавы (например, специально для литья под давлением).

Применяют, в основном, для сложных тонкостенных отливок: деталей автомобильных двигателей (картеры и блоки цилиндров, корпуса компрессоров).

### *4. Жаропрочные алюминиевые сплавы.*

Работают до 300 °С (поршни, крыльчатки, детали компрессоров турбореактивных двигателей, обшивка сверхзвуковых самолетов).

Состав сложный: содержат железо, никель, титан, цирконий. Могут быть как деформируемыми, так и литейными.

У некоторых сплавов температура рекристаллизации выше температур деформирования и закалки, т.е. полигонизованная структура сохраняется после формообразования и термообработки. Это дает структурное упрочнение на 30-40 % по сравнению с рекристаллизованными сплавами.

Ежегодно в мире производится около 20 млн. т алюминия. В России алюминий выпускает Красноярский, Волгоградский, Иркутский и другие алюминиевые заводы. В декабре 2006 г. в Абакане (Хакасия) сдан в эксплуатацию алюминиевый завод мощностью 300 тыс. т в год, первое подобное предприятие за последние 20 лет.

## ***Лекция 19***

### ***Титан и его сплавы***

Титан сложно отнести к какой-то одной разновидности цветных металлов. Он является тугоплавким ( $t_{пл} = 1669\text{ °C}$ ), в то же время его можно считать легким ( $\gamma = 4,5\text{ г/см}^3$ ). Не будучи благородным металлом, он отлично сопротивляется коррозии в различных средах. Как и железо, титан испытывает полиморфное превращение:  $Ti_{\alpha}$  с ГПУ решеткой при 882 °С превращается в  $Ti_{\beta}$  с ОЦК решеткой.

Титан широко распространен в земной коре: он занимает четвертое место после алюминия, железа и магния. Но промышленное применение этого уникального металла началось только в 1950-х годах, в основном, для военных целей. Это объясняется сложностью извлечения титана из руд, многоступенчатым процессом очистки, что ведет к весьма высоким ценам на металл (примерно в 90 раз дороже железа).

Достоинствами титана являются:

- небольшая плотность,
- очень высокая удельная прочность (сплав ВТ15 имеет предел прочности  $\sigma_B = 1500$  МПа и удельную прочность  $\sigma_B/\gamma \geq 30$  км),
- высочайшая коррозионная стойкость (кроме концентрированных серной, азотной и плавиковой кислот),
- высокая ударная вязкость даже при отрицательных температурах ( $KCU = 1-1,6$  МДж/м<sup>2</sup> при температуре жидкого водорода – 253 °С),
- способность сплавов упрочняться термической обработкой.

Недостатки титана, как конструкционного материала:

- высокая стоимость (бедные руды, сложный металлургический передел),
- активное взаимодействие с газами при высокой температуре,
- низкое значение модуля упругости  $E$  (примерно в 2 раза меньше, чем у железа),
- плохая обрабатываемость по сравнению со сталью.

Тем не менее, технология получения изделий из титановых сплавов литьем, обработкой давлением и резанием, сварка титана непрерывно развиваются и совершенствуются.

Основные легирующие элементы в титановых сплавах: Al, V, Mo, Cr, Zr, Mn. Алюминий в титановых сплавах играет такую же важную роль, как углерод в стали. Легирующие элементы могут стабилизировать низкотемпературную  $\alpha$ -фазу или высокотемпературную фазу  $\beta$ . Растворимость компонентов в титане с изменением температуры меняется, поэтому возможна упрочняющая термообработка (для разных сплавов это либо закалка и отпуск, либо закалка и старение).

При медленном охлаждении превращение  $Ti_\alpha \rightarrow Ti_\beta$  идет за счет диффузии – путем зарождения центров новой фазы и их роста. При быстром – развивается сдвиговой механизм, как при мартенситном превращении в стали. Получаемая структура тоже называется мартенситом и имеет игольчатую структуру. Но титановый мартенсит не обладает такой высокой твердостью и прочностью, как мартенсит в стали. Он имеет довольно высокую пластичность. Дело в разной природе твердых

растворов: углерод образует с железом раствор внедрения, а алюминий с титаном – замещения.

Возможно также сохранение при комнатной температуре переохлажденной  $\beta$ -фазы (подобно аустениту в сталях). В некоторых сплавах образуется эвтектид, но он хрупок и не улучшает механических свойств сплава.

Марки титановых сплавов: ВТ4, ВТ6, ВТ15, ВТ22 (один из самых прочных:  $\sigma_b = 1300-1600$  МПа).

Области применения сплавов титана:

1) авиа и ракетостроение (обшивка сверхзвуковых самолетов, корпуса двигателей, баллоны для газов, сопла, диски и лопатки компрессора авиационного двигателя, детали фюзеляжа, крепеж, корпуса второй и третьей ступеней ракет);

2) химическая промышленность (компрессоры, клапаны, вентили, баллоны для сжиженных газов и агрессивных жидкостей);

3) судостроение (гребные винты, обшивка морских судов и подводных лодок);

4) оборудование для обработки ядерного топлива;

5) криогенная техника (работающая при очень низких температурах).

#### *Медь и ее сплавы*

Медь – тяжелый металл ( $\gamma = 8,9$  г/см<sup>3</sup>) с ГЦК решеткой; полиморфных превращений не имеет. Температура плавления 1083 °С. Ее можно назвать «самым цветным» металлом: поверхность красная, излом розовый.

*Чистая медь* применяется чаще всего в электротехнике и электронике. Медь обладает высокой электропроводимостью, поэтому используется как проводник тока (шины, жилы кабелей, обмотки электродвигателей, контакты).

Высочайшая теплопроводность позволяет делать из меди водоохлаждаемые тигли, кристаллизаторы, поддоны, изложницы.

Медь проявляет коррозионную стойкость в атмосфере, морской, речной и водопроводной воде, в других агрессивных средах.

Технологические свойства меди не очень высоки: она очень пластична и легко обрабатывается давлением, но плохо – резанием, литейные свойства низкие (дает большую усадку), плохо сваривается, но зато хорошо паяется.

Прочность меди низкая: от 160 МПа в литом состоянии до 240 после горячей деформации. Но проволока при волочении может наклепываться до 450 МПа.

Медь поставляется в виде проката: листов, прутков, труб, проволоки.

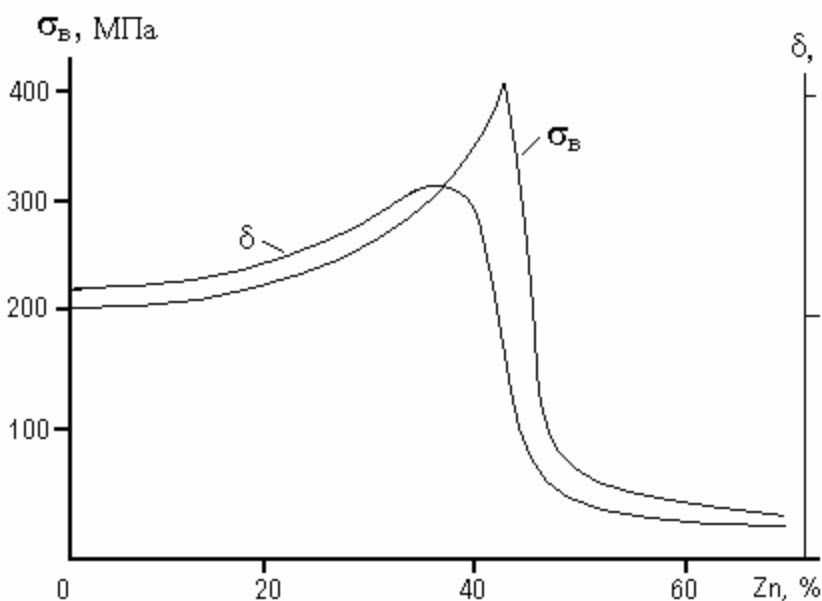
Медные сплавы – это твердые растворы на основе меди. Они и прочнее, и пластичнее чистой меди. Прочность медных сплавов равна прочности низкоуглеродистой стали в отожженном состоянии (450 и 500 МПа соответственно).

Все медные сплавы подразделяются на две группы: латуни и бронзы.

1. *Латуни* – сплавы меди с цинком. Если кроме цинка других легирующих элементов нет, то это *простая латунь*; если есть и другие добавки – *специальная*.

Цинк растворяется в меди до 39 %, образуя фазу  $\alpha$  – твердый раствор замещения. При добавлении свыше 39 % Zn образуется  $\beta$ -фаза CuZn с ОЦК решеткой (упорядоченный твердый раствор на базе электронного соединения). При этом повышается прочность, но пластичность резко снижается (рис. 2.102).

Применяют латуни с содержанием цинка не более 45 %, так как



при большей концентрации структура состоит из одной только хрупкой  $\beta$ -фазы.

*Однофазные*, или  *$\alpha$ -латуни* пластичны; изделия из них получают холодным деформированием. Это всевозможные детали, получаемые листовой штамповкой, а также

Рис. 2.102. Зависимость механических свойств латуни от содержания цинка

про-волока, ленты, радиаторные трубки, гильзы патронов, электротехнические детали.

*Двухфазные*, или  *$(\alpha+\beta)$ -латуни* прочнее и тверже, но менее пластичны; изделия получают литьем или горячей пластической деформацией. Это различные литые и штампованные заготовки, которые затем обрабатываются резанием (паровая и водяная арматура).

Маркировка латуни включает содержание меди, а не легирующего элемента (цинка), как у большинства сплавов: Л96 (96 % Cu), Л80 (80 % Cu), ЛАН59-3-2 (59 % Cu, 3 % Al, 2 % Ni, остальное –цинк).

Латуни с содержанием цинка до 10 % называются *томпак*, до 20 % – *полутомпак*. Это пластичные сплавы красивого золотистого цвета, используются для художественных и ювелирных изделий.

Для изготовления отливок применяется ЛК80-3Л – литейная латунь с максимальной жидкотекучестью (содержит 3 % Si). Для деталей судов используют «морскую латунь» ЛО70-1 с 1 % Sn, стойкую к коррозии в морской воде.

Добавки никеля и железа повышают прочность латуни до 550 МПа.

Латунь сохраняет пластичность и вязкость при отрицательных температурах.

2. *Бронзы* – сплавы меди с любыми элементами, кроме цинка. Классические бронзы – оловянистые (до 10 % Sn). Они дороги. Сложные по составу бронзы дешевле. Например, антифрикционная бронза БрОЦС4-4-2,5 (4 % Sn, 4 % Zn, 2,5 % Pb).

Строение сплавов меди с оловом сложное: твердые растворы, интерметаллиды, имеется эвтектоидное превращение.

По технологии получения изделий бронзы подразделяют на *литейные* (для антифрикционных деталей и пароводяной арматуры) и *деформируемые*, однофазные (для упругих элементов – мембран, пружин).

Алюминиевые бронзы (9-10 % Al) применяют для мелких ответственных деталей (шестерен, втулок, фланцев, а также медалей и монет).

Кремнистые бронзы (3-4 % Si) – заменители оловянных, имеют высокие упругие свойства. Из них делают пружины.

Свинцовые бронзы – антифрикционные, для вкладышей подшипников скольжения.

Бериллиевая бронза БрБ2 имеет очень высокую упругость и предел прочности  $\sigma_b = 1100-1200$  МПа. Применяют для часовых и приборных пружин, упругих контактов.

Интересно старинное подразделение бронз в зависимости от содержания олова:

- БрО5 – монетная бронза, из нее чеканили монеты и медали;
- БрО20 – пушечная бронза для стволов артиллерийских орудий;
- БрО30 – колокольная бронза;
- БрО40 – зеркальная бронза.



**Раздел III Неметаллические конструкционные материалы****Ограничения в применении металлов**

Металлические конструкционные материалы прочны и надежны в эксплуатации, технологичны и во многих случаях экономически эффективны. Но металлы обладают, тем не менее, рядом существенных недостатков, ограничивающих их применение.

Во-первых, многие металлы и сплавы подвержены коррозии в агрессивных средах. Высокая тепло- и электропроводимость металлов тоже не всегда является достоинством, так как необходимы и теплоизолирующие, и электроизолирующие материалы. Металлические материалы не всегда обеспечивают необходимую твердость и износостойкость в условиях трения. Во многих случаях недостаточной оказывается жаропрочность и жаростойкость металлов. Наиболее прочные металлические материалы имеют большую плотность, т. е. не позволяют получить высокую удельную прочность, необходимую для авиа- и космической техники. Наконец, технологическая цепочка от добычи руды до готового металлического изделия очень длинна по времени, включает огромное число операций и является весьма трудоемкой.

Поэтому во многих случаях применяют неметаллические материалы. Их обычно подразделяют на полимеры (пластмассы), керамики и стекла, о чем говорилось на первой лекции.

**Полимеры, или пластмассы**

**Пластмассы** – искусственные твердые материалы, получаемые на основе органических полимерных связующих веществ. Имеют большую молекулярную массу (свыше 10 000).

**Состав пластмасс**

1) *Связующее* – обязательный компонент. Это синтетические смолы или эфиры. Простые пластмассы (органическое стекло, полиэтилен, полипропилен) состоят почти из одного связующего.

2) *Наполнители*. Их содержание может достигать до 70 %. Могут быть порошковыми (сажа, графит, тальк, древесная мука), волокнистыми (хлопковые, стеклянные, асбестовые волокна), листовыми (бумага, ткани, древесный шпон). Наполнители повышают механическую проч-

ность, снижают стоимость пластмасс и придают им нужные эксплуатационные свойства.

3) *Стабилизаторы*. Они нужны, чтобы макромолекулы полимеров не изменяли свою пространственную структуру, и свойства пластмасс с течением времени не менялись.

4) *Пластификаторы*. Их добавляют в количестве до 20 %. Они улучшают формуемость пластмасс, снижают хрупкость. Это обычно олеиновая кислота, стеарин, дибутилмтафталат.

5) *Отвердители*. Их добавляют в пластмассы на основе терморезактивных смол в качестве катализаторов отверждения. Это органические перекиси.

6) *Специальные добавки* – красители, смазки, антистатики, добавки против горения, против плесени и др.

#### *Свойства пластмасс*

*Достоинствами пластмасс* по сравнению с другими конструкционными материалами являются:

- малая плотность;
- высокая удельная прочность  $\sigma_v/\gamma$ ;
- химическая стойкость;
- электроизоляционные свойства;
- теплоизоляционные свойства;
- меньшая трудоемкость переработки пластмасс по сравнению с переработкой металлов: изделие и материал создаются одновременно;
- меньшее количество отходов, чем при переработке металлов (коэффициент полезного использования материала не менее 0,9);
- как правило, не нужны отделочные операции.

При замене металлических деталей пластмассовыми масса снижается в 4–5 раз, трудоемкость уменьшается тоже в 4–5 раз, число операций уменьшается в 5–6 раз. Себестоимость снижается в 2–3 раза.

#### *Основные недостатки пластмасс:*

- ограниченная теплостойкость: максимальная температура эксплуатации термопластов – 250 °С (фторопласт-4), а терморезактивных пластмасс – около 400 °С (стеклотекстолит);
- малая жесткость и вязкость;
- склонность к старению, т. е. к изменению свойств с течением времени.

#### *Структура полимеров*

Структурной единицей в полимерах является *макромолекула*, состоящая из огромного числа одинаковых групп атомов – звеньев. Каждое звено – это измененная молекула исходного низкомолекулярного веще-

ства – мономера. В полимере молекулы мономера объединяются друг с другом и образуют длинные цепочки, в которых атомы соединены ковалентными связями.

К примеру, полимер полиэтилен  $(-CH_2-CH_2-)_n$ , макромолекулы которого состоят из звеньев  $CH_2$ , получают полимеризацией  $n$ -го числа молекул мономера – газа этилена  $CH_2=CH_2$ . Число  $n$  составляет тысячи.

На схематичных изображениях макромолекул ковалентная связь показывается черточкой: «—» (рис. 2.103).

Свойства полимеров определяются не только химическим составом, но и строением и взаимным расположением молекул.

*Линейные* макромолекулы – это цепочки с отношением длины к поперечному размеру свыше 1000 (рис. 2.104, а). Они могут образовывать зигзаги, спирали или перепутываться. Между макромолекулами действует слабая межмолекулярная связь, обусловленная силами Ван-дер-

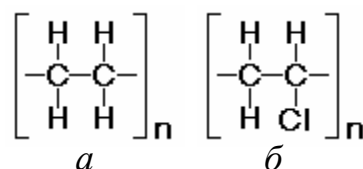


Рис. 2.103. Схематичные изображения макромолекул полиэтилена (а) и поливинилхлорида (б)

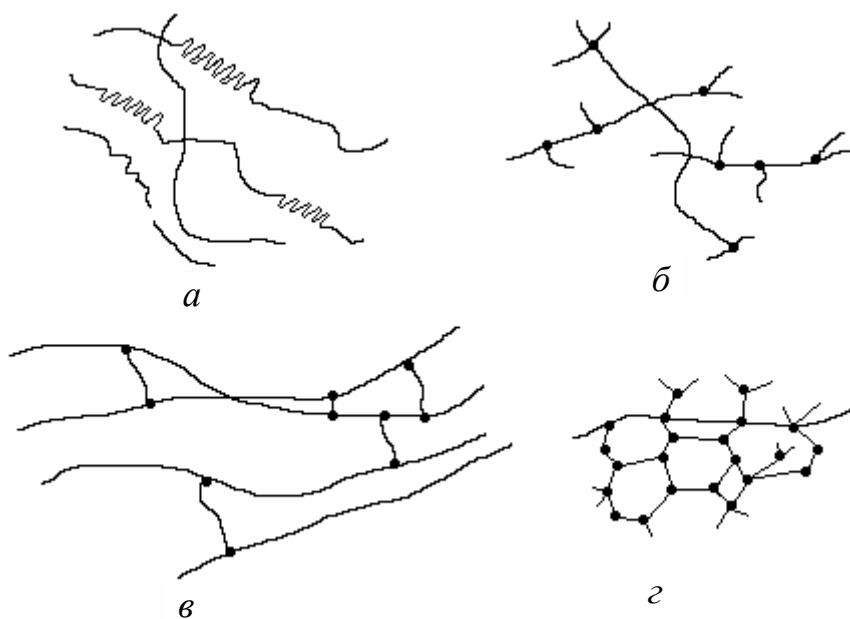


Рис. 2.104. Формы макромолекул полимеров: а – линейная; б – разветвленная; в – лестничная; г – трехмерная или сетчатая

В полимерах с *лестничным* строением имеются ковалентные связи между молекулами (рис. 2.104, в). Они прочные, неплавкие, нерастворимые (могут только размягчаться и набухать).

В полимерах с *сетчатым* строением все линейные участки связаны поперечными ковалентными связями. Все изделие представляет собой

силы Ван-дер-Ваальса. Такую форму имеют молекулы термопластов.

У полимеров с *разветвленным* строением силы притяжения между макромолекулами слабее, полимеры менее прочны (рис. 2.104, б). Они более плавкие, рыхлые.

гигантскую пространственную молекулу (рис. 2.104, з). Такие полимеры хрупкие, стойкие к нагреву и растворителям (не размягчаются, не набухают). Это – терморезистивные полимеры.

Строение линейной макромолекулы схематично показано на рис. 2.105.

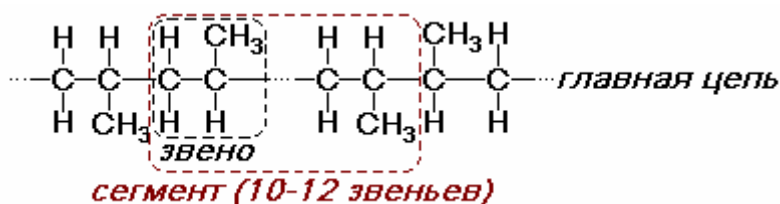


Рис. 2.105. Схематичное изображение линейной макромолекулы

Энергия ковалентной связи между атомами в главной цепи велика:  $E_{\text{связи}} = 350$  КДж/моль. А энергия межмолекулярной связи примерно в 30 раз меньше.

Поэтому макромолекулы сравнительно легко могут быть сдвинуты друг относительно друга. Кроме того, макромолекула – гибкая структурная единица: сегменты могут вращаться друг относительно друга, сохраняя валентный угол  $\alpha$  (рис. 2.106).

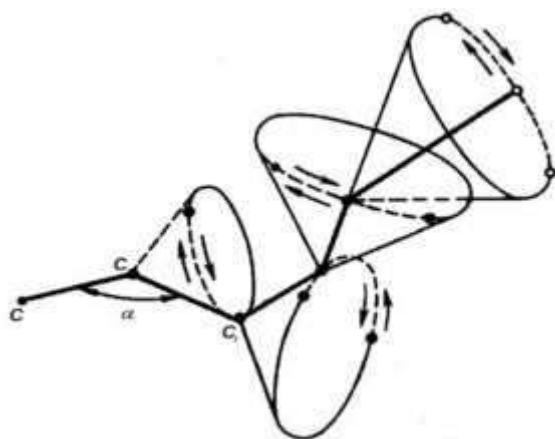


Рис. 2.106. Вращение сегментов в макромолекуле

В этом причина нестабильности свойств полимеров: огромные гибкие макромолекулы не могут сохранять раз навсегда заданное пространственное положение.

В полимерах могут возникать *надмолекулярные структуры*, т. е. участки упорядоченного расположения макромолекул. Надмолекулярная структура появляется под влиянием сил притяжения между молекулами и теплового движения самих молекул. Это уменьшает суммарную внутреннюю энергию системы.

Один вариант упорядоченной укладки – образование пачечных структур. *Пачки* представляют собой последовательное расположение макромолекул друг за другом (рис. 2.107). Пачки перемещаются как единое целое, но при нагреве и напряжениях нестабильны.



Рис. 2.107. Пачечная структура

Более сложные и устойчивые упорядоченные участки называются *кристаллами*. Вначале макромолекулы «складываются» в ленты за счет многократного поворота сегментов на

180°. Ленты соединяются в пластины, которые наслаиваются и образуют кристаллы. В объеме полимера происходит чередование аморфных и кристаллических областей (рис. 2.108). Стопроцентной кристаллизации полимер никогда не достигает. Кристаллические полимеры прочнее при нагрузке и нагреве.

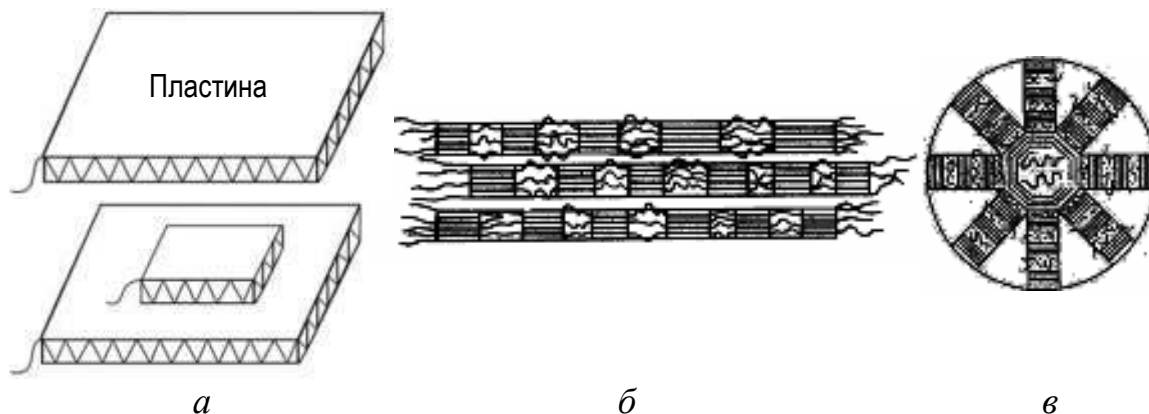


Рис. 2.108. Разные формы кристаллов:  
*a* – образование кристалла из пластин; *б* – фибриллы; *в* – сферолит

#### Поведение полимеров при нагреве

Чтобы показать зависимость величины деформации  $\epsilon$  от температуры, строят *термомеханические кривые* (при постоянном напряжении и скорости нагрева).

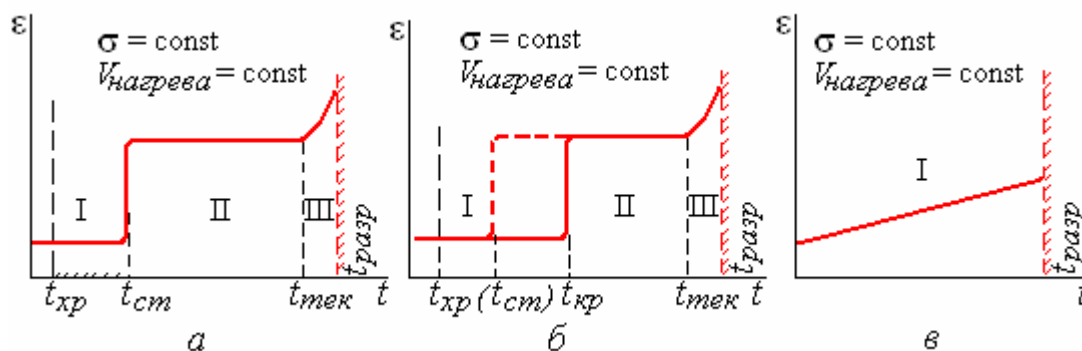


Рис. 2.109. Термомеханические кривые:  
*a* – аморфный термопласт; *б* – кристаллический термопласт;  
*в* – термореактивный полимер

На рис. 2.109, *a* показано поведение при нагреве аморфного термопластичного полимера. При низких температурах полимер находится в *стеклообразном* состоянии (область I) и ведет себя как упругое твердое тело. Затем нагрев переводит его в *высокоэластичное* состояние (область II). Деформация полимера может достигать здесь сотен процентов (800 % у резин), но она обратима. При дальнейшем нагреве наступает

вязко-текучее состояние; полимер ведет себя как вязкая жидкость (область III). Деформация необратима. Это область переработки пластмасс в изделия. Выше температуры термического разложения полимера  $t_{\text{разр}}$  разрываются ковалентные связи в макромолекулах, выделяются низкомолекулярные соединения, и полимер разрушается. Однако при охлаждении у термопластов происходит полимеризация, структура и свойства полимера восстанавливаются.

Рис. 2.109, б показывает поведение термопластичного полимера, способного кристаллизоваться. Ниже температуры кристаллизации  $t_{\text{кр}}$  полимер имеет упорядоченную структуру, выше – переходит в аморфное состояние. Так как на разрушение кристаллической структуры необходимо затратить энергию, кристаллический полимер становится высокоэластичным при более высокой температуре, чем аморфный.

На рис. 2.109, в показано поведение при нагреве терморезистивного полимера. Он способен только на небольшую деформацию в упругой области, а затем, при нагреве выше  $t_{\text{разр}}$ , необратимо разрушается. При охлаждении полимеризации не происходит, свойства не восстанавливаются.

Область рабочих температур полимера – ниже температуры стеклования  $t_{\text{ст}}$ , хотя кратковременно он может работать и немного выше этой температуры. Но надо учитывать, что ниже температуры хрупкости  $t_{\text{хр}}$  полимер хрупко разрушается (для начала деформации здесь нужно напряжение, превышающее предел прочности). Таким образом, полимер надежно работает под нагрузкой в интервале температур от  $t_{\text{хр}}$  до  $t_{\text{ст}}$ . Чем этот интервал шире, тем лучше.

Надо представлять, что температуры переходов полимера из одного состояния в другое ( $t_{\text{ст}}$  и  $t_{\text{тек}}$  – температура текучести) не являются константами. Они зависят от условий нагружения. Чем больше скорость деформирования, тем выше эти температуры. В этом отличие от фазовых переходов в сплавах.

#### ***Поведение полимеров при нагружении (диаграммы растяжения)***

Аморфный линейный полимер в стеклообразном состоянии способен на довольно большую упругую деформацию – до 20 % (область I на рис. 2.110, а). Модуль упругости  $E$  ( $\text{tg } \alpha$ ) у полимеров намного меньше, чем у металлов. Высокоэластическая деформация может составлять сотни процентов (рис. 2.110, а, область II). Она происходит за счет разгибания свернутых макромолекул. При дальнейшем увеличении нагрузки начинается смещение макромолекул друг относительно друга. Это – вязко-текучее состояние (рис. 2.110, а, область III).

При механическом нагружении полимер проходит до разрушения те же стадии, что и при нагреве, только энергию для перехода в новое



состояние он получает за счет работы деформирования, а не за счет подвода тепла.

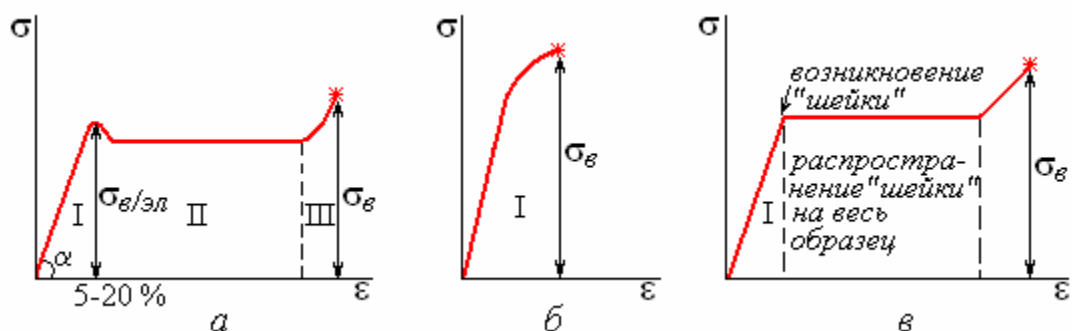


Рис. 2.110. Диаграммы растяжения полимерных материалов:  
 а – аморфный линейный полимер; б – термореактивный полимер;  
 в – кристаллический термопласт

Термореактивный полимер с сетчатой структурой способен испытывать только упругую деформацию, после чего наступает разрушение (рис. 2.110, б). Такие полимеры имеют большую жесткость  $E$  и прочность  $\sigma_v$ , чем термопласты.

Кристаллический полимер при температуре ниже  $t_{кр}$  после равномерной упругой деформации (рис. 2.110, в, область I) образует местное сужение – «шейку», которая постепенно распространяется на весь образец. При этом идет изменение кристаллической структуры; деформация получается остаточная. Жесткость и прочность кристаллического полимера выше, чем у такого же полимера в аморфном состоянии.

#### **Применение полимеров**

*Примеры применения пластмасс прочитать самостоятельно.*

Надо заметить, что наиболее широко применяются не так уж много пластмасс из всего их разнообразия. Например, современный автомобиль имеет порядка 400 пластмассовых узлов и деталей. Но, в основном, они изготовлены из 5 полимерных материалов: полиуретанов, поливинилхлорида, стеклопластиков (наиболее прочные и жесткие,  $\sigma_v$  до 950 МПа), полипропиленов, и АБС-пластиков (акрилонитрильный сополимер с добавкой СКС – бутадиенстирольного каучука в виде дискретной фазы, повышающей ударную вязкость пластмассы примерно в 15 раз).

### **Лекция 21**

#### **Керамические материалы**

**Керамика** – неорганические твердые материалы, получаемые высокотемпературным обжигом из отформованных минеральных масс. Можно сказать, что керамика – это все материалы, не являющиеся полимерами и металлами. В керамических материалах между атомами существует ковалентная или ионная связь.

Для получения керамики имеется огромное количество природных соединений; они составляют до 85 % земной коры. Только на долю кремния приходится около 40 %. В Томской области имеются собственные ресурсы для производства керамики: глинозем в Ачинске, Туганское месторождение циркониевых песков.

Современная техника использует более 7000 различных изделий из керамики: от ферритов, величиной с булавочную головку, и тонких пленок для сенсорных устройств до огромных изоляторов ЛЭП.

#### **Структура керамики**

Основа *строительной, бытовой и художественной керамики* – природные глины. *Техническая керамика* имеет более однородный состав, изготавливается из оксидов или безоксидных соединений.

При обжиге (1200-2500 °С) одновременно формируются структура и свойства керамических материалов. Керамика всегда многофазна: она содержит кристаллическую, стекловидную и газовую фазы в различных пропорциях (рис. 2.111).

Кристаллическая фаза представляет собой химические соединения или твердые растворы. Она является основной и определяет прочность, жаропрочность и другие важнейшие свойства керамики.

Стекловидная, или аморфная фаза – это связка; ее количество может колебаться в широких пределах: от 1 до 40 %. Она снижает прочность и термостойкость, но облегчает технологию производства.

Газовая фаза находится в порах керамики. По доле пор в объеме материала керамика делится на *пористую* и *плотную*. В технике чаще используется плотная керамика. Но и она содержит определенную долю пор.

#### **Свойства керамики**

*Достоинствами керамики* являются:

- высокая твердость и износостойкость;
- высокие рабочие температуры (до 3500 °С);
- высокая коррозионная стойкость в различных средах;
- низкая тепло- и электропроводимость: керамические материалы – диэлектрики и теплоизоляторы;

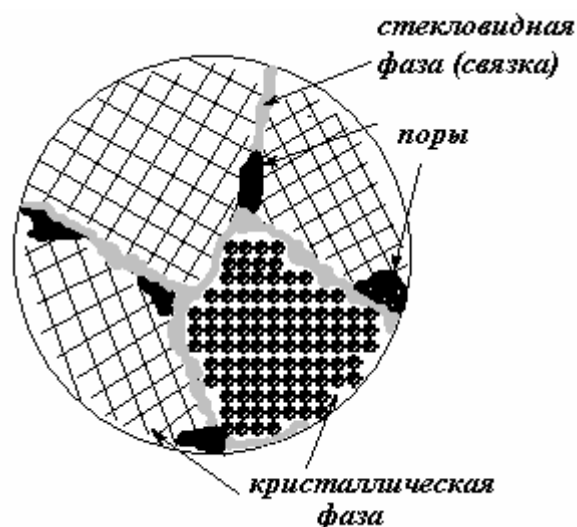


Рис. 2.111. Структура керамики

- малая плотность, легкие материалы.

*Основной недостаток керамики:*

- высокая хрупкость. Ударная вязкость керамики примерно в 40 раз меньше, чем у металлов. Это ограничивает ее применение в технике. Керамика имеет низкую прочность при растяжении и изгибе. Пластически не деформируется.

Высокие твердость и температуры плавления керамических материалов обусловлены большой энергией связи между атомами. Это ковалентные или ионные соединения. Сильная межатомная связь определяет высокое сопротивление деформации, поэтому специальной упрочняющей обработки для керамики не требуется.

Для повышения ударной вязкости керамики применяют различные способы. Прежде всего, в керамическом материале должно быть как можно меньше пор, являющихся зародышами трещин. На сегодняшний день разработаны следующие основные способы увеличения вязкости керамики:

- легирование или модифицирование,
- упрочнение дисперсными частицами,
- упрочнение нитевидными кристаллами более прочной керамики,
- «затупление» трещины за счет создания множества микротрещин: тогда магистральная трещина не развивается.

Над решением актуальной проблемы – повышением трещиностойкости (вязкости) керамики – работают ученые-материаловеды во всем мире, в том числе и ученые Томского Института физики прочности и материаловедения.

#### ***Классификация и применение керамики***

Техническую керамику можно подразделить на 3 группы: оксидную, безоксидную (бескислородную) и металлокерамику.

1) *Оксидную керамику* получают из оксидов различных элементов: Al, Mg, Zr, Si, Be, U. Она состоит в основном из кристаллической фазы и пор. Стекловидная фаза появляется только за счет примесей.

Оксидная керамика твердая, огнеупорная, химически стойкая в кислотах, щелочах, на воздухе. Рабочие температуры составляют 0,8–0,9 от температур плавления (от 2000 до 3300 °С). Но резких изменений температуры она не выдерживает.

Пористая керамика этой группы применяется как теплоизоляционный материал и огнеупорная футеровка камер сгорания, металлургических печей и ковшей (динасовый, магнезитовый, шамотный кирпич). Вспененная керамическая теплоизоляция «Бурана» имела всего 5 % материала и 95 % пор, заполненных инертным газом. Из пористой керамики

ки делают также фильтры для различных жидкостей (воды, вина, масла).

Керамику на основе оксида алюминия  $Al_2O_3$  называют *корундовой*. Она применяется в самых разных областях техники:

- обтекатели радиолокационных антенн,
- подшипники печных ролгангов,
- вводы и поддерживающие устройства для нагревателей термических печей,
- электроизоляторы,
- сопла аргоно-дуговых горелок, форсунок для закачки воды в скважину (давление 150 атм), пескоструйных и дробеструйных установок,
- фильеры для волочения проволоки,
- нитеводители в текстильной промышленности,
- режущий инструмент,
- распределители и шайбы в бытовой сантехнике,
- торцевые уплотнители для насосов.

Керамика на основе оксида циркония  $ZrO_2$  имеет очень важную особенность.  $ZrO_2$  испытывает 3 полиморфных превращения при нагреве: моноклинная решетка превращается в тетрагональную, а затем в кубическую. Тетрагональную решетку можно сохранить при низких температурах с помощью модифицирования. Тогда фазовое превращение начинается за счет приложенного напряжения. Такая модифицированная керамика имеет прочность 3000 МПа при критерии трещиностойкости  $K_{IC} = 20-25$  (у обычной керамики – не более 4). Из  $ZrO_2$  делают твердооксидные топливные ячейки (для выработки электроэнергии), датчики содержания кислорода в расплаве стали.

В приборостроении, электротехнике и электронике применяется так называемая *тонкая керамика*: плотная и мелкозернистая (размер зерен 1-5 мкм). Это, например, ферриты – высокочастотные магнитомягкие материалы из оксидов железа  $FeO \cdot Fe_2O_3$ , спеченных или сплавленных в монокристалл без пор. Есть и магнито-твердые ферриты. Для изоляторов применяется электрофарфор. Есть специальная конденсаторная керамика (ультрафарфор, стеатит  $TiO_2$ ) с высоким значением диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

2) *Бескислородная (безоксидная) керамика* – это карбиды  $Me_xC_y$ , нитриды  $Me_xN_y$ , бориды  $Me_xB_y$  и т. п. Это тугоплавкие соединения, их огнеупорность достигает 3500 °С. Твердость приближается к твердости алмаза. Они обладают высокой износостойкостью и жаростойкостью.

Карборунд  $SiC$  – твердый, химически стойкий, легкий, жаростойкий материал. Из него делают нагреватели печей, чехлы термпар, лопатки газовых турбин, детали ДВС, шлифовальные круги, защитные покрытия на графите.

Нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  стоек в расплавленных металлах и шлаках. Применяется для деталей газовых турбин, жаростойких инструментов, тиглей, кристаллизаторов, деталей насосов для перекачки расплавленных металлов.

3) *Керамико-металлические материалы, или керметы*, получают путем перемешивания порошков тугоплавкого керамического соединения и металла. Затем смесь порошков прессуется и спекается. Металл играет роль связки; он повышает пластичность и вязкость. При этом возрастает и  $\sigma_{\text{изг}}$ . В качестве связок используются кобальт, никель, железо, молибден. Керамическая составляющая может быть как оксидной, так и бескислородной.

Широко применяемые керамико-металлические материалы – это инструментальные твердые сплавы. Из них делают режущие пластины для фрез, сверл, зенкеров, резцов, а также штампы, волокна, бурильный инструмент. Они состоят из карбидов  $\text{WC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{TaC}$  и кобальтовой связки. Применяются также материалы  $\text{Cr}_7\text{C}_3 - \text{Ni}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}$ ,  $\text{BeO} - \text{W}$ .

## Графит

Графит является перспективным материалом высокой жаропрочности: его жесткость и прочность при нагреве возрастают (на 60 % до температуры 2200-2400 °C)! Он не плавится, а *возгоняется* – переходит в газовую фазу – при температуре 3800 °C. Графит имеет малый коэффициент теплового расширения при нагреве и хорошо проводит тепло. Поэтому он не боится тепловых ударов. Кроме того, у него малая скорость ползучести.

Графит технологичен: его можно обрабатывать резанием и прессовать при нагреве.

Недостаток графита – легко окисляется при нагреве, поэтому деталям из него, работающим при высоких температурах, нужны защитные покрытия из карборунда  $\text{SiC}$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Графит незаменим в различных узлах ядерных реакторов благодаря своей способности замедлять скорость нейтронов и малому сечению их захвата, а также стабильности свойств при облучении потоком быстрых нейтронов.

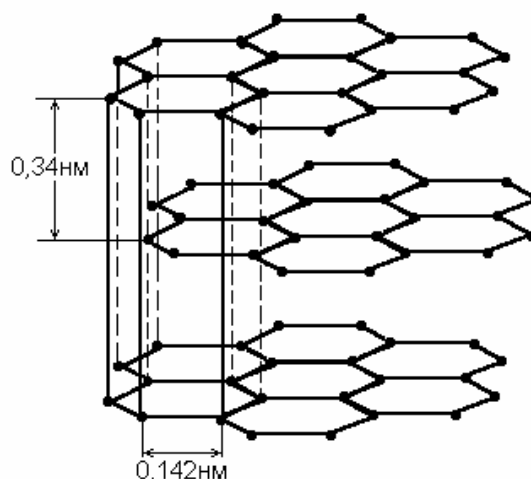


Рис. 2.112. Структура графита

Графит обладает высокой электропроводимостью, поэтому из него делают электроды для металлургических и электрохимических производств (для выплавки стали в электропечах, для электролиза алюминия), а также щетки электрических машин, нагреватели.

Малый коэффициент трения графита позволяет использовать его как антифрикционный материал в узлах трения, работающих без смазки, при высоких и низких температурах, в агрессивных средах.

Для получения композиционных материалов очень широко применяются углеродные волокна, имеющие высокую удельную прочность.

## Лекция 22

### Неорганические стекла

**Неорганические стекла** – это сложные расплавы высокой вязкости, состоящие из основных и кислотных оксидов.

Стеклообразное состояние является разновидностью аморфного. Беспорядочная структура жидкости при охлаждении «замораживается». Получается неправильная пространственная сетка (рис. 2.113). Стекло имеет рыхлую неоднородную структуру с поверхностными дефектами.

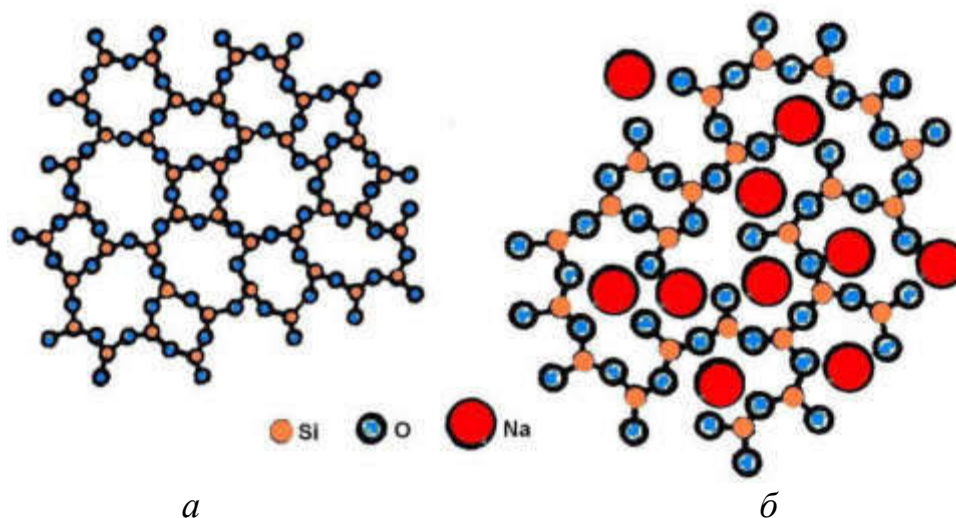


Рис. 2.113. Структура стекла: *a* – кварцевое; *б* – щелочное

В состав стекол входят:

- *стеклообразующие оксиды*  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{As}_2\text{O}_5$ . Они образуют структурный каркас стекла, или сетку;
- *модифицирующие оксиды* натрия, калия, лития, кальция, магния, бария. Они изменяют физико-химические свойства стекломассы, облегчая технологию производства;



- *оксиды для придания нужных характеристик.* Это оксиды алюминия, железа, свинца, титана, бериллия. Сами они структурный каркас не образуют, но частично замещают стеклообразующие оксиды.

#### **Классификация стекол**

Стекла можно подразделить на несколько разных групп – например, по содержанию модификатора, по стеклообразующему оксиду (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Структура и свойства дуралюмина после старения

<b>По назначению</b>				
Технические		Строительные		Бытовые
Оптические, светотехнические, электротехнические, химико-лабораторные, приборные, трубные		Оконные, витринные, армированные, стеклоблоки		Посуда, зеркала, стеклотара
<b>По стеклообразующему веществу</b>				
Силикатные SiO <sub>2</sub>	Боросиликатные B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	Алюмосиликатные Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	Алюмоборосиликатные Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	Алюмофосфатные Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>По содержанию модификаторов</b>				
Щелочные		Бесщелочные	Кварцевые	

#### **Свойства стекол**

Плавятся в интервале температур, размягчаются при температуре 600–800 °С; переработка требует свыше 1000 °С.

Свойства стекол изотропны, т. е. не зависят от направления.

При сжатии прочность высокая: до 2000 МПа, а при растяжении – низкая (менее 100 МПа). Твердость стекол составляет 0,5–0,7 твердости алмаза, но они очень хрупкие.

Несколько выше механические свойства у кварцевых и бесщелочных стекол.

Важнейшие свойства стекол, определяющие их применение, – оптические: прозрачность, отражение, рассеяние, поглощение, преломление. Обычное листовое стекло 90 % видимого света пропускает, а ультрафиолетовое излучение поглощает. Кварцевые стекла прозрачны для ультрафиолетовых лучей.

Стекла можно закалывать, нагревая выше температуры стеклования и быстро охлаждая в масле или потоке воздуха. Ударная вязкость стекла увеличивается при закалке в 5–7 раз, прочность – в 3–6 раз, повышается термостойкость.

*Триплекс* – это два листа закаленного стекла, склеенные прозрачной полимерной пленкой. Могут быть плоскими и гнутыми. При разрушении триплекса осколки удерживаются на полимерной пленке и не травмируют окружающих.

*Термопан*: между двумя стеклами имеется воздушный промежуток, который обеспечивает теплоизоляцию.

Есть стекла с высокой защитой от инфракрасных лучей. Они содержат индий и олово, изготавливаются многослойными. Ими остекляют японские машины («Нисан», «Тойота»), предназначенные для эксплуатации в жарких странах.

#### *Ситаллы (кристаллические стекла)*

Их еще называют стеклокерамикой. Они состоят из стекловидной и кристаллической фазы. Структура ситаллов однородная, мелкозернистая: зерна имеют размер 1–2 мкм.

Получают ситаллы введением в расплав стекла веществ, служащих центрами кристаллизации (солей золота, серебра, меди). В результате 95 % объема занимает кристаллическая фаза, остальное – стекловидная прослойка (рис. 2.114).

Свойства ситаллов: их твердость близка к твердости закаленной стали, они термостойки до 700–900 °С. Их ударная вязкость в 3–4 раза выше, чем у стекол. Они износостойки, являются диэлектриками и проявляют высокую химическую стойкость.

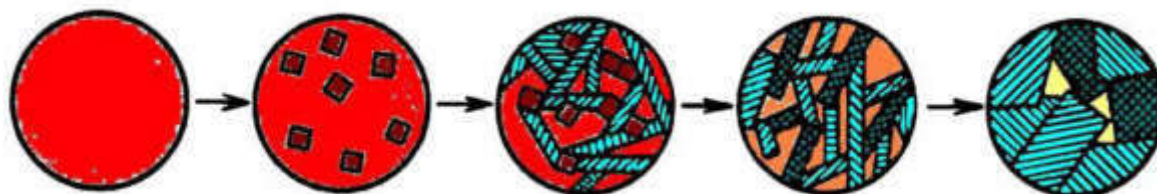


Рис. 2.114. Кристаллизация стекла при введении модификаторов в расплав

Применение ситаллов включает детали ДВС, подшипники, трубы для химической промышленности, оболочки вакуумных электронных приборов, детали радиоэлектроники, жаростойкие покрытия на металлах, фильтры для вытягивания синтетических волокон, лопасти компрессоров и сопла реактивных двигателей.

## Композиционные материалы

**Композиционные материалы (композиты)** – это новый класс легких и высокопрочных материалов с большим сопротивлением развитию трещины.

По удельной прочности и удельной жесткости композиты превосходят все обычные конструкционные материалы. Кроме того, они сохраняют высокую прочность при повышенных температурах, хорошо сопротивляются усталостному разрушению.

Композиты – сложные материалы, в состав которых входят сильно отличающиеся по свойствам, не растворимые друг в друге компоненты, разделенные ярко выраженной границей.

Сам принцип создания композитов заимствован у природы: стволы деревьев состоят из жестких волокон целлюлозы и мягкого лигнина, кости человека и животных строятся из жестких нитей фосфатных солей и мягкого, вязкого белка коллагена.

Свойства композиционных материалов (КМ) зависят от свойств компонентов и прочности связи между ними. Отличительная особенность: композиты проявляют достоинства компонентов, а не их недостатки. Вдобавок появляются свойства, которых не имели отдельно взятые компоненты. Поэтому для создания композитов выбирают компоненты с дополняющими друг друга свойствами.

### **Строение композитов**

Композиционный материал состоит из основы, или *матрицы* (металлической или полимерной) и *наполнителя*, или армирующего компонента.

Матрица связывает материал в единое целое, придает ему форму. От свойств матрицы зависят технология получения материала, рабочая температура, удельная прочность  $\sigma_B/\gamma$ , предел усталости  $\sigma_{-1}$ .

Наполнитель равномерно распределяется в матрице в определенном порядке. Наполнитель воспринимает нагрузку, поэтому должен иметь высокие прочность, твердость, модуль упругости.

Матрица распределяет нагрузку между частицами наполнителя, защищает их поверхность и повышает энергию распространения трещины, предупреждая хрупкое разрушение. Сама матрица не упрочняется, и в этом отличие композитов от металлических сплавов.

По форме наполнители могут быть нуль-мерными, одномерными и двумерными (см. рис. 2.115).

Композиционные материалы, упрочненные мелкими частицами наполнителя, называют *дисперсно-упрочненными*. Композиты, содержащие волокна, – *волокнистыми*. Двумерные наполнители применяются, в основном, в полимерных композитах.

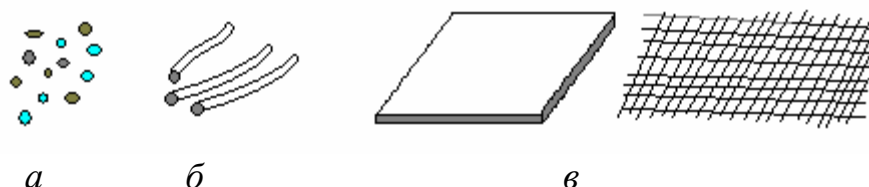


Рис. 2.115. Форма наполнителей в композиционных материалах:  
*a* – частицы; *б* – волокна; *в* – пластины, листы, ткань

### *Дисперсно-упрочненные композиционные материалы*

Наполнителями в них являются частицы тугоплавких веществ: оксиды, карбиды, нитриды. Обычно это  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , BN, SiC.

Для матриц используют либо материалы с малой плотностью (алюминий, магний, титан и их сплавы), либо жаропрочные материалы (никель).

Получают дисперсно-упрочненные КМ прессованием и спеканием или введением наполнителя в жидкую матрицу перед разливкой.

В этом виде КМ матрица воспринимает основную нагрузку, а частицы наполнителя мешают движению дислокаций. Для них справедливо соотношение  $\Delta\sigma_T \sim \frac{1}{R}$ , где  $R$  – расстояние между частицами наполнителя. Наилучшее сочетание механических свойств достигается при размере частиц 0,01–0,1 мкм и расстоянии между ними 0,05–0,5 мкм.

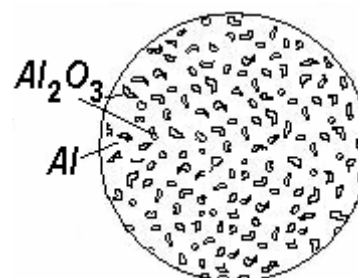


Рис. 2.116. Структура спеченной алюминиевой пудры

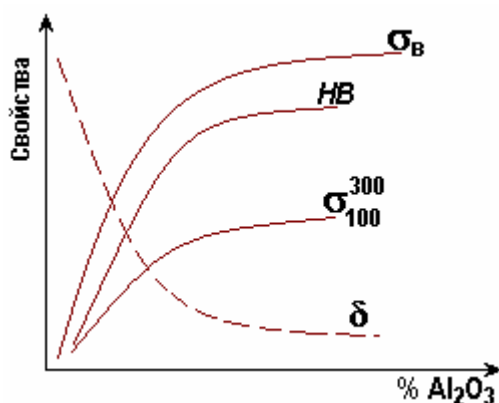


Рис. 2.117. Зависимость свойств САП от доли оксида

Примером является спеченная алюминиевая пудра (САП). Она имеет высокую жаропрочность и коррозионную стойкость. Состоит из алюминия и частиц  $Al_2O_3$  в виде чешуек толщиной менее 1 мкм (рис. 2.116). Чем больше в этом материале доля  $Al_2O_3$ , тем выше прочность, твердость, жаропрочность, но ниже пластичность (рис. 2.117).

Преимуществом такого материала

по сравнению с обычными сплавами алюминия являются очень мелкие зерна, равномерное распределение упрочняющих частиц, отсутствие линейных дефектов.

Изделия из САП: листы, фольга, профили, трубы. Получают детали для работы при 300–500 °С: лопатки компрессоров, лопасти турбин и вентиляторов.

#### **Волокнистые композиционные материалы**

Наполнителями в них служат волокна или нитевидные кристаллы: углеродные, борные, из SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, стекла, а также проволока из коррозионно-стойкой стали, молибдена, вольфрама, бериллия. Волокна являются элементами, воспринимающими нагрузку. Для матриц используются те же металлы, что и для предыдущей группы.

Для достижения максимальной прочности композиционного материала волокна должны быть расположены параллельно направлению действия напряжения. Поэтому расположение волокон может быть одноосным, двухосным или трехосным (рис. 2.118).

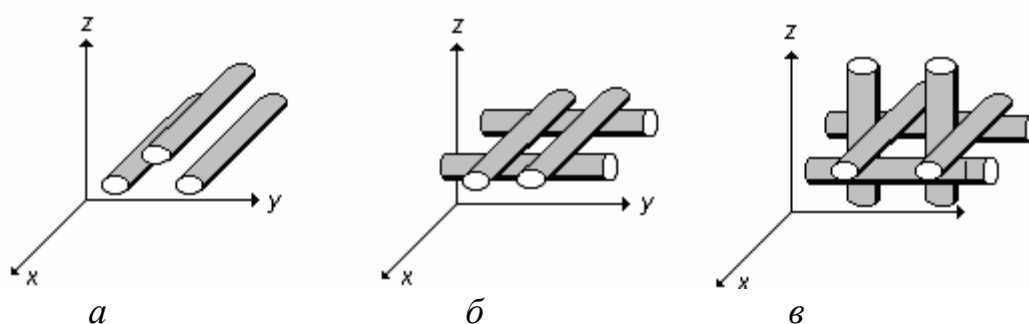


Рис. 2.118. Расположение армирующих волокон в композитах:  
а – одноосное; б – двухосное; в – трехосное

При одноосном армировании проявляется анизотропия: в направлении волокон прочность выше, чем в поперечном (так как нагрузку воспринимает волокно, а матрица – передающая среда). При двухосном армировании анизотропии нет, но прочность вдоль оси волокон уменьшается примерно в 3 раза (см. рис. 2.119).

Чем тоньше и длиннее волокно, тем выше степень упрочнения (см. рис. 2.120).

Объемная доля волокна составляет от нескольких процентов до 80–90 %. Увеличение доли наполнителя повышает прочность и другие характеристики.

Например, материал ВКА-1 состоит из алюминия и борного волокна. Предел прочности у него 1200 МПа (как у углеродистых сталей), а удельная прочность – намного выше, чем у сталей.

Получают волокнистые композиты формированием волокон в порошке матрицы, пропиткой волокна жидким металлом матрицы, осаждением матрицы на волокна с последующим формированием и спеканием и другими способами. Все больше применяется способ направленной кристаллизации эвтектик.

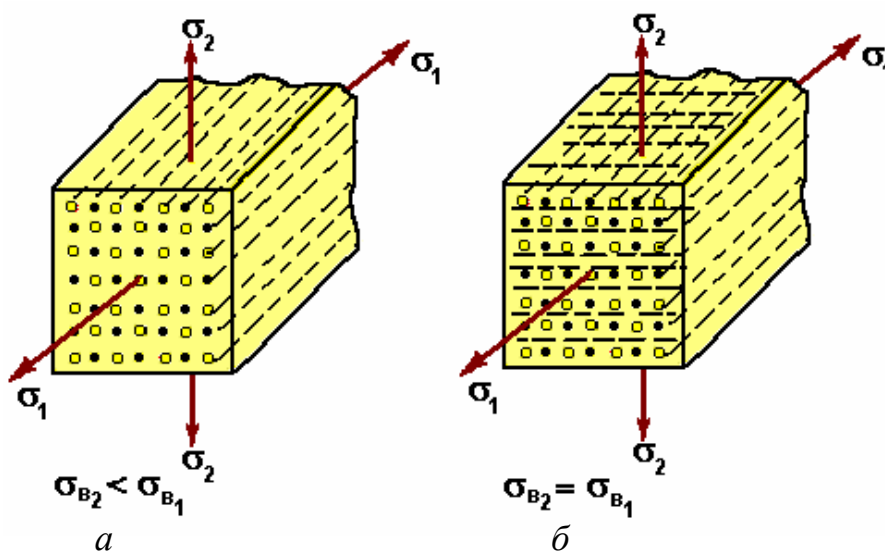


Рис. 2.119. Прочность при одноосном (а) и двухосном (б) армировании

Проблемы технологии композитов в том, что волокна бора, углерода, карбида кремния и другие плохо слипаются с матрицей, не смачиваются жидким металлом матрицы.

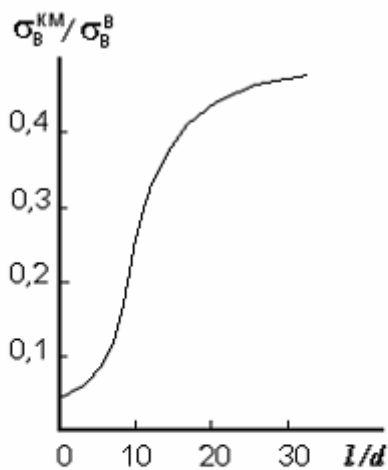


Рис. 2.120. Зависимость степени упрочнения композиционного материала от соотношения  $l/d$  упрочнителя:  $l$  – длина волокна;  $d$  – диаметр волокна

Прочность сцепления обеспечивается диффузионными процессами и химическими реакциями (обычно на границе матрица-волокно образуются интерметаллиды). Приходится применять различные приемы, например, наносить предварительно металлические покрытия на волокна, которые улучшают сцепление, но удорожают материал. Или проводят травление поверхности волокна. Это тоже улучшает схватываемость с металлом матрицы. На поверхности борных или углеродных волокон выращивают монокристаллы карбида кремния SiC. Получаются ворсистые волокна –

монокристаллы карбида кремния SiC. Получаются ворсистые волокна –



борсик. Если основой волокна является тончайшая вольфрамовая проволока диаметром 12 мкм, то на ней можно нарастить кристаллы бора. Все волокно будет иметь диаметр 70–200 мкм. Такие волокна прочнее сцепляются с матрицей.

Основной недостаток волокнистых композитов – их высокая стоимость и сложная технология получения.

Углеродные волокна несколько дешевле. Их получают из синтетических органических волокон высокотемпературной обработкой. Они могут быть изготовлены в виде жгутов, нитей, ткани, лент. Каждое волокно состоит из мельчайших ленточек – фибрилл.

Стекловолокно производят с квадратной, прямоугольной, шестигранной формой – для лучшей укладки в матрице.

Применение КМ увеличивается с каждым годом. Главный потребитель – авиа-, ракетная и космическая техника. Из них изготавливают легкие и прочные корпуса, камеры сгорания ракетных двигателей, лопатки турбин, лопасти винтов, кузовные детали автомобилей.

Важнейшая деталь турбины – лопатка, изготовленная из никелевого сплава, упрочненного нитями сапфира  $Al_2O_3$ , выдерживает температуру газов на входе 1650 °С! При этом предел прочности нитей составляет более 700 МПа.

Сопла ракет изготавливают из порошков вольфрама или молибдена с керамическими нитями  $Al_2O_3$  в виде волокон или войлока. При этом прочность увеличивается в два раза.

#### ***Композиционные материалы на полимерной основе***

В композитах на полимерной основе усилие от матрицы передается армирующему волокну за счет сил межмолекулярного взаимодействия адгезионного характера. Необходимо полное смачивание жидким связующим поверхности волокон.

Борные и углеродные волокна лучше смачиваются эпоксидной смолой. Так получают *боропластики* и *углепластики*.

*Стекловолокниты* имеют максимальную прочность и удельную прочность:  $\sigma_b$  составляет 700 МПа и даже 2400 МПа (при уменьшении диаметра волокон и добавке монокристаллов  $Al_2O_3$  в матрицу).

Соединяют композиты точечной сваркой, склеиванием, клееболтовыми и клеезаклепочными соединениями.

## **Наноматериалы**

***Наноматериалы*** - материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не пре-

вышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами и эксплуатационными характеристиками.

К таким материалам можно отнести наноразмерные частицы (нанопорошки), нанопроволоки и нановолокна, очень тонкие пленки (толщиной менее 100 нм), нанотрубки и т. п. Такие материалы могут содержать от одного структурного элемента или кристаллита (для частиц порошка) до нескольких их слоев (для пленки).

Для наночастиц доля атомов, находящихся в тонком поверхностном слое (толщиной порядка 1 нм), по сравнению с микрочастицами (обычными зернами) заметно возрастает. Доля приповерхностных атомов пропорциональна отношению площади поверхности частицы  $S$  к ее объему  $V$ . Если характерный размер частицы  $D$ , то  $S/V \sim D^2/D^3 \sim 1/D$ . У поверхностных атомов, в отличие от атомов, находящихся в объеме твердого тела, задействованы не все связи с соседями. В результате в приповерхностном слое возникают сильные искажения кристаллической решетки, и даже может происходить смена типа решетки. Кроме того, свободная поверхность является стоком бесконечной емкости для точечных и линейных кристаллических дефектов (в первую очередь вакансий и дислокаций). При малых размерах частиц это приводит к выходу большинства структурных дефектов на поверхность и очистке материала наночастицы от дефектов структуры и химических примесей. Установлено, что процессы деформации и разрушения протекают в тонком приповерхностном слое с опережением по сравнению с внутренними объемами металлического материала. В наночастицах же весь материал работает как приповерхностный слой, толщина которого оценивается величиной 0,5–20 мкм.

Из этого следует, что закономерности, характерные для микроструктурных объектов, не соблюдаются при переходе к наноразмерным частицам. Изучение и использование необычных свойств наноматериалов является важнейшей задачей современного материаловедения.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Лекция 1</i>	
Что изучает дисциплина «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» .....	3
<b>Часть I. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	4
<b>Раздел I Основы металлургического производства</b> .....	4
Структура металлургического производства .....	5
Получение чугуна .....	6
<i>Лекция 2</i>	
Получение стали .....	7
Внедоменное получение железа из руды .....	12
<i>Лекция 3</i>	
<b>Раздел II Обработка металлов давлением</b> .....	13
Физические основы ОМД .....	14
Устройства для нагрева заготовок .....	17
Классификация видов обработки металлов давлением .....	18
Прокатное производство .....	18
<i>Лекция 4</i>	
Прессование .....	23
Волочение .....	25
Ковка .....	27
Горячая объемная штамповка .....	29
Холодная листовая штамповка .....	31
<i>Лекция 5</i>	
<b>Раздел III Литейное производство</b> .....	34
Схема техпроцесса получения отливок .....	34
Литейные свойства сплавов .....	34
Формовочные материалы .....	38
Литейная оснастка .....	39
<i>Лекция 6</i>	
Машинная формовка .....	41
Специальные виды литья .....	44
Дефекты отливок .....	49
<i>Лекция 7</i>	
<b>Раздел IV Сварочное производство</b> .....	50
Электродуговая сварка .....	50

<b>Лекция 8</b>	
Газовая сварка .....	59
Электроконтактная сварка .....	60
Сварка трением .....	63
Холодная сварка .....	63
Дефекты и контроль качества сварных соединений .....	64
Особенности сварки жаропрочных сталей .....	65
Пайка .....	65
<b>Лекция 9</b>	
<b>Раздел V Обработка металлов резанием</b> .....	66
Основные понятия .....	67
Обработка заготовок на сверлильных станках .....	71
Обработка заготовок на шлифовальных станках .....	73
Отделочная обработка резанием .....	74
Чистовая обработка пластическим деформированием .....	75
Электрофизическая и электрохимическая обработка .....	76
<b>Часть II. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ</b>	78
<b>Лекция 1</b>	
Что и как изучает материаловедение .....	78
Классификация конструкционных материалов .....	79
<b>Раздел I Основы металловедения</b> .....	83
Свойства металлов .....	83
<b>Лекция 2</b>	
Кристаллическое строение металлов .....	84
<b>Лекция 3</b>	
Кристаллизация металлов .....	92
<b>Лекция 4</b>	
Деформация и разрушение металлов .....	98
<b>Лекция 5</b>	
Механические свойства металлов .....	103
<b>Лекция 6</b>	
Структура и свойства деформированных металлов .....	108
Изменение структуры и свойств деформированного металла при нагреве .....	110
Способы упрочнения металлов и сплавов .....	113
<b>Лекции 7-8</b>	
Строение сплавов .....	116
Диаграммы состояния двойных сплавов .....	120
<b>Лекция 9</b>	
Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов .....	128

<i>Лекция 10</i>	
Углеродистые стали .....	135
<i>Лекция 11</i>	
Чугуны .....	140
<i>Лекции 12-13</i>	
Термическая обработка стали .....	145
<i>Лекции 14-15</i>	
Основные виды термообработки стали .....	155
<i>Лекция 16</i>	
<b>Раздел II Металлические конструкционные материалы .....</b>	<b>167</b>
Легированные стали .....	167
<i>Лекция 17</i>	
Жаропрочные стали .....	174
<i>Лекции 18-19</i>	
Цветные металлы и сплавы .....	179
<i>Лекция 20</i>	
<b>Раздел III Неметаллические конструкционные материалы .</b>	<b>189</b>
Ограничения в применении металлов .....	189
Полимеры, или пластмассы .....	189
<i>Лекция 21</i>	
Керамические материалы .....	195
Графит .....	199
<i>Лекция 22</i>	
Неорганические стекла .....	200
<i>Лекция 23</i>	
Композиционные материалы .....	203
Наноматериалы .....	208

*Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия  
имени П.А. Столыпина*

*Кафедра «Материаловедение и технология  
машиностроения»*

# **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

по дисциплине

**«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЯ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»**



## Содержание

<b>РАЗДЕЛ 1. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<i>Лабораторная работа 1</i>	
Основные механические свойства материалов.....	4
<i>Лабораторная работа 2</i>	
Определение твердости металлов.....	9
<i>Лабораторная работа 3</i>	
Макроструктурный анализ металлов и сплавов.....	18
<i>Лабораторная работа 4</i>	
Микроструктурный анализ металлов и сплавов.....	23
<i>Лабораторная работа 5</i>	
Определение критических точек и построение диаграммы состояния двойных сплавов олово – цинк.....	30
<i>Лабораторная работа 6</i>	
Диаграмма состояния системы железо-цементит.....	38
<i>Лабораторная работа 7</i>	
Классификация и маркировка углеродистых сталей.....	45
<i>Лабораторная работа 8</i>	
Изучение микроструктуры и свойств чугунов.....	56
<i>Лабораторная работа 9</i>	
Построение и анализ диаграммы изотермического превращения аустенита.....	63
<i>Лабораторная работа 10</i>	
Термическая обработка углеродистых сталей.....	73
<i>Лабораторная работа 11</i>	
Изучение микроструктуры и свойств сталей после поверхностной закалки с нагревом токами высокой частоты и химико – термической обработки.....	86
<i>Лабораторная работа 12</i>	
Микроанализ цветных металлов и сплавов.....	97
<i>Домашнее задание</i>	
Разработка технологического процесса термической обработки стальных деталей.....	108
<b>РАЗДЕЛ 2. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	116
<i>Лабораторная работа 1</i>	
Изучение оборудования для электродуговой сварки.....	116
<i>Лабораторная работа 2</i>	
Изучение оборудования для газовой сварки.....	130
<i>Лабораторная работа 3</i>	
Изучение оборудования литейного производства.....	141
<i>Лабораторная работа 4</i>	
Изучение процессов обработки металлов давлением.....	157

# РАЗДЕЛ 1. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

## *Лабораторная работа 1*

### Основные механические свойства материалов

**Цель работы:** изучить основные механические свойства материалов.

**Теоретические сведения.** Под механическими свойствами понимают характеристики, определяющие поведение материала под действием приложенных внешних сил.

Под механическими свойствами понимают характеристики, определяющие поведение материала под действием внешних статических, динамических и переменных нагрузок в различных условиях эксплуатации. К механическим свойствам относят прочность, пластичность, ударную вязкость, твердость, усталость и др.

Под действием внешней нагрузки в твердом теле возникают напряжение и деформация.

*Напряжение* - нагрузка, отнесенная к площади поперечного сечения образца:

$$\sigma = P/F_0,$$

где  $P$  - нагрузка, МН;  $F_0$  - площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>.

Напряжение, приложенное к материалу, вызывает деформацию.

*Деформация* - изменение формы и размеров тела под действием внешних сил или в результате физических процессов, возникающих в самом теле (структурные превращения, усадка и т. п.). Деформация может быть *упругая*, исчезающая после снятия нагрузки, и *пластическая*, остающаяся после снятия нагрузки. Упругая деформация при увеличении нагрузки переходит в пластическую; при дальнейшем повышении нагрузки происходит разрушение тела.

**Прочность** - способность материала сопротивляться деформации или разрушению под действием статических или динамических нагрузок, например при сжатии, растяжении, изгибе и т. д.

*Испытание на растяжение.* Прочностные и пластические характеристики пластичных материалов чаще всего определяют при испытаниях на растяжение. Это статические испытания, которые проводят на образцах (по ГОСТ 1497 - 84), имеющих в поперечном сечении форму круга или прямоугольника (рисунок 1).

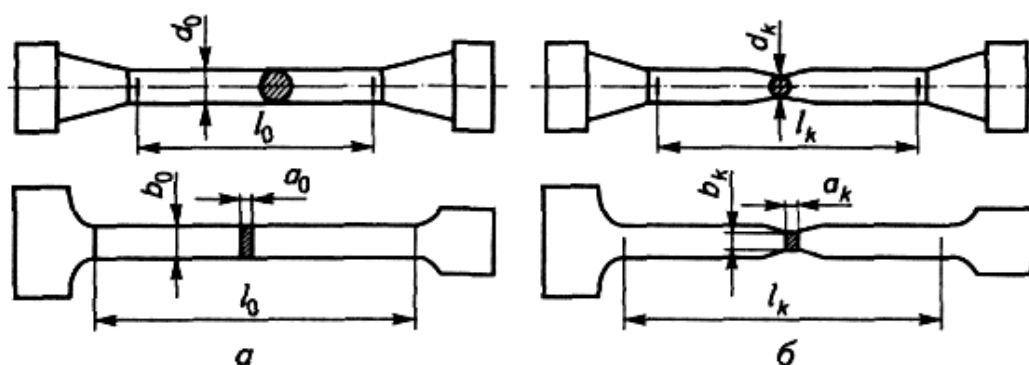


Рисунок 1 - Образцы для испытаний на прочность при растяжении:  
*а* - до испытаний; *б* - после испытаний

При испытаниях образец нагружают на специальной разрывной машине до разрушения. При этом вычерчивается диаграмма растяжения образца (рисунок 2) в координатах: нагрузка  $P$  - абсолютное удлинение образца  $\Delta l$ .

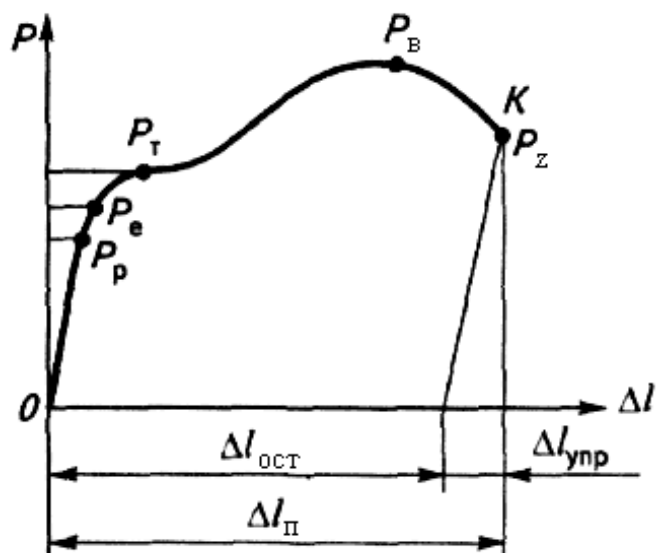


Рисунок 2 - Диаграмма растяжения, типичная для ряда металлов

На диаграмме можно отметить характерные участки и точки. На участке  $0 - P_p$  удлинение образца увеличивается прямо пропорционально нагрузке  $P_p$ , т. е. на этом участке соблюдается закон Гука, характеризующий упругую деформацию. Нагрузку  $P_t$ , при которой начинается течение металла, называют нагрузкой предела текучести, а горизонтальный участок кривой - площадкой текучести. За площадкой текучести нагрузка снова растет до некоторого максимального значения  $P_b$ , после которой на образце начинается образование местного сужения (шейки). Уменьшение площади сечения в области шейки вызывает снижение нагрузки, и в точке  $K$  при нагрузке  $P_z$  происходит разрыв образца.

При растяжении определяют следующие характеристики материалов:

*предел пропорциональности*  $\sigma_{пц}$  (МПа) - наибольшее напряжение, при котором соблюдается закон Гука:

$$\sigma_{пц} = P_p / F_0$$

*предел упругости*  $\sigma_{0,2}$  (МПа) - напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % длины участка образца:

$$\sigma_{0,2} = P_e / F_0$$

где  $P_e$  - нагрузка, соответствующая пределу упругости;

*предел текучести* (физический)  $\sigma_T$  (МПа) - наименьшее напряжение, при котором металл деформируется без заметного увеличения нагрузки:

$$\sigma_T = P_T / F_0$$

*временное сопротивление (предел прочности при растяжении)*  $\sigma_B$  (МПа) - напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке:

$$\sigma_B = P_B / F_0$$

**Пластичность** - свойство металлов деформироваться без разрушения под действием внешних сил и сохранять измененную форму после снятия этих сил. Ее характеристиками являются *относительное удлинение* перед разрывом  $\delta$  и *относительное сужение* перед разрывом  $\psi$ . Эти характеристики определяют при испытании металлов на растяжение, а их численные значения вычисляют по формулам:

$$\delta = [(l_k - l_0) / l_0] 100\%,$$

$$\psi = [(F_0 - F_k) / F_0] 100\%,$$

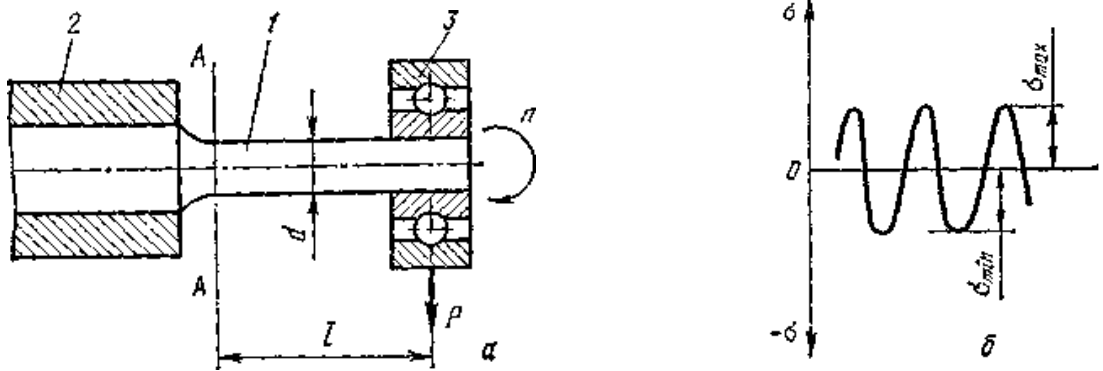
где  $l_0$  и  $l_k$  - длина образца до и после разрушения соответственно;  $F_0$  и  $F_k$  - площадь поперечного сечения образца до и после разрушения (шейка).

**Упругость** - свойство металлов восстанавливать свою прежнюю форму после снятия внешних сил, вызывающих деформацию. Упругость - свойство, обратное пластичности.

**Твердость** - способность металлов оказывать сопротивление проникновению в них более твердого тела. Производят испытание на твердость по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и на микротвердость. Наиболее распространенные первые два метода.

**Выносливость** - способность материала выдерживать многократно-повторяющиеся циклические нагрузки.

Количественно выносливость характеризуется наибольшим напряжением  $\sigma_1$  которое выдерживает материал не разрушаясь при заданном числе циклов нагружения, обычно равным  $10^7$  (для стальных) или  $10^8$  (для образцов из цветных металлов).



1 - образец; 2 - шпиндель; 3 - подшипник

Рисунок 3 - Схема машины для усталостных испытаний при консольном изгибе с вращением (а) и изменение напряжений по времени при симметричном цикле (б)

Напряжение  $\sigma_1$  носит название *предел выносливости*.

Для многих ответственных деталей, работающих в условиях знакопеременной, многократно-повторяющейся нагрузки (коленчатые валы, шатуны, пальцы, зубья шестерен, рессоры, пружины и т. п.) выносливость является наиболее важным свойством.

**Вязкость** - способность металлов оказывать сопротивление ударным нагрузкам. Вязкость - свойство, обратное хрупкости. Многие детали в процессе работы испытывают не только статические нагрузки, но подвергаются также ударным (динамическим) нагрузкам. Например, такие нагрузки испытывают колеса локомотивов и вагонов на стыках рельсов. Удельное сопротивление удару - *удельная ударная вязкость* (испытание на ударный изгиб)  $KC$  характеризуется работой, израсходованной на разрушение образца (рисунок 3). Значения  $KC$  ( $\text{МДж/м}^2$ ) вычисляют по формуле:

$$KC = A / F,$$

где  $A = G(H - h)$  - работа удара, измеряется МДж;  $G$  - вес маятника копра, кгс;  $H$  - высота подъема маятника перед ударом, м;  $h$  - высота, на которую поднимается маятник с другой стороны опор после удара, м (рисунок 4);  $F$  - площадь поперечного сечения образца в месте надреза,  $\text{см}^2$  (на образцах Менаже  $F = 0,8 \text{ см}^2$ ).



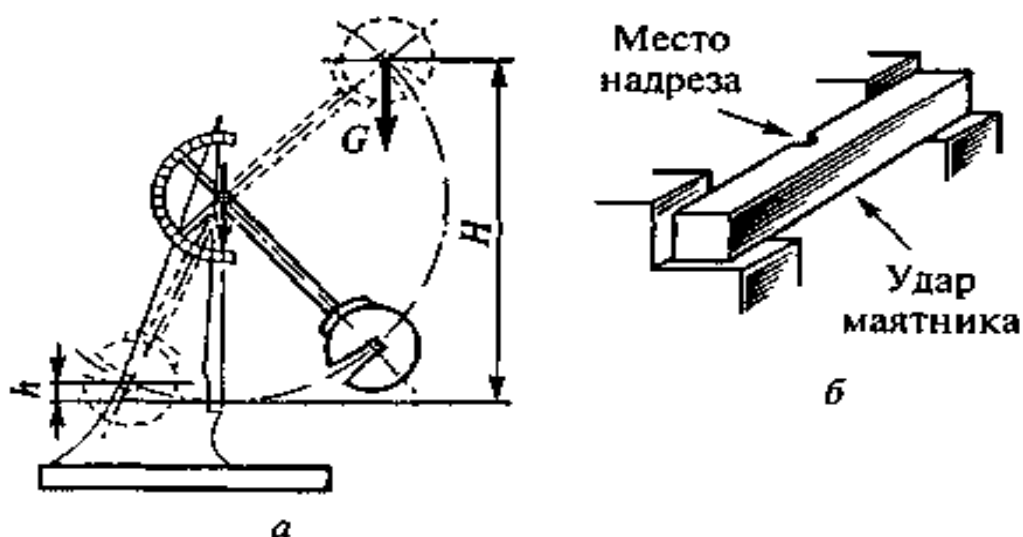


Рисунок 4 - Схема маятникового копра (а) и положение испытуемого образца на опорах копра (б)

***Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №1***

1. Перечислите основные механические свойства материалов.
2. Дайте определение каждого механического свойства.
3. По какой формуле определяется предел прочности? В каких единицах измеряется прочность? Как испытывают материал на прочность?
4. Какие участки можно выделить на диаграмме растяжения и что они характеризуют?
5. Какими характеристиками оценивают величину пластичности? В каких единицах измеряется пластичность?
6. Какое свойство характеризуется символом КСУ? Каков принцип его определения? В каких единицах оно измеряется, и по какой формуле вычисляется?
7. Каково характерное свойство материалов с низкой величиной КСУ?
8. Как испытывают материал на выносливость?

***Лабораторная работа 2***

**Определение твердости металлов**

**Цели работы:** ознакомиться с устройством приборов Бринелля, Роквелла и Виккерса, овладеть методикой определения твердости металлов, построить график влияния углерода на твердость отожженной углеродистой стали.

**Теоретические сведения.** Твердостью называют свойство металла оказывать сопротивление проникновению в него другого более твердого тела, минимум в 10 раз. Для определения твердости металлов чаще применяют методы Бринелля, Роквелла и Виккерса. Эти методы отличаются простотой, а также возможностью применять их на готовом изделии без его разрушения.

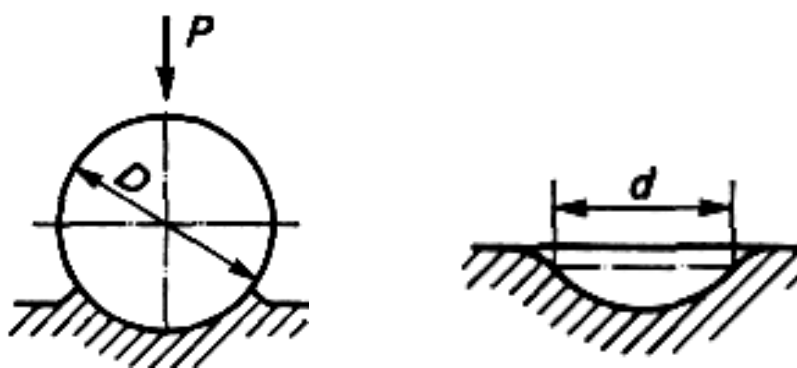


Рисунок 1 - Схема измерения твердости по Бринеллю

**Метод Бринелля** основан на том, что в испытуемый металл под определенной нагрузкой вдавливают стальной закаленный шарик определенного диаметра  $D$  мм (рисунок 1) и по величине диаметра шарового отпечатка  $d$  (глубине  $h$ ) судят о твердости. Отпечаток имеет вид шарового сегмента. Твердость по Бринеллю (НВ) определяют из выражения:

$$HB = P/F,$$

где:  $P$  - нагрузка, кН;  $F$  - площадь поверхности шарового отпечатка, мм<sup>2</sup>.

Выразив площадь поверхности отпечатка  $F$  через его диаметр  $d$  и диаметр шарика  $D$ , получаем твердость, МПа,

$$HB = 0,102 \frac{2P}{\pi(D^2 - d^2)}.$$

Для удобства использования метода имеются таблицы, в которых приведены значения чисел твердости по Бринеллю, рассчитанные в зависимости от диаметра отпечатка  $d$  с учетом используемой нагрузки  $P$  и диаметра шарика  $D$ .

Чем тверже металл, тем выше число твердости НВ. Между диаметром шарика и нагрузкой существует определенная зависимость:

$$P = KD^2,$$

где  $K$  - постоянный коэффициент для конкретного материала: для черных металлов  $K = 30$ ; для меди, бронзы и латуни - 10; для алюминия и подшипниковых сплавов  $K = 2,5$ .

Испытания проводят при температурах от 10...35 °С и при отсутствии вибраций и ударов. Время выдержки  $t$  под нагрузкой для черных металлов составляет 10... 15 с, для цветных металлов и сплавов - от 10... 180 с. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее  $4d$ , а от центра отпечатка до края образца - не менее  $2,5d$ . Нагрузку на индентор выбирают с учетом коэффициента  $K = P/D^2$  (таблица 1 и 2). Диаметр отпечатка определяют как среднее арифметическое значение двух измерений во взаимно перпендикулярных направлениях. Корректным считают испытание, когда значения диаметров полученных отпечатков находятся в пределах  $0,2D < d < 0,6D$ .

Таблица 1- Значения нагрузки  $P$  в зависимости от  $K = 0,102 P/D^2$  ( $K = P/D^2$ )

Диаметр шарика, мм	Значения $P$ , Н		
	$K = 30$	$K = 10$	$K = 5$
2,5	1840	613	306,5
5	7355	2450	1225
10	29430	9800	4900

Таблица 2 - Значение коэффициента  $K$  для разных материалов, Н/мм<sup>2</sup>

Материал	Значение
Железо, сталь, чугун	294
Медь, никель и их сплавы	89
Алюминий, магний и их сплавы	49

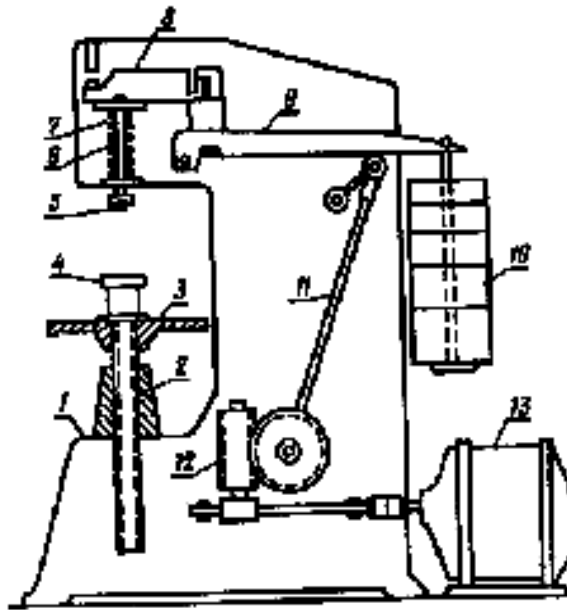


Рисунок 2 - Схема прибора Бринелля

На рисунке 2 приведена схема рычажного прибора Бринелля (тип ТШ).

Прибор имеет станину 1. Испытуемый образец устанавливают на предметный столик 4. Вращая маховик 3, винтом 2, поднимают образец до соприкосновения его с шариком 5 и далее до полного сжатия пружины 7, надетой на шпindelь 6. Пружина создает предварительную нагрузку на шарик, равную 1 кН, что обеспечивает устойчивое положение образца во время нагружения. После этого включают электродвигатель 13 и через червячную передачу редуктора 12, шатун 11 и систему рычагов 8, 9 с грузами 10 создают заданную полную нагрузку на шарик. На испытуемом образце получается шаровой отпечаток. После разгрузки прибора образец снимают и определяют диаметр отпечатка специальной лупой.

Твердость, измеренная по методу Бринелля для ряда металлов, связана эмпирической зависимостью с пределом их прочности при растяжении  $\sigma_b \approx K \cdot HB$ . Для кованных и катаных углеродистых сталей  $\sigma_b = 0,36 \cdot HB$ , для легированных сталей  $\sigma_b = (0,33 \dots 0,35) HB$ , для стального литья  $\sigma_b = (0,3 \dots 0,4) HB$ .

К преимуществам метода Бринелля относятся простота конструкции и надежность в работе применяемых для определения твердости приборов

К недостаткам метода Бринелля необходимо отнести невозможность испытания металлов, имеющих твердость более  $HB = 450$  мПа и толщину менее 2 мм. При испытании металлов с твердостью более  $HB = 450$  мПа возможна деформация шарика и результаты будут неточными.

Таблица 3 - Сводная таблица результатов замера твердости по Бринеллю

Наименование материала	Диаметр шарика $D$ , мм	Нагрузка $P$ , Н	Диаметр отпечатка $d$ , мм	$HB$ , мПа	$\sigma_B$ , мПа
Черные металлы 1. 2.					
Цветные металлы 1. 2. 3.					

**Метод Роквелла** основан на том, что в испытуемый образец вдавливаются алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  или реже закаленный стальной шарик диаметром 1,59 мм. Алмазный конус используют для твердых металлов, а шарик - для мягких.

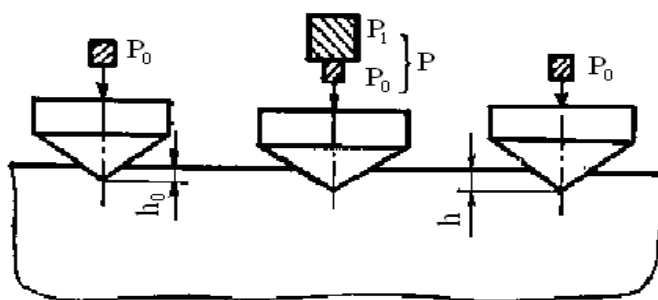


Рисунок 3 - Схема измерения твердости по Роквеллу

Шарик или алмазный конус (рисунок 3) вдавливают в испытуемый образец под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок предварительной  $P_0$ , равной 0,1 кН (10 кгс), и основной  $P_1$ . При вдавливании алмаза к нему прилагается общая нагрузка  $P$ , равная 0,6 кН (60 кгс) или 1,5 кН (150 кгс), а при вдавливании шарика - 1 кН (100 кгс). Соответственно этим нагрузкам на индикаторе прибора нанесены шкалы: черные  $A$  и  $C$  и красные  $B$ . Шкалой  $A$  пользуются при измерении твердости изделий с очень твердым поверхностным слоем, полученным, например, химико-термической обработкой (цементация, азотирование и др.), а также твердых сплавов с твердостью до  $HRA$  85. Шкалу  $C$  используют при измерении твердости закаленных сталей, обладающих твердостью до  $HRC$  67. Шкалой  $B$  пользуются при измерении твердости незакаленных сталей, цветных

металлов и сплавов, имеющих твердость до  $HRB$  100. Числа твердости по Роквеллу  $HRA$ ;  $HRB$ ;  $HRC$  измеряют в условных единицах и определяют по формулам: при вдавливании алмазного конуса:

$$HRC = 100 - \frac{h - h_0}{0,002},$$

при вдавливании шарика:

$$HRB = 130 - \frac{h - h_0}{0,002},$$

где: 100 - число черных делений шкалы  $C$  циферблата индикатора прибора, а 130 - число красных делений шкалы  $B$ ;  $h_0$  - глубина внедрения алмаза (шарика), мм, под действием предварительной нагрузки;  $h$  - глубина внедрения алмаза (шарика) под действием общей нагрузки, мм, замеренная после ее снятия с предварительной нагрузкой; 0,002 - глубина внедрения алмаза (шарика), мм, соответствующая перемещению стрелки индикатора на одно деление.

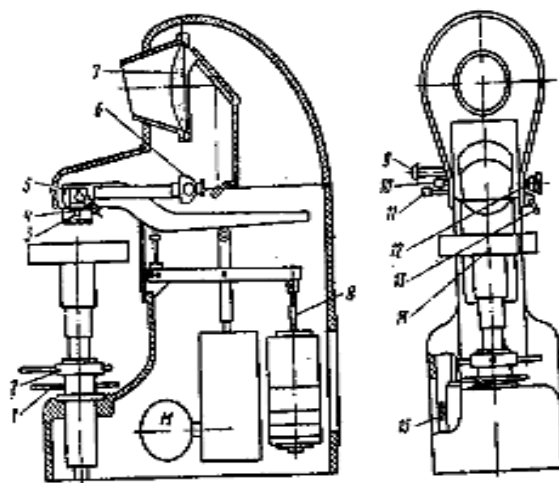
На рисунке 4 дана схема рычажного прибора Роквелла (тип ТК). Хорошо зачищенный испытуемый образец устанавливают на предметный столик 2. Затем вращением штурвала 1 по часовой стрелке поднимают образец до соприкосновения с алмазом или шариком 3. При дальнейшем вращении штурвала начинают перемещаться малая и большая стрелки циферблата индикатора 4 и создается предварительная нагрузка, равная 0,1 кН (10 кгс), препятствующая смещению образца во время испытания. Когда малая стрелка совместится с красной точкой, нанесенной на циферблат, вращение штурвала следует прекратить. После этого циферблат индикатора корректируют поворотом так, чтобы нулевое деление черной шкалы  $C$  стало против конца большой стрелки и соответственно против 30 деления красной шкалы  $B$ . Красная шкала  $B$  смещена относительно нулевого деления черной шкалы  $C$  на 30 делений, так как при испытании шариком большая стрелка может поворачиваться более чем на 100 делений. Поворотом рукоятки 5, расположенной с правой стороны прибора, в направлении от себя или включением электрического привода посредством грузов 7 создают основную нагрузку  $P_1$  на алмаз (шарик).





**Измерение твердости по Виккерсу.** Прибором ТП-2 (типа Виккерса) (рисунок 5) можно испытывать твердость изделий толщиной 0,15 мм и выше, а также поверхностные слои металла практически из любых материалов.

Им измеряют также твердость черных и цветных металлов и сплавов, а также тонких поверхностных слоев и покрытий твердостью от 8 до 1000 единиц по Бринеллю. Прибор ТП-2 снабжен стальным шариком, позволяющим определять твердость материалов по Бринеллю в пределах от 8 до 130 НВ.



1-клавиша, 2-гайка подъема винта, 3-объектив, 4-испытательный наконечник, 5-поворотная головка, 6-окуляр-микрометр, 7-экран, 8-подвеска, 9- кнопка поворота призмы, 10-короткий винт окуляра-микрометра, 11-длинный винт окуляра-микрометра, 12-винт окуляра-микрометра, 13-ручка поворота головки, 14-столик, 15-игла регулирования выдержки

Рисунок 5 - Прибор для определения твердости металлов методом вдавливания алмазной пирамиды (по Виккерсу)

Измерение методом Виккерса заключается во вдавливании под нагрузкой  $P$  в испытуемое изделие или образец в течение определенного времени наконечника в виде правильной четырехгранной алмазной пирамиды (с углом  $\alpha$  между противоположными гранями при вершине в  $136^\circ$ ), в определении боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка ( $\text{мм}^2$ ) и определении по расчету или таблицам числа твердости (рисунок 6). Диагонали отпечатка измеряются каждая в отдельности и числовое значение диагонали принимается как среднее арифметическое обоих измерений. Таким образом, определение твердости на приборе ТП-2

имеет две фазы: получение отпечатка на изделии и оптическое измерение отпечатка и определение числа твердости.

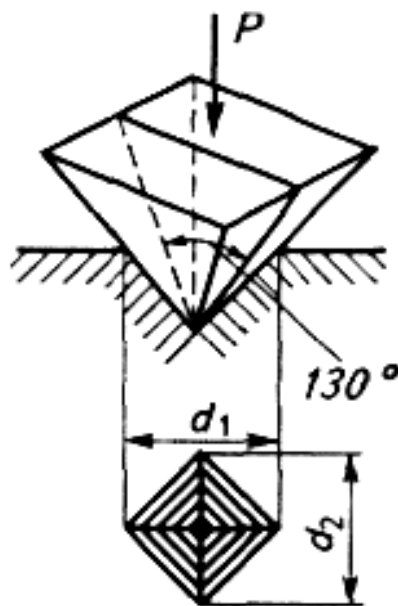


Рисунок 6 - Схема замера твердости по Виккерсу

Число твердости определяется по формуле (указание размерности, кгс/мм<sup>2</sup>, опускается).

$$HV = \frac{2P \sin \alpha / 2}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2},$$

где  $P$  - нагрузка, Н;

$\alpha$  - угол, равный 136°;

$d$  - среднее арифметическое обеих диагоналей отпечатка в мм после снятия нагрузки.

По размеру  $d$  отпечатка HV может быть определена без вычисления используя таблицы ГОСТа.

На приборе с алмазным наконечником применяются следующие испытательные нагрузки: 5; 10; 20; 30; 50 и 100 кг. Фактический вес отдельных гирь составляет 1/10 их номинального веса (соотношение плеч в рычажной системе равно 1:10).

Для большей точности измерения нагрузка  $P$  выбирается максимальной с учетом толщины испытуемого образца и ожидаемой твердости.

При измерении твердости должны быть соблюдены следующие условия:

1. Нагрузка до необходимого значения должна возрастать плавно.
2. Поверхность испытуемого образца должна быть блестящей (полированной) и не иметь посторонних включений. Гальванические покрытия, обезуглероженные или цементированные слои должны быть удалены. (Класс чистоты поверхности образца не ниже 8).
3. Механическая обработка и подготовка образцов не должны влиять на его твердость. Поверхность образца должна быть сухой и чистой.
4. Образец должен лежать на столике устойчиво, не прогибаться и не пружинить.
5. Наконечник должен быть перпендикулярен к поверхности образца или подготовленного участка изделия.
6. Минимальная толщина образца или слоя (например цементационного) должна быть больше диагонали отпечатка в 1,2 раза для стальных образцов и в 0,5 раза для образцов из цветных металлов.

**Порядок выполнения работы.** 1. Ознакомиться с устройством приборов Бринелля, Роквелла и Виккерса, принципом их работы и методикой измерения твердости.

2. Измерить твердость металлических образцов на приборе Бринелля и занести результаты измерения в таблицу 3.

3. Измерить твердость металлических деталей на приборах Роквелла и Виккерса, занести результаты измерения в таблицу 4.

4. Построить график зависимости твердости от марки материала.

**Содержание отчета.** В отчет необходимо включить понятие твердости; краткое описание методов определения твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу; области применения каждого из методов; преимущества и недостатки методов Бринелля и Роквелла. Данные экспериментов занести в таблицу. В выводах проанализировать построенный график.

## ***Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №2***

1. Что такое твердость?
2. Перечислите приборы для измерения твердости; как обозначаются величины твердости, полученные на этих приборах?
3. Какие инденторы (наконечники) используются при испытании твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу?
4. В каких единицах измеряется твердость материалов по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу?
5. Какие преимущества и недостатки имеет способ определения твердости по Бринеллю?
6. Какие преимущества и недостатки имеет способ определения твердости по Роквеллу?
7. В чем особенности измерения твердости материалов по Роквеллу? Как обозначается твердость материалов по Роквеллу?

## ***Лабораторная работа 3***

### **Макроструктурный анализ металлов и сплавов**

***Цель работы:*** изучить методику макроструктурного анализа металлов и сплавов (макроанализ).

**Теоретические сведения.** Макроанализ - исследование структуры металлов и сплавов невооруженным глазом или при увеличении до 30 раз через лупу. При макроанализе применяют два метода: метод изломов и метод макрошлифов.

***Метод изломов*** позволяет установить характер предшествующей обработки металлов давлением, величину зерен, вид чугуна, дефекты внутреннего строения (поры, трещины и др.). Для изучения излома образцы ломают, и место излома изучают визуально или пользуются лупой.

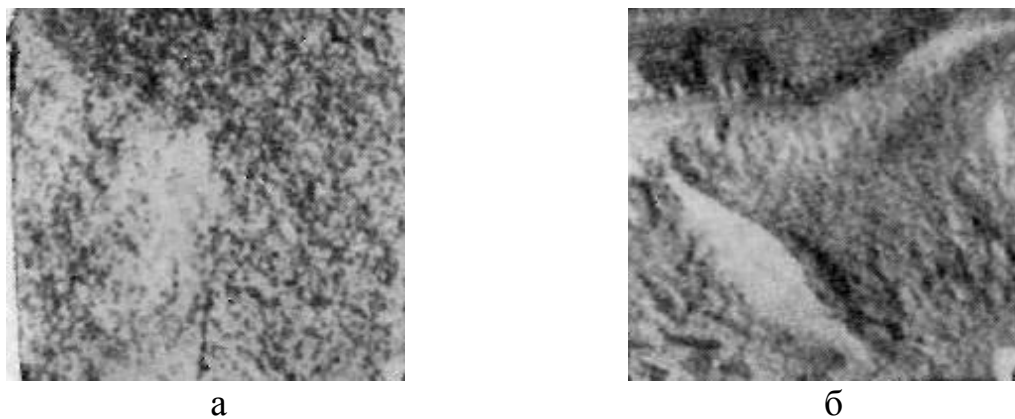


Рисунок 1 - Излом металла  $\times 4$ : *а* - крупнозернистый; *б* – мелкозернистый

Метод изломов также применяют для исследования образцов разрушившихся в процессе эксплуатации (рисунок 2).

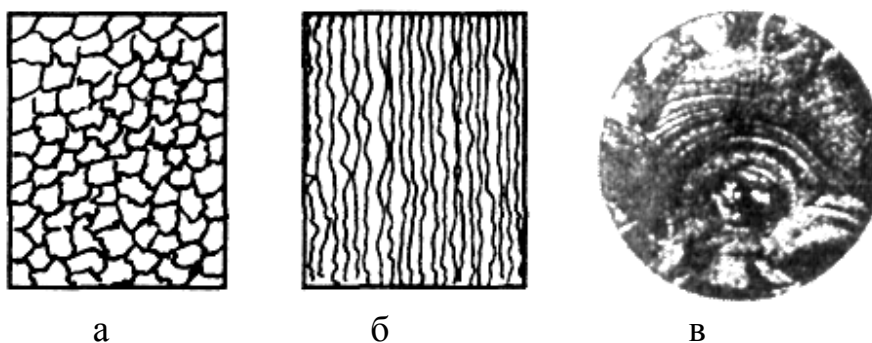


Рисунок 2 - Схемы макроструктур изломов наступивших в процессе эксплуатации: *а* - кристаллический; *б* - волокнистый; *в* - усталостный

*Кристаллический излом* (см. рисунок 2, *а*) возникает при разрушении металла по границам зерен под действием динамических (ударных) нагрузок и характерен для хрупких металлов.

*Волокнистый излом* (см. рисунок 2, *б*) соответствует вязкому разрушению, проходящему по зерну металла; образуется под действием статических (постоянных или постепенно возрастающих) или знакопеременных нагрузок и характерен для образцов или деталей, полученных методами обработки металлов давлением.

*Усталостный излом* (см. рисунок 2, *в*) образуется при циклических нагрузках. Причиной образования бывает либо неоднородность строения и состава металла (включения, ликвация, поры и т. д.), либо состояние поверхности (трещины, надрезы), т. е. дефекты, вызывающие местную



концентрацию напряжений. В местах концентрации напряжений при многократном повторении нагрузок возникают микротрещины, которые постепенно увеличиваются, что в итоге ведет к хрупкому разрушению. Усталостный излом имеет две четко выраженные зоны: 1) получившуюся внезапно в момент разрушения образца и напоминающую обычный (крупнокристаллический) излом; 2) образовавшуюся постепенно (в период развития трещин) под действием циклической нагрузки. Поверхность излома во второй зоне гладкая, как бы притертая, а наличие в ней концентрических линий указывает на постепенное разрушение металла от усталости.

*Метод макрошлифов* дает возможность исследовать структуру, образующуюся в процессе кристаллизации или последующей обработки давлением. Этим способом можно выявить волокнистость, ликвацию серы и фосфора, различного вида дефекты: усадочную раковину, газовые пузыри, поры, трещины и др. Макрошлиф готовят шлифованием образца. Подготовленную поверхность травят соответствующим реактивом для выявления структуры.

Волокнистость, возникающую при обработке металлов давлением, выявляют глубоким травлением одной отшлифованной стороны образца в сильных кислотах, нагретых до 70...100°C. При этом примеси, скопившиеся на границах зерен, растворяются быстрее основного металла, в результате чего образуется рельефная поверхность в виде тонких волокон. Волокнистость, повторяющая конфигурацию сечения детали, свидетельствует о правильной технологии горячей обработки давлением (рисунок 3).

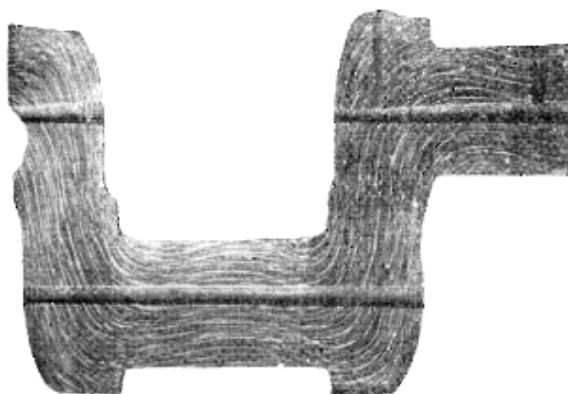


Рисунок 3 - Макроструктура коленчатого вала мотора с правильно расположенными волокнами. Травление 50%-ной соляной кислотой

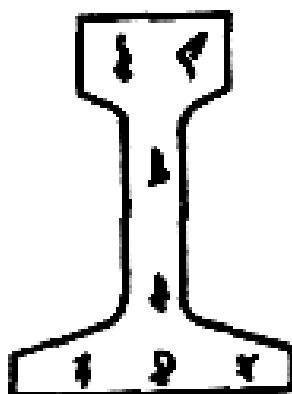
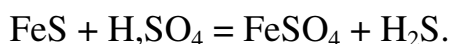


Рисунок 4 - Ликвация серы в стали

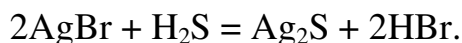
При несоответствии расположения волокон контуру детали в местах перехода от одной конфигурации к другой создаются напряжения, сокращающие эксплуатационный срок ее службы.

Для выявления в образце ликвации серы применяют *метод Баумана*. Фотографическую бромосеребряную бумагу на свету смачивают 5%-ным водным раствором серной кислоты, выдерживают 5...10 мин и слегка просушивают между листами фильтровальной бумаги. После этого на шлиф исследуемой детали накладывают фотобумагу и осторожно, не допуская ее смещения, проглаживают рукой для удаления пузырьков воздуха. Фотобумагу на шлифе выдерживают 2...3 мин. При этом сернистые соединения FeS и MnS, содержащиеся в стали, взаимодействуют с серной кислотой:



Подобная же реакция протекает при взаимодействии с сернистым марганцем.

Выделившийся сероводород вступают в реакцию с бромистым серебром фотографической бумаги:



Для закрепления отпечатка на фотобумаге ее после снятия с макрошлифа помещают на 10...15 мин в 25%-ный водный раствор гипосульфита, затем промывают водой и сушат. В результате сера обнаруживается на поверхности фотобумаги в виде сернистого серебра ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ). Темно-коричневые пятна указывают на места, обогащенные серой, на форму скоплений сульфидов по сечению образца (рисунок 4).

В стали сернистое железо образует с железом легкоплавкую эвтектику, которая располагается преимущественно по границам зерен и плавится при  $985^\circ\text{C}$ . Поэтому при горячей обработке сталей давлением при температурах выше  $1000^\circ\text{C}$  эвтектика быстро расплавляется, разобцая зерна, и в металле образуются надрывы и трещины. Такое явление носит название краснеломкости. Вредное влияние серы на сталь также усиливается при неравномерном распределении ее по сечению образца (ликвация).

### **Порядок выполнения работы.**

1. Ознакомиться с образцами изломов и макрошлифами.
2. Зарисовать по образцам:
  - а) изломы с выявлением размеров зерен;
  - б) макроструктуру шлифов образцов с выявлением распределения волокон в деталях (оценить правильность конфигурации волокон, размер зоны термического влияния сварного соединения, глубину закалки и др.).
3. Выявить на шлифе ликвацию серы по способу Баумана и получить фотоотпечаток.

**Содержание отчета.** В отчет необходимо включить: описание способов макроанализа; схемы макроструктур; описание определения

ликвации серы по Бауману; отпечаток ликвации серы в образце. В выводах дать оценку влияния характера макроструктуры на свойства металла.

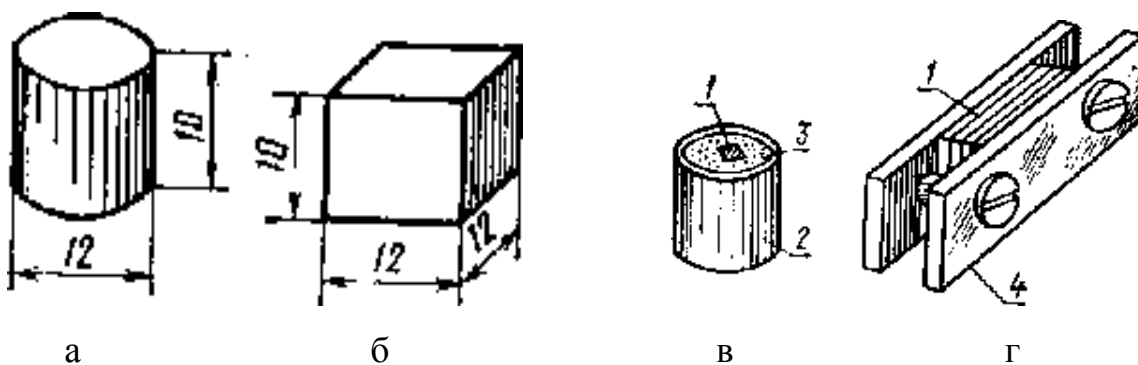
### ***Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №3***

1. В чем заключается макроанализ?
2. Какие методы применяются при макроанализе? Каковы особенности данных методов?
3. Какие виды изломов бывают? В чем их особенность?
4. Что такое волокнистость? Для каких целей выявляют волокнистость?
5. Что такое ликвация?
6. В чем сущность явления краснеломкости?
7. Для каких целей применяется и в чем заключается метод Баумана?

## ***Лабораторная работа 4***

### **Микроструктурный анализ металлов и сплавов**

**Цели работы:** освоить технологию приготовления микрошлифов, ознакомиться с устройством металлографического микроскопа, изучить микроструктуры шлифа до и после травления; уяснить принцип выявления структур и практическое значение данного метода.



*а* и *б* - без приспособлений; *в* и *г* - в приспособлениях (1 - образец; 2 - трубка; 3 - сера и легкоплавкий сплав; 4 - струбцина)

Рисунок 1 - Виды металлографических образцов для приготовления микрошлифов

**Теоретические сведения.** Микроанализ применяют для изучения внутреннего строения металлов и сплавов на оптическом микроскопе при увеличении от 50 до 1500 раз или на электронном микроскопе при увеличении порядка 5000 - 20 000 раз.

***Впервые в мире структуру высококачественной стали (булатной) исследовал с помощью микроскопа инженер Павел Петрович Аносов в 1831 г.***

Для проведения микроисследования от изучаемой детали или заготовки отрезают образец, который специально обрабатывают для придания одной из его поверхностей прямолинейности и зеркального блеска. Образец, подготовленный к микроанализу, называют микрошлифом. На практике приходится изготавливать шлифы больших размеров (рисунок 1, а, б) и малых (рисунок 1, в, г). При изготовлении микрошлифов из образцов малых размеров (проволока, стружка, листы и др.) для их надежного крепления используют специальные струбцины (рисунок 1, г) или заливают образцы легкоплавким сплавом Вуда (50% Bi, 25% Pb, 12,5% Sn и 12,5% Cd) с температурой плавления 68 °С, серой или пластмассой (рисунок 1, в).

Для проведения микроанализа необходимо: изготовить шлиф; изучить под микроскопом структуру на полированной поверхности шлифа (до травления); протравить полированную поверхность; изучить, под микроскопом структуру протравленной поверхности шлифа.

*Изготовление микрошлифа* включает следующие операции: отрезку образца, его торцовку, шлифование и полирование.

*Отрезка* образца нужных размеров проводится резцом или ножовкой (при твердости металла  $HV < 300$ ) или дисковым шлифовальным кругом (при твердости металла  $HV > 300$ ) с охлаждением водой или эмульсией, чтобы образец не нагревался свыше 150°С и его структура не изменялась.

*Торцовка* шлифа осуществляется с целью придания прямолинейности одной из его поверхностей и проводится опиловкой напильником или шлифовальным кругом.

*Шлифование* необходимо для удаления рисок, оставшихся от торцовки. Это достигается обработкой поверхности шлифа шлифовальной бумагой различной зернистости (разных номеров). Шлифовальная бумага отечественного производства имеет следующую нумерацию: 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3 (номер обозначает примерную величину зерна в сотых долях миллиметра). Для предварительного чернового шлифования берут бумагу первых четырех номеров. Заканчивают шлифование бумагой номерами 5...3 с мелкими абразивными зёрнами. Шлифование проводят вручную или на специальном шлифовальном станке. Вручную образец шлифуют так. Наждачную бумагу кладут на толстое стекло, затем образец (шлиф) прижимают к бумаге и, удерживая его тремя пальцами, перемещают по ней в одном направлении, но обязательно перпендикулярно рискам от предыдущей обработки. Этого правила необходимо придерживаться и при переходе с одного номера шлифовальной бумаги на другой, для удобства наблюдений за выведением рисок и ускорения процесса шлифования.

*Полирование* проводят на быстровращающемся диске с сукном, которое смачивается водой с взвешенными в ней частицами какого-либо абразива (окись хрома или алюминия). Частицы окиси металла весьма тверды, поэтому во время полирования они производят резание металла образца. Так как эти частицы дисперсны, они способны снимать мельчайшие неровности, делая поверхность шлифа зеркального вида, без рисок даже при рассмотрении под микроскопом. Готовый полированный шлиф последовательно тщательно промывают водой, спиртом и сушат, прикладывая (промокая) фильтровальную бумагу.





*а* - оксиды; *б* - сульфиды; *в* - графит

Рисунок 2 - Неметаллические включения в стали и чугуне

*Изучение полированной поверхности шлифа* под микроскопом преследует цель определить качество его изготовления (отсутствие следов обработки) и установить характер расположения и размеров микроскопических трещин, неметаллических включений - графита, сульфидов, оксидов (рисунок 2) в металлической основе (имеет светлый вид при рассмотрении под микроскопом).

*Выявление структуры* металлической основы шлифа после полирования осуществляется травлением его реактивом. Для стали и чугуна чаще всего применяют 2...5%-ный раствор азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) в этиловом спирте. Полированную поверхность шлифа погружают в реактив на 3...15 с или протирают ватой, смоченной в реактиве, до появления ровного матового оттенка без наличия каких-либо пятен. Затем шлиф промывают спиртом или водой и просушивают фильтровальной бумагой.

Известно, что любой металл или сплав является поликристаллическим телом, т. е. состоит из большого числа различно ориентированных кристаллитов или зерен. На границах зерен (даже чистейших металлов) обычно располагаются различные примеси. Эти примеси и структурные составляющие двухфазного строения (механические смеси) под действием реактива образуют микроскопические гальванические пары, что способствует более быстрому их растворению. Однофазные структуры (чистые металлы, твердые растворы, химические соединения) травятся медленнее. В результате неодинаковой

степени травимости структурных составляющих на поверхности шлифа создается микрорельеф (рисунок 3).

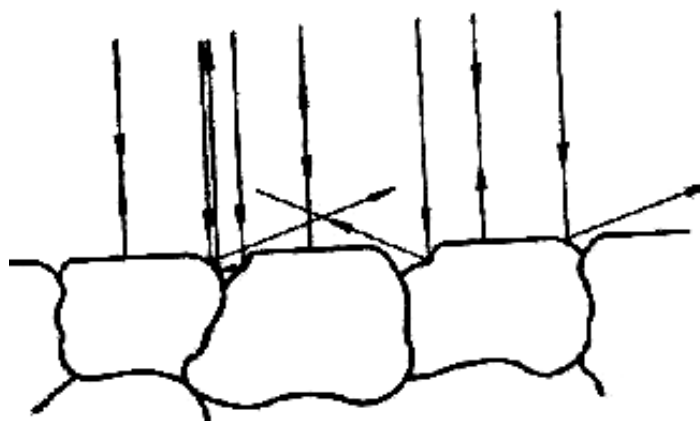


Рисунок 3 - Схемы отражения лучей от плоскости зерна и от его границ

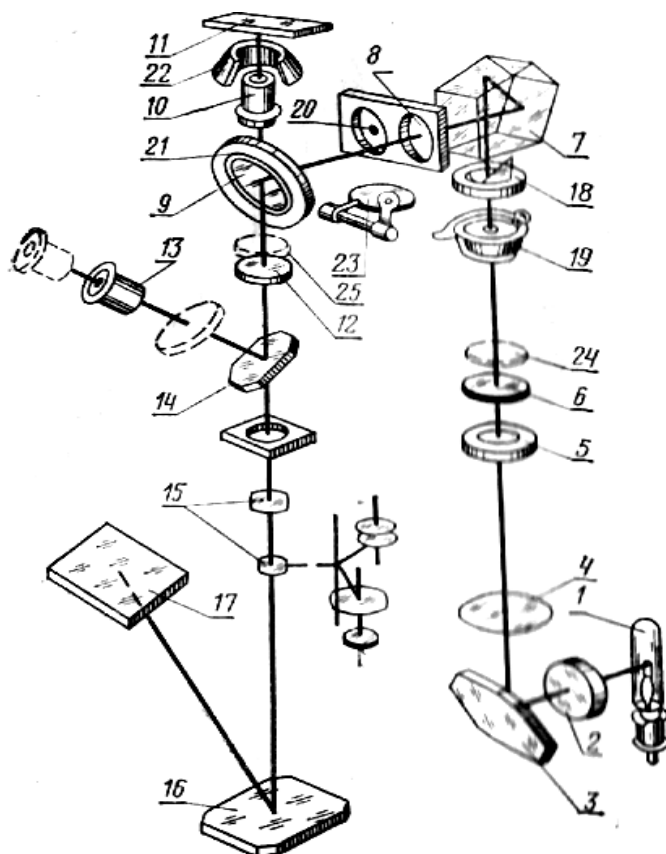
*Изучение протравленной поверхности шлифа* под оптическим микроскопом позволяет увидеть микроструктуру металлической основы. Она обычно состоит из светлых и темных участков. Это объясняется неодинаковой степенью отражения света от структурных составляющих. Структура, растворившаяся на большую глубину, под микроскопом имеет темный цвет (рисунок 3, а), так как дает больше рассеивающих лучей; структура же, растворившаяся меньше, за счет прямого отражения света имеет светлый цвет (рисунок 3, б). Границы зерен будут видны в виде тонкой темной сетки (рисунок 3, б). Часто зерна металла одного и того же фазового состава под микроскопом могут иметь различные оттенки.

Это объясняется тем, что каждое зерно в плоскости шлифа имеет свое сечение кристаллической решетки с различным количеством в нем атомов, а следовательно, и свойства зерен отличаются одно от другого способностью протравливаться, прочностью и др. Такое явление называется анизотропией.

*Строение металла, наблюдаемое в металлографическом микроскопе, называется микроструктурой*, которая представляет собой изображение весьма малого участка поверхности, составленное из отраженных от него световых лучей.

Принципиальная оптическая схема металлографического микроскопа МИМ-7 показана на рисунке 4. Увеличение микроскопа определяется произведением увеличения окуляра на увеличение объектива 10. Объектив дает обратное увеличенное действительное изображение. Окуляр, как обычная лупа, укрупняет изображение, полученное объективом.

В результате изучения микроструктуры можно установить: количество структурных составляющих сплава и характер их расположения; величину зерен (путем их сопоставления со специально установленной шкалой или непосредственным измерением, зная величину увеличения); вид термической обработки и правильность выбора ее режима (температуры нагрева, скорости охлаждения) - приближенное содержание некоторых элементов, например углерода, в отожженных сталях.



1 - осветитель (лампа); 2 - коллектор; 3 - зеркало; 4 - линза; 5 - аппаратная диафрагма; 6 - линза; 7 - призма; 8 - линза; 9 - отражательная пластинка; 10 - объектив; 11 - объект; 12 - ахроматическая линза; 13 - окуляр; 14 - зеркало; 15 - фотоокуляр; 16 - зеркало; 17 - фотопластинка; 18 - полевая диафрагма; 19 - затвор; 20 - линза для работы, в

темном поле; 21 - кольцевое зеркало; 22 - параболическое зеркало; 23 - заслонка (включается при работе в темном поле); 24 - поляризатор; 25 – анализатор.

Рисунок 4 - Оптическая схема микроскопа МИМ – 7

Между структурой и свойствами металлов и сплавов существует прямая зависимость. Поэтому в практике металловедения микроанализ является одним из основных методов, позволяющих изучить строение металлов и сплавов, получить сведения об их свойствах.

#### ***Порядок выполнения работы.***

1. Механически обработать образец для приготовления микрошлифа (шлифование, полирование).
2. Изучить микроструктуру шлифа под микроскопом до травления.
3. Определить общее увеличение микроскопа.
4. Зарисовать схему увеличенной микроструктуры, указав строение сплава (неметаллические включения, металлическую основу). Пользуясь шкалой баллов, определить балл оксидов и сульфидов (ГОСТ 1778 - 70).
5. Протравить шлиф реактивом.
6. Изучить микроструктуру шлифа под микроскопом после травления.
7. Зарисовать схему микроструктуры после травления, указав строение сплава (границы зерен, зерна однородного и неоднородного строения, размер зерна), пользуясь для этого шкалой величины зерна (ГОСТ 5639 - 65).

***Содержание отчета.*** В отчет необходимо включить: технологию приготовления микрошлифа; реактив, применяемый для травления стали и чугуна; оптическую схему металлографического микроскопа и ее краткое описание; схемы микроструктур и их описание. В выводах указать особенности строения исследуемого металла, выявленные микроанализом до травления и после травления, наличие неметаллических включений, дефектов, размер, форму зерен и их влияние на свойства (красноломкость), прочность, твердость, пластичность.

#### ***Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №4***

1. В чем заключается микроанализ?
2. Что такое микрошлиф?
3. Что такое микроструктура?
4. В чем особенность основных стадий изготовления микрошлифа?
5. Механизм выявления микроструктуры?
6. Что можно выявить, изучая микроструктуру?

## ***Лабораторная работа 5***

### **Определение критических точек и построение диаграммы состояния двойных сплавов олово - цинк**

***Цель работы:*** изучить методику построения термических кривых при кристаллизации чистых металлов и двойных сплавов: определения на них критических точек; освоить методику построения диаграмм состояния двойных сплавов термическим методом на примере диаграммы состояния сплава олово - цинк.

***Теоретические сведения.*** При кристаллизации чистых металлов и сплавов происходят превращения, связанные с изменением фазового состава и сопровождающиеся выделением теплоты. Для определения температур соответствующих превращений используют метод термического анализа, который заключается в построении: кривых изменения температуры во времени, или термических кривых (рисунок 1).

Если превращение идет с выделением теплоты (экзотермически), то наблюдается замедление скорости охлаждения. При этом термическая кривая в соответствующих интервалах температур идет полого, с меньшим углом наклона к оси абсцисс:  $\alpha_2 < \alpha_1$  (см. рисунок 1, а, б).

При определенных условиях, когда охлаждение чистого металла или сплава компенсируется эквивалентным количеством выделяемой теплоты, превращение происходит при постоянной температуре (изотермически), что соответствует горизонтальному участку на термической кривой. Такие термические кривые характерны для чистых металлов, устойчивых химических соединений и эвтектических сплавов (см. рисунок 1, а, б).

Если на термических кривых образуются перегибы, свидетельствующие об изменении скорости охлаждения, то превращение происходит в интервале температур (см. рисунок 1, б, точки 1, 2).



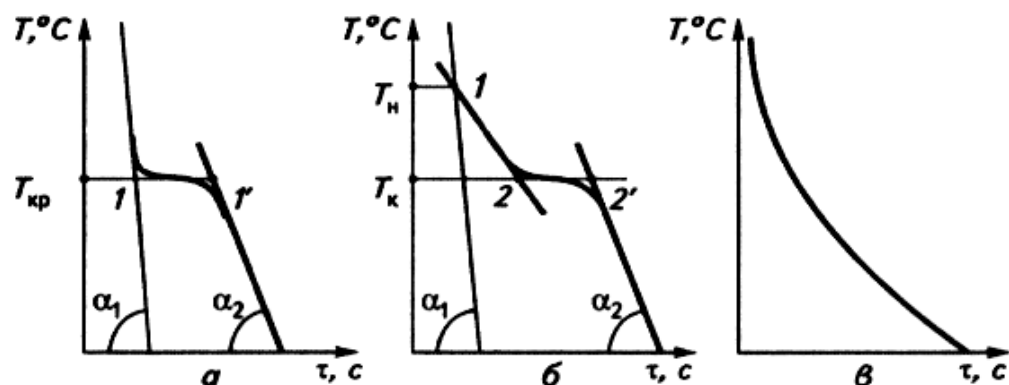


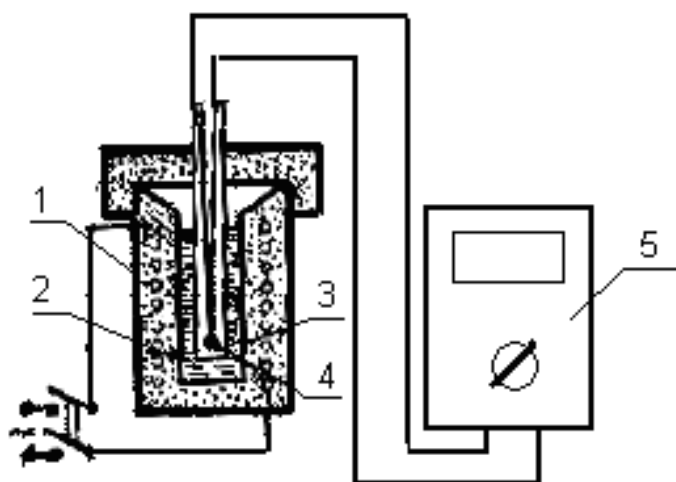
Рисунок 1 - Термические кривые кристаллизации: *а* - чистого металла; *б* - эвтектического сплава; *в* - аморфного вещества

При затвердевании аморфных тел (парафин, стеарин, воск, смола и др.) превращений, связанных с поглощением или выделением теплоты, не происходит, поэтому термическая кривая изменяется плавно (см. рисунок 1, в).

Температуры на термической кривой, соответствующие началу ( $T_n$ ) и концу ( $T_k$ ) фазовых превращений, называются *критическими точками* (см. рисунок 1, б). Положение критических точек на термических кривых зависит от скорости охлаждения. С увеличением скорости охлаждения температуры критических точек на термических кривых понижаются пропорционально увеличению скорости охлаждения. Поэтому термические кривые строят при медленном охлаждении в условиях, близких к равновесным.

Точки  $1, 1'$  на термической кривой (рисунок 1, а) соответствуют равновесной температуре кристаллизации  $T_{кр}$ , близкой к температуре плавления чистого металла, точка  $1$  на термической кривой рисунка 1, б - температуре начала кристаллизации сплава  $T_n$ , точка  $2'$  - температуре конца кристаллизации  $T_k$ .

Построение диаграмм состояния начинают с термических кривых. Критические точки на термических кривых используют для построения диаграмм состояния двойных сплавов.



1 - электропечь; 2 - тигель; 3 - термопара; 4 - расплавленный металл или сплав; 5 – мультиметр

Рисунок 2 - Схема установки для определения критических точек металлов и сплавов

Для построения кривых охлаждения навеску чистого металла или сплава помещают в тигель 2 (рисунок 2) и расплавляют в электрической нагревательной печи 1, нагревая на 30...50 °С выше температуры плавления. Для предотвращения окисления зеркало расплава покрывают слоем мелкого древесного угля. Расплавленный чистый металл или сплав 4 перемешивают фарфоровой или графитовой палочкой, затем устанавливают в него термопару 3. Термоэлектродвижущую силу (термо ЭДС), возникающую в спае термопары, измеряют при помощи мультиметра 5.

Тигель закрывают крышкой из огнеупорного материала. Показания милливольтметра фиксируют через каждые 10...15 с до окончания процесса кристаллизации и в течение 2...3 мин после кристаллизации. Результаты записи оформляют графически в виде кривых охлаждения в координатах температура - время.

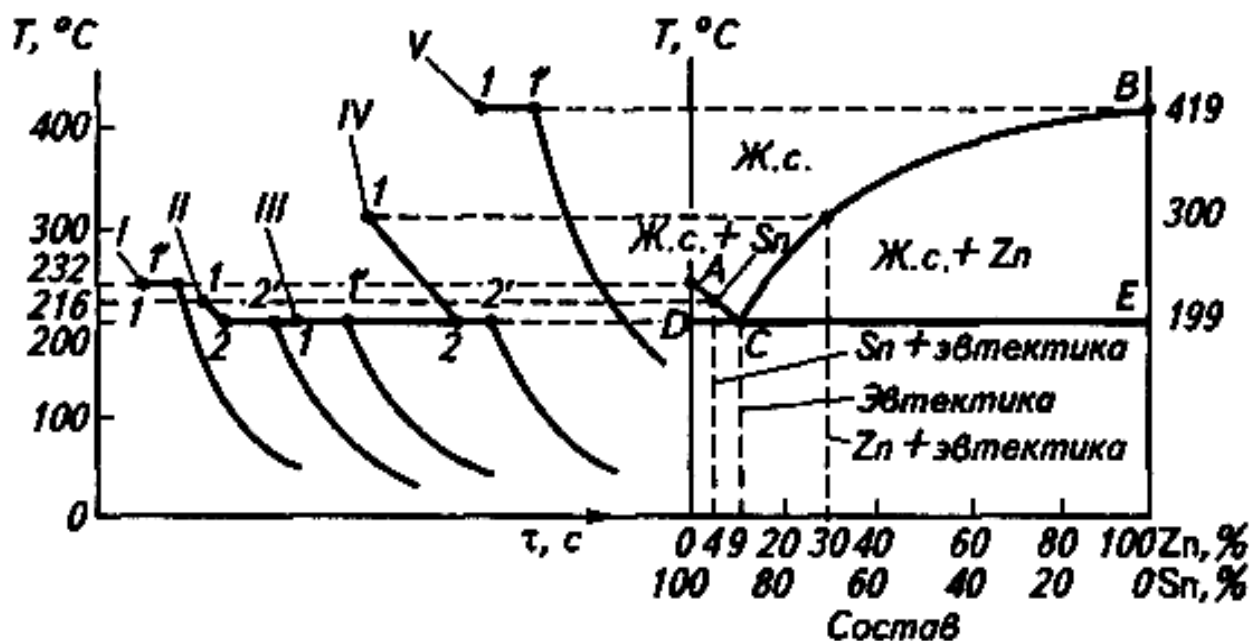


Рисунок 3 - Построение диаграммы состояния сплавов олово – цинк

Диаграмма состояния двойных сплавов представляет собой графическое изображение изменения фазового и структурного состояния сплавов в зависимости от температуры  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и концентрации компонентов (%). Левая крайняя точка на оси абсцисс соответствует 100% -ному содержанию первого компонента (рисунок 3). Процентное содержание второго компонента откладывают по этой оси слева направо, в связи с чем правая крайняя точка соответствует 100%-ному содержанию второго компонента.

Поскольку в данной работе следует освоить методику построения диаграммы состояния сплавов олово - цинк, то для построения диаграммы используем чистые металлы олово и цинк и несколько сплавов этих металлов, например 4 % Zn и 96 % Sn; 9 % Zn и 91 % Sn; 30 % Zn и 70 % Sn. Затем для каждого из выбранных сплавов (кривые II...IV) и чистых металлов (кривые I, V) строим термические кривые и определяем на них критические точки по методике, описанной ранее. Критические точки, соответствующие температурам начала и конца фазовых превращений олова, цинка и выбранных сплавов, переносим в координаты температура - концентрация и

соединяем линиями. Полученные линии представляют собой геометрическое место критических точек и образуют диаграмму состояния.

Термические кривые и диаграмма состояния сплавов олово - цинк показаны на рисунке 3. Линия *ACB* соответствует температурам начала кристаллизации чистых металлов и сплавов или температурам конца их плавления; ее называют *линией ликвидуса* (от лат. *liquidus* - жидкий). Линию *DCE*, соответствующую температурам конца кристаллизации, называют *линией солидуса* (от латинского *solidus* - твердый). Кроме того, на диаграмме состояния сплава олово - цинк эта линия является эвтектической.

Сплав, соответствующий по концентрации олова и цинка точке *C* (кривая *III*), называют эвтектическим. Сплав эвтектического состава (эвтектика) имеет наименьшую температуру плавления по сравнению с другими сплавами. Сплавы, располагаемые по оси концентрации компонентов левее точки *C* (кривая *II*), называют доэвтектическими, правее точки *C* (кривая *IV*) - заэвтектическими.

Для анализа термических кривых при кристаллизации сплавов применяют правило фаз (правило Гиббса).

**Фазой** называют химически однородную по составу, строению и свойствам часть сплава, отделенную от других его частей поверхностью раздела.

Правило Гиббса выражает общие закономерности совместного существования устойчивых фаз, отвечающих теоретическим условиям равновесия, и дает количественную зависимость между числом степеней свободы системы и числом фаз и компонентов:

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

где *C* - число степеней свободы; *K* - число компонентов: для сплавов олово - цинк  $K = 2$ ;  $\Phi$  - число фаз; *P* - количество внешних факторов, воздействующих на систему (давление и температура).

Под числом степеней свободы (вариантностью) системы понимают число внешних и внутренних факторов (температура, давление и

концентрация), которые можно изменить, но система при этом останется в равновесии. Если число степеней свободы равно нулю (инвариантная система), то нельзя менять ни температуру, ни давление, ни концентрацию без того, чтобы это не вызвало изменения числа фаз. Если число степеней свободы равно единице (моновариантная система), то возможно изменение в некоторых пределах одного из перечисленных факторов, так как это не вызовет увеличения или уменьшения числа фаз.

В реальных условиях  $P = 1$ , так как рассматриваемые превращения в системе происходят при неизменном давлении, поэтому приведенная выше формула имеет вид:

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

Используя термическую кривую, рассмотрим процесс кристаллизации доэвтектического сплава (II). Выше точки 1 сплав находится в жидком состоянии (Ж. с), т. е. существует одна фаза - жидкость. В данном случае

$C = 2 - 1 + 1 = 2$ . При двух степенях свободы в этой области могут изменяться концентрация и температура, и сплав остается в жидком состоянии. Кривая охлаждения круто опускается.

В точке 1 на линии ликвидуса начинается процесс кристаллизации - выделение кристаллов олова из жидкого сплава, которое продолжается до точки 2. Кривая охлаждения в этом случае снижается полого.

Между точками 1 и 2 существуют две фазы - жидкая и твердая. В данном случае число степеней свободы  $C = 2 - 2 + 1 = 1$ . При одной степени свободы независимой переменной является только температура.

Концентрация жидкой части сплава из-за выделения из нее кристаллов олова с понижением температуры меняется по линии AC и при  $T = 199\text{ }^{\circ}\text{C}$  достигает эвтектического состава (точка C). При температуре, соответствующей этой точке, происходит эвтектическая кристаллизация оставшейся жидкой части сплава. Жидкость превращается в эвтектическую (механическую) смесь кристаллов Sn и Zn: Ж. с.  $\rightarrow$  Э (Sn + Zn). При

эвтектическом превращении одновременно существуют три фазы: жидкость, олово и цинк. Число степеней свободы  $C = 2 - 3 + 1 = 0$ . Превращение происходит при постоянной температуре, что соответствует горизонтальному участку на кривой охлаждения сплава II.

Ниже точки 2 сплав переходит в твердое состояние и его структура состоит из кристаллов олова и механической смеси кристаллов олова и цинка (эвтектики). В этом случае число степеней свободы  $C = 2 + 1 = 1$ . Кривая кристаллизации сплава опускается полого.

**Порядок выполнения работы.** Работу выполняют несколько бригад студентов. Число бригад соответствует числу тиглей со сплавами и чистыми металлами.

1. Взять тигли с чистым оловом, цинком и тремя сплавами: доэвтектическим (4% Zn), эвтектическим (9% Zn) и заэвтектическим (30% Zn), нагреть на 20...30 °С выше температуры плавления металла (сплава). Температуру нагрева замерить термоэлектрическим пирометром.

2. Выключить ток и охладить тигли с расплавленными металлами и сплавами, фиксируя показания гальванометра через 10...15 с. После затвердевания металла (сплава) и получения температурной площадки на кривой охлаждения (линия постоянной температуры) снять ещё 3...5 показаний мультиметра (через 10...15 с каждое). Данные занести в таблицы (см. ниже)

3. По результатам опытов построить на миллиметровой бумаге кривые охлаждения и для каждой кривой указать процентный состав сплава (при построении кривых охлаждения удобно брать масштаб: 15 с = 1 мм и 10°С = 1 мм).

4. По кривым охлаждения построить диаграмму состояния сплавов олово - цинк. Критические точки кривых охлаждения, перенесенные для соответствующих концентраций на диаграмму состояния, обвести кружками. В случае рассева опытных точек допустимо проведение средних линий.



**Содержание отчета.** В отчет необходимо включить назначение метода термического анализа построения диаграммы состояния; схему установки для исследования металлов и сплавов термическим методом; протокол опытных данных, кривые охлаждения и диаграмму состояния сплавов олово - цинк. В выводах дать анализ превращений при охлаждении или нагревании одного из сплавов с использованием правила фаз.

Изменение температуры при охлаждении 100% Sn

Номер замера	1	2	3	...	<i>n</i>
Температура металла					

Изменение температуры при охлаждении доэвтектического сплава Sn-Zn (96% Sn 4% Zn)

Номер замера	1	2	3	...	<i>n</i>
Температура сплава					

Изменение температуры при охлаждении эвтектического сплава Sn-Zn (91% Sn 9% Zn)

Номер замера	1	2	3	...	<i>n</i>
Температура сплава					

Изменение температуры при охлаждении заэвтектического сплава Sn-Zn (70% Sn 30% Zn)

Номер замера	1	2	3	...	<i>n</i>
Температура сплава					

Изменение температуры при охлаждении 100% Zn

Номер замера	1	2	3	...	<i>n</i>
Температура металла					

**Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №5**

1. Что такое сплав?

2. В чем особенности кривых кристаллизации чистого металла, сплава и аморфного вещества?
3. В чем состоит методика построения диаграммы состояния сплавов? Каково практическое значение диаграмм состояния сплавов?
4. Что такое фаза?
5. Что такое эвтектика? Где она находится на диаграмме состояния?
6. Что характеризуют линии ликвидус и солидус? Где они находятся на диаграмме состояния?
7. В чем заключается правило Гиббса?

## *Лабораторная работа 6*

### **Диаграмма состояния системы железо-цементит**

**Цели работы:** изучить линии, точки и области диаграммы железо-цементит, её фазы и структуры; превращения в сплавах с различным содержанием углерода при нагревании и охлаждении; применение правил фаз и отрезков.

Сплавы железа с углеродом (стали и чугуны) самые распространенные материалы во всех отраслях промышленности.

К углеродистым сталям относятся сплавы железа с углеродом с массовой долей углерода от 0,02 до 2,14 %.

Основными компонентами углеродистых сталей являются железо и углерод.

**Чистое железо** - серебристо-светлый металл, имеющий температуру плавления  $1539^{\circ}\text{C}$  и плотность  $7,86 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Железо обладает невысокой твердостью и прочностью и хорошей пластичностью:  $\text{HV } 800 \text{ МН/м}^2$ ; предел прочности  $\sigma_{\text{в}} \approx 250 \text{ МПа}$ ; пластичность  $\delta \approx 30\%$ . Железо имеет несколько аллотропических форм, которые показаны на кривой охлаждения (рисунок

1). Первая температурная остановка происходит при 1539 °С, когда железо из жидкого состояния переходит в твердое. Образуется  $\delta$ -железо ( $\delta$ -Fe) с кристаллической решеткой объемно-центрированного куба параметром  $a=2,93\text{ \AA}$  (кХ). (1Ангстрем -  $1\text{ \AA}=10^{-10}\text{ м} = 0,1\text{ нм.}$ ) При 1400° С  $\delta$  - Fe переходит в аллотропическую форму  $\gamma$ -железо ( $\gamma$ -Fe) с кристаллической решеткой гранецентрированного куба параметром  $a=3,64\text{ \AA}$ . При 910° С  $\gamma$ -железо переходит в  $\beta$ -Fe с решеткой объемно-центрированного куба параметром  $a=2,90\text{ \AA}$ . Далее при 768° С (точка Кюри) немагнитное  $\beta$ -железо переходит в магнитное  $\alpha$ -Fe с решеткой объемно-центрированного куба параметром,  $a=2,86\text{ \AA}$ .

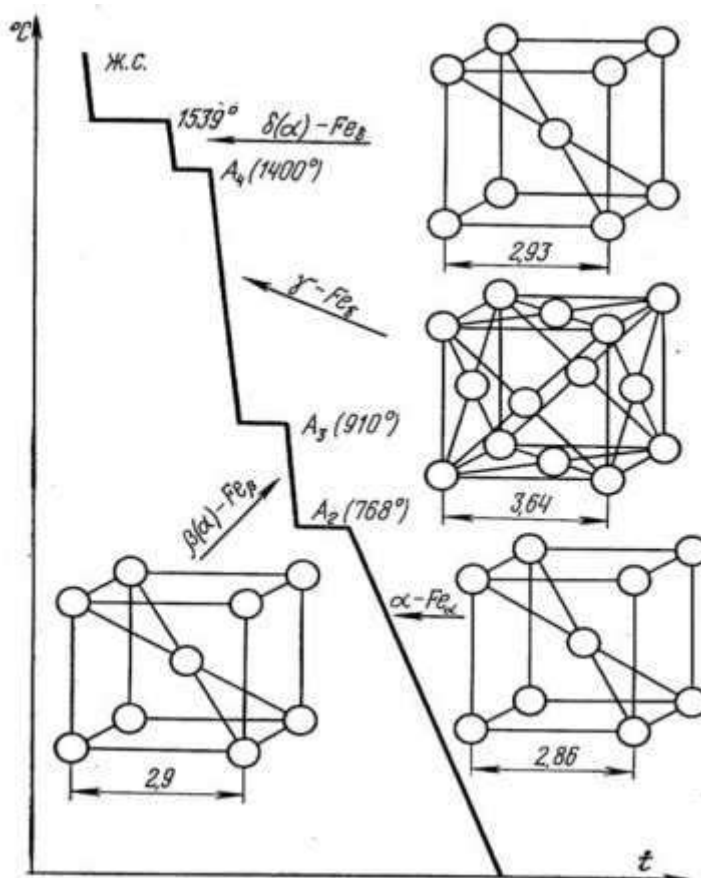


Рисунок 1 - Кривая охлаждения чистого железа

**Углерод** в природе встречается в форме алмаза со сложной кубической решеткой и графита с гексагональной решеткой. Плотность графита  $2,25 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ , предел прочности  $\sigma_B = 20 - 40\text{ МПа}$ . При 3650° С графит превращается в

газообразное состояние, минуя жидкое. Графит встречается в структуре серого чугуна и некоторых специальных сталях.

### **Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов**

В углеродистых сталях железо с углеродом взаимодействуют, образуя, в зависимости от их количественного соотношения и температуры, разные фазы, представляющие собой однородные части сплава. Это взаимодействие заключается том, что углерод может растворяться как в жидком (расплавленном) железе, так и в различных его модификациях в твердом состоянии. Кроме того, он может образовывать с железом химическое соединение. Таким образом, в углеродистых сталях различают следующие фазы: жидкий сплав (Ж), твердые растворы - феррит (Ф) и аустенит (А), химическое соединение цементит (Ц), а также эвтектоидную смесь Ф+Ц – перлит (П) и эвтектическую смесь А+Ц – ледебурит (Л).

**Феррит** - твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -Fe с предельной концентрацией 0,02% С при 727° С, при комнатной температуре - 0,006% С.

Феррит обладает небольшой твердостью и высокой пластичностью, до 768° С феррит ферромагнитен. (рисунок 2).

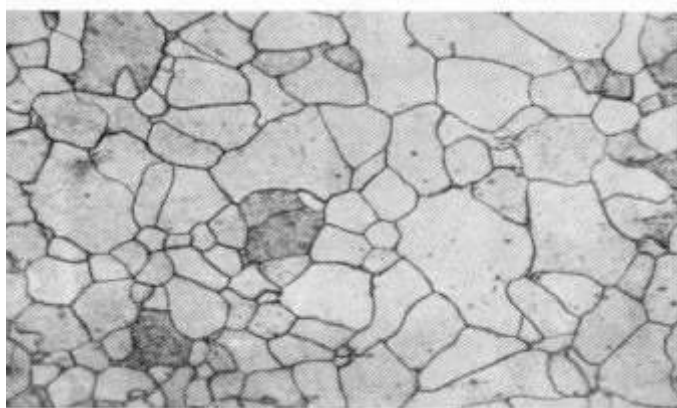


Рисунок 2 – Микроструктура феррита

**Аустенит** - твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$  - Fe. Максимальная растворимость углерода достигает при 1147 °С - 2,14%, а при

727°C - 0,8% С. Аустенит - парамагнитен, пластичен, его твердость НВ 1700 - 2200 (МН/м<sup>2</sup>) (рисунок 3).

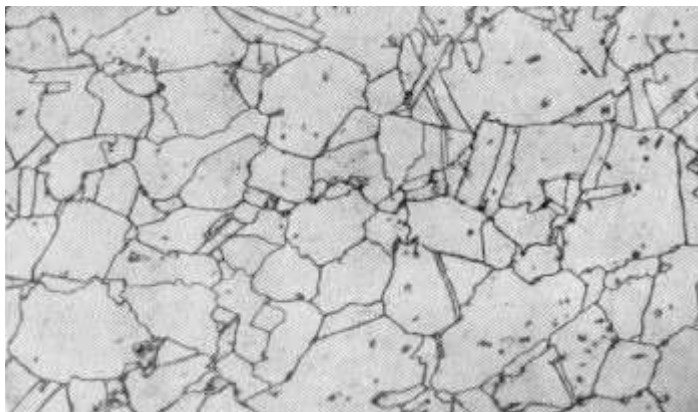
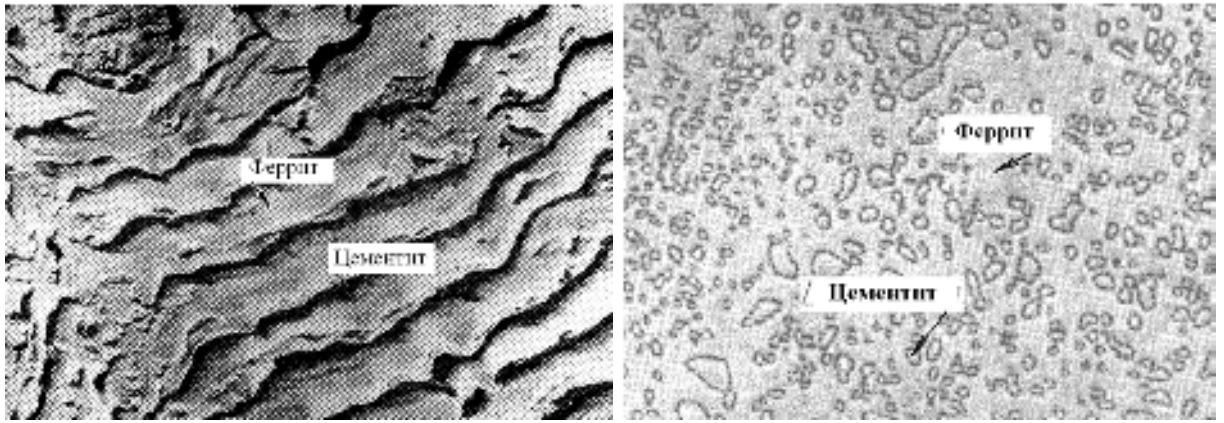


Рисунок 3 - Микроструктура аустенита

**Цементит** - химическое соединение железа с углеродом ( $Fe_3C$ ), содержит 6,67% С. Он имеет сложную орторомбическую решетку, в элементарной ячейке которой находятся 12 атомов железа и 4 атома углерода. Цементит обладает высокой твердостью НВ 8000 (МН/м<sup>2</sup>), хрупкостью и ниже 217° С ферро-магнитен. В составе железистых сплавов цементит может быть в виде - первичного, вторичного, третичного.

**Перлит** - эвтектоидная смесь зерен цементита и феррита. Цементит в феррите может иметь пластинчатую и зернистую форму. Перлит содержит 0,8 % С. Механические свойства его зависят от степени измельченности частичек цементита. Чем грубее и крупнее цементит, тем ниже механические свойства перлита. Прочность перлита 550 - 1300 МПа, твердость НВ 1600 - 2600 (МН/м<sup>2</sup>), пластичность  $\delta = 5 - 20\%$ . (рисунок 4 а, б).



а

б

Рисунок 4 - Перлит пластинчатый (а), и зернистый (б)

**Ледебурит** - эвтектическая смесь, состоящая в момент образования из цементита и аустенита, предельно насыщенная углеродом. Ледебурит имеет высокую твердость  $HV\ 7000\ (MN/m^2)$ , хрупкость и содержит 4,3 %С (рисунок 5).

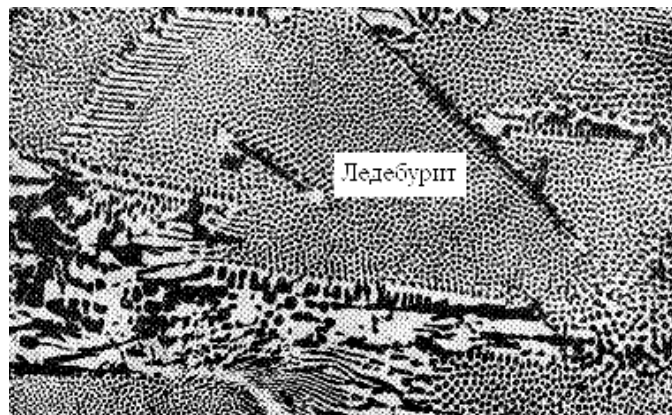


Рисунок 5 - Микроструктура ледебурита

Взаимодействие углерода с  $\alpha$  - или  $\gamma$  - железом приводит к образованию железоуглеродистых сплавов, различных по строению и свойствам.

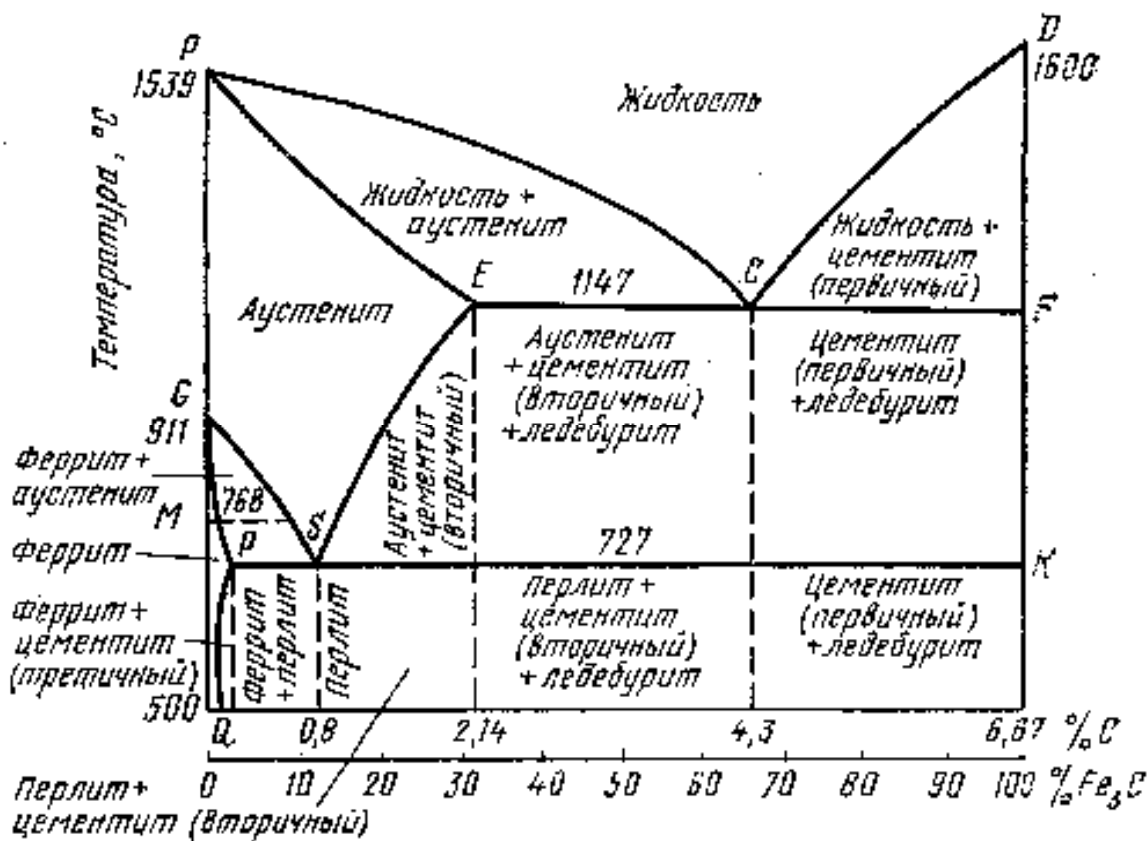


Рисунок 6 - Диаграмма состояния железо – цементит

На диаграмме (рисунок 6) по горизонтальной оси отложено процентное содержание углерода (C) и цементита ( $Fe_3C$ ), по вертикальной - температура сплава ( $T, ^\circ C$ ).

При анализе рассматриваются линии и точки диаграммы, применяются правила фаз Гиббса и правило отрезков.

Выше линии  $AC$  все сплавы находятся в жидком состоянии и число степеней свободы  $S=K - \Phi + 1 = 2 - 1 + 1 = 2$ . Это значит, что сплавы можно нагревать и охлаждать, менять их концентрацию и они остаются жидкими в состоянии равновесия. Между линиями  $AC$  и  $AEC$  и линиями  $CD$  и  $CF$  сплавы двухфазны, состоят из твердой фазы и жидкости, и при этом число степеней свободы равно  $S = 2 - 2 + 1 = 1$ . Из вышесказанного следует, что система в данных областях располагает одной степенью свободы и для сохранения ее равновесия можно менять лишь один фактор равновесия - либо температуру, либо концентрацию. Две фазы и одна степень свободы имеются также во всех других областях диаграммы, кроме аустенитной, где



между линиями  $AE$  и  $GSE$  система однофазна и располагает двумя степенями свободы  $C = 2 - 1 + 1 = 2$ . На горизонтальных линиях  $ECF$  и  $PSK$  система трехфазна и число степеней свободы  $C = 2 - 3 + 1 = 0$ . На линии  $ECF$  при охлаждении образуется ледебурит, а на линии  $PSK$  - перлит. Нулевая степень свободы на этих линиях обуславливает строго постоянные температуры при образовании ледебурита ( $1147^{\circ}\text{C}$ ) и перлита ( $727^{\circ}\text{C}$ ). Из таблицы 2 видно, что две фазы и одну степень свободы имеют все кривые линии и точки  $A, D, G, Q$ ; три фазы и нулевую степень свободы - точки  $P, S, E, C$ ; в точках  $K$  и  $F$  фазовых превращений нет, нанесены они условно.

Точка  $E$  показывает максимальную растворимость углерода в  $\gamma\text{-Fe}$  и является условным разделением железоуглеродистых сплавов на стали (до  $2,14\% \text{ C}$ ).

и чугуны (свыше  $2,14\% \text{ C}$ ). На практике наибольшее применение нашли стали с содержанием углерода до  $1,3\%$ .

Сплавы, содержащие до  $0,8\% \text{ C}$ , называются доэвтектоидными (структура феррит и перлит); сплав, содержащий  $0,8\% \text{ C}$ , называется эвтектоидным (структура перлит), сплавы, содержащие от  $0,8$  до  $2,14\% \text{ C}$ , называются заэвтектоидными (структура перлит и цементит вторичный).

В левой нижней части диаграммы линия  $PQ$  показывает изменение растворимости углерода в  $\alpha\text{-железе}$ . При этих температурах из феррита выделяется цементит третичный.

В сплавах, содержащих свыше  $2,14\% \text{ C}$ , между линиями  $ECF$  ( $1147^{\circ}\text{C}$ ) и  $PSK$  ( $727^{\circ}\text{C}$ ) из аустенита выделяется цементит вторичный.

Структура сплавов состава от  $2,14$  до  $4,3\% \text{ C}$  ниже линии  $PSK$  состоит из цементита вторичного, перлита и ледебурита. Такие сплавы называются доэвтектическими. При содержании  $4,3\% \text{ C}$  сплав имеет структуру ледебурита и называется эвтектическим. Структура сплавов, содержащих свыше  $4,3\% \text{ C}$ , состоит из цементита первичного и ледебурита, они называются заэвтектическими.

При изучении диаграммы железо - цементит принято обозначать критические температуры буквой  $A$  с указанием цифровым индексом вида аллотропического превращения. Причем перед цифрой при охлаждении сплава ставят букву  $r$ , а при нагреве -  $c$ . Например превращения  $\gamma - \delta$  обозначают  $A_{c4}$ , по линии  $GS - A_{c3}$  и  $Ar_3$ , по линии  $PSK - A_{c1}$  и  $Ar_1$  по линии  $SE - A_{ст}$ .

**Порядок выполнения работы.** 1. Изобразить диаграмму состояния Fe - Fe<sub>3</sub>C и указать во всех ее областях структурные составляющие.

2. Изучить структурные составляющие диаграммы железо - цементит, сравнивая их между собой по содержанию углерода, кристаллическим решеткам и свойствам.

3. Оценить структурные превращения железоуглеродистых сплавов по диаграмме железо - цементит при нагревании и охлаждении.

4. Приобрести навыки построения кривых охлаждения и нагревания по диаграмме состояния сплавов с применением правила Гиббса.

5. Научиться применять на диаграмме железо - цементит правила фаз и отрезков, объясняя условия для сохранения сплавов в равновесном состоянии, а также определять процентный и количественный состав сплавов в двухфазных областях.

**Содержание отчета.** В отчет необходимо включить: кривую охлаждения чистого железа; диаграмму состояния сплавов железо - цементит; описание фаз, структур и свойств железоуглеродистых сплавов; описание правила Гиббса.

### ***Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №6***

1. Какими свойствами обладает чистое железо?
2. Что такое аллотропия? Какие аллотропические формы имеет чистое железо?
3. Что характеризует точка Кюри?

4. Какие аллотропические формы имеет углерод? Какими свойствами обладает каждая аллотропическая форма?

5. Какие фазы присутствуют в углеродистых сталях и белых чугунах (показать на диаграмме состояния)? Каковы механические свойства этих фаз?

6. Каких видов бывает перлит? От чего зависят его механические свойства?

## ***Лабораторная работа 7***

### **Классификация и маркировка углеродистых сталей**

#### ***Классификация сталей***

**Цели работы:** получить навыки в проведении микроанализа структур углеродистых сталей, определении по ним типа сплава, содержания углерода, примерной марки стали и в практическом применении установленного сплава.

Стали классифицируют по способу производства, способу раскисления, химическому составу, назначению, качеству и структуре.

***По способу производства*** различают сталь: *бессемеровскую, кислородно-конвертерную, мартеновскую и электросталь.*

***По способу раскисления*** стали делят на *спокойные (сп), полуспокойные (пс) и кипящие (кп).* Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают без газовыделения (спокойно). Кипящие стали раскисляют только марганцем, содержание кислорода в виде FeO в них повышенное. Взаимодействуя с углеродом, кислород образует пузыри CO, которые при выделении в процессе кристаллизации создают впечатление кипения. Полуспокойные стали раскисляют марганцем и кремнием, по своему поведению они занимают промежуточное положение между кипящими и спокойными.

**По химическому составу** сталь делят на углеродистую и легированную. В свою очередь, принято подразделять углеродистые стали на *малоуглеродистые* (до 0,3%С), *среднеуглеродистые* (от 0,3 до 0,65%С) и *высокоуглеродистые* (свыше 0,65%С).

**По содержанию легирующих элементов** стали подразделяют на *низколегированные* (до 2% легирующих элементов), *среднелегированные* (от 2 до 6% легирующих элементов) и *высоколегированные* (свыше 6% легирующих элементов). Соответственно легирующим элементам стали получают названия марганцовистые, хромистые, хромоникелевые и т. д.

**По назначению** углеродистые стали делят на *конструкционные* и *инструментальные* и *специального назначения*. В конструкционных сталях выделяют *строительные* (преимущественно малоуглеродистые) и *машиностроительные* (малоуглеродистые и среднеуглеродистые). Инструментальные подразделяют: для режущего, измерительного и штампового инструмента. По химическому составу инструментальные стали можно разделить на углеродистые, легированные и быстрорежущие. Стали специального назначения применяются для изготовления изделий эксплуатирующихся в экстремальных условиях (высокая температура, химически агрессивная среда и т.д.) - это жаростойкие, жаропрочные, нержавеющие стали.

**По качеству** стали подразделяют на *обыкновенного качества* (содержание S ≤ 0,06% и P ≤ 0,04%), *качественные* (S ≤ 0,04% и P ≤ 0,04%) и *высококачественные* (S ≤ 0,03% и P ≤ 0,03%).

**По структуре** в равновесном состоянии углеродистые стали подразделяют на *доэвтектоидные*, *эвтектоидные* и *заэвтектоидные* (рисунок 1 - 4).

Сплавы железа с углеродом, содержащие углерода до 0,025%, называют *технически чистым железом* (рисунок 1).

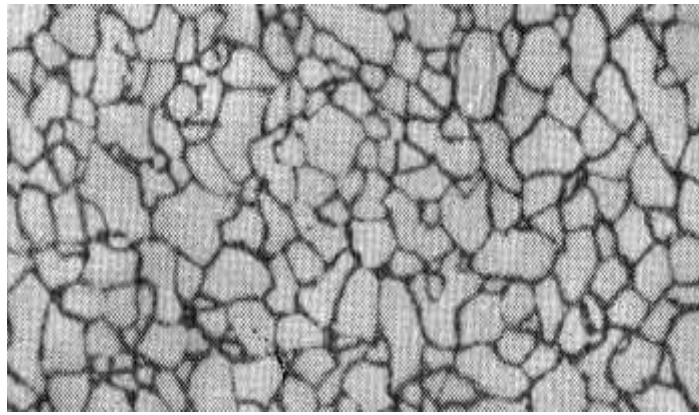
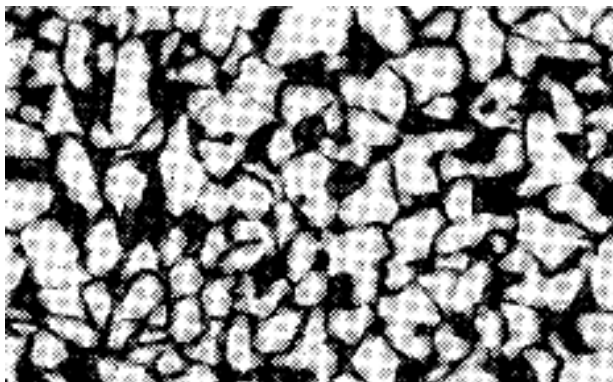


Рисунок 1 - Технически чистое железо (феррит - светлые зёрна)

Доэвтектоидные стали содержат от 0,025 до 0,8% углерода. Структура этих сталей состоит из светлых зёрен феррита и темных зерен перлита (рисунок 2) С увеличением содержания углерода уменьшается количество феррита, возрастает количество перлита.



а

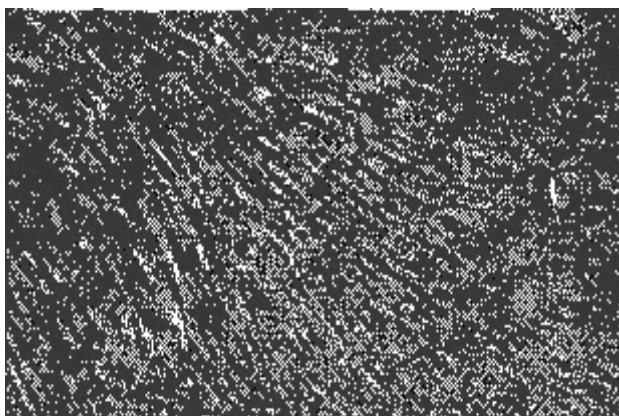


Перлит Феррит

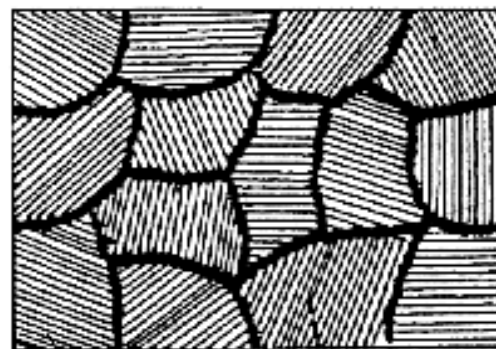
б

Рисунок 2 - Доэвтектоидная сталь: а – микроструктура  $C = 0,12\%$ ; б - эскиз (Феррит - светлые зёрна + перлит - тёмные зёрна)

Эвтектоидная сталь содержит 0,8% углерода и состоит только из перлита (механической смеси феррита и цементита), имеющего пластинчатое строение (рисунок 3).



а



Перлит

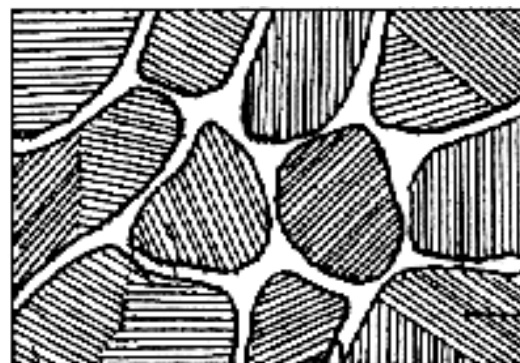
б

Рисунок 3 - Эвтектоидная сталь: *а* - микроструктура (перлит пластинчатый - 100%); *б* – эскиз

Заэвтектоидные стали содержат от 0,8 до 2,14% углерода. Их структура состоит из перлита и вторичного цементита (рисунок 4). При медленном охлаждении вторичный цементит располагается по границам зёрен перлита в виде сетки или ручейков белого цвета. Чем больше содержание углерода, тем более широкой получается цементитная сетка.



а



Перлит Цементит втор.

б

Рисунок 4 - Заэвтектоидная сталь: *а* - микроструктура (перлит пластинчатый + цементит II); *б* - эскиз

Таким образом, с увеличением содержания углерода в углеродистых сталях, находящихся в равновесном состоянии, меняются их структура и фазовый состав: уменьшается количество феррита ( $HV_{80} - 100 \text{ кгс/мм}^2$ ), увеличивается количество цементита ( $HV_{800} \text{ кгс/мм}^2$ ) и в соответствии с

этим в сталях возрастают твердость **НВ**, предел прочности  **$\sigma_B$** , уменьшаются пластичность  **$\delta$**  и ударная вязкость **КС** (рисунок 5). При содержании углерода свыше 1% предел прочности снижается, что объясняется образованием в структуре стали по границам зерен сплошной цементитной сетки, приводящей к повышению хрупкости стали.

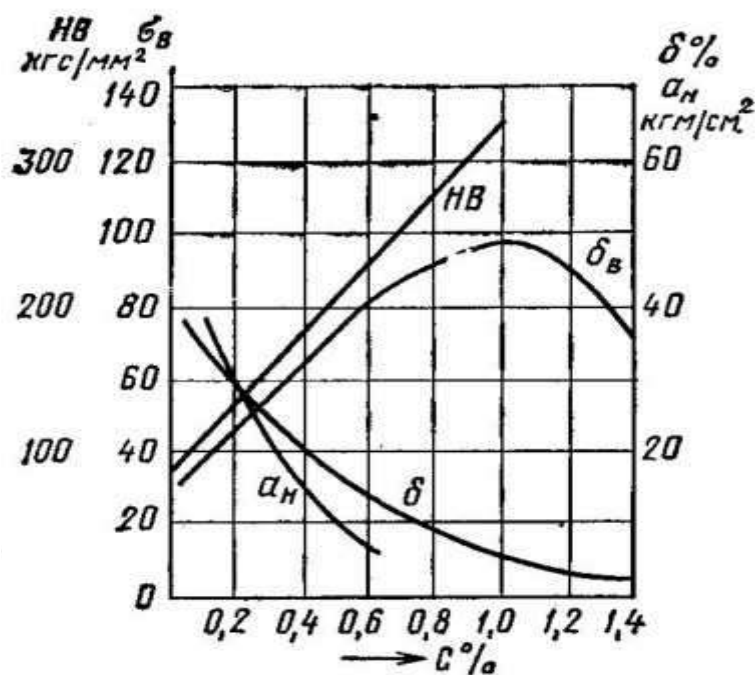


Рисунок 5 - Влияние содержания углерода на механические свойства

По структуре стали, находящейся в равновесном состоянии, можно приблизительно определить содержание углерода, а затем установить марку стали. Для этого на микроструктуре, рассматриваемой под микроскопом, ориентировочно определяют площади, занимаемые перлитом, ферритом, цементитом. Принимают содержание углерода в феррите равным нулю, в 100% перлита - 0,8%, а в 100% цементита - 6,67% С.

Например, пусть в доэвтектоидной стали перлит занимает 25% всей площади, феррит - 75%. Тогда содержание углерода в стали можно определить из пропорции:

$$\begin{aligned} 100\% \text{ перлита} &- 0,8 \%C, \\ 25\% \text{ перлита} &- x \%C. \end{aligned}$$



Откуда  $x = 25 \cdot 0,8 / 100 = 0,2\%C$

Такое содержание углерода имеет конструкционная сталь марки 20.

### ***Маркировка стали по ГОСТу***

**Углеродистые стали обыкновенного качества** поставляются в виде сортового (уголок, швеллер, круг, квадрат, шестигранник и т.д.), фасонного, листового проката по ГОСТ 535-88 . Они подразделяются на группы - ***А, Б, В.***

**Сталь группы А** маркируют Ст.0 - Ст.6. Ее поставляют потребителю с гарантированными механическими свойствами. Данные стали предназначены для изделий, которые обычно не подвергаются термической и горячей обработке. Они сохраняют структуру и свойства, полученные после прокатки на металлургических заводах. ***Цифра в марке стали указывает ее порядковый номер. С увеличением значения цифры в марке стали повышаются содержание углерода (таблица 1), прочность, твердость и снижаются пластичность и ударная вязкость.***

**Сталь группы Б** маркируют БСт.0 - БСт.6. Ее поставляют с гарантированным химическим составом и используют для изделий, при изготовлении которых предусмотрена горячая обработка.

**Сталь группы В** маркируют ВСт.1 - ВСт.5. Ее поставляют с гарантированными механическими и химическими свойствами и используют для изготовления изделий с применением процессов сварки.

Таблица 1 - Химический состав углеродистых конструкционных сталей обыкновенного качества по ГОСТ 380 - 94.

Марка стали	Массовая доля элементов, %		
	C	Mn	Si

Ст0	< 0,23	–	–
Ст1кп	0,06 – 0,12	0,25 – 0,50	< 0,05
Ст1пс	0,06 – 0,12	0,25 – 0,50	0,05 – 0,15
Ст1сп	0,06 – 0,12	0,25 – 0,50	0,15 – 0,30
Ст2кп	0,09 – 0,15	0,25 – 0,50	< 0,05
Ст3пс	0,14 – 0,22	0,30 – 0,65	0,05 – 0,15
Ст4сп	0,18 – 0,27	0,40 – 0,70	0,15 – 0,30
Ст5сп	0,28 – 0,37	0,50 – 0,80	0,15 – 0,30
Ст6пс	0,38 – 0,49	0,50 – 0,80	0,05 – 0,15

**Конструкционные качественные стали** используют для изготовления деталей машин и различных конструкций. Конструкционные стали должны обладать комплексом механических свойств: прочностью в сочетании с большой вязкостью и пластичностью, высокой усталостной прочностью. В качестве конструкционного материала используют **углеродистую и легированную сталь**. Эти стали выплавляют с соблюдением более строгих условий в отношении состава шихты и ведения плавки и разливки. К ним предъявляют более высокие требования по химическому составу и структуре: содержание S  $\leq$  0,04 %, P  $\leq$  0,035-0,04%, а также меньшее количество неметаллических включений, регламентированные макро- и микроструктуры.

**Качественные углеродистые стали** маркируют цифрами 08, 10, 15, 20, ..., 80, которые указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Из углеродистой литейной конструкционной стали изготавливают литые детали машин. Ее маркируют 15Л - 55Л (ГОСТ 977 - 88). Углеродистая деформируемая качественная сталь маркируется цифрами 05 - 85 (ГОСТ

1050 - 74). Цифра указывает среднее содержание углерода в сотых долях, буква Л - литейная.

Для обозначения марок легированных сталей принята буквенно-цифровая система. Легирующие элементы обозначают русскими буквами: Х (хром), Н (никель), М (молибден), В (вольфрам), К (кобальт), Т (титан), А (азот), Г (марганец), Д (медь), Ф (ванадий), С (кремний), П (фосфор), Ю (алюминий), Р (бор), Б (ниобий), Ц (цирконий).

Для конструкционных легированных сталей первые две цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента. Содержание легирующих элементов, если оно превосходит 1 %, ставят после соответствующей буквы в целых единицах. Например, сталь марки 12ХН2А содержит около 0,12% С, 1% Cr, 2% Ni. Буква А в конце марки указывает на то, что сталь высококачественная за счёт лучшей очистки от серы «S» и фосфора «P». Легированные стали по специальному элементу подразделяют на хромистые (15Х, 20Х, 30Х, 40Х и т. д.), хромоникелевые (20ХН, 40ХН, 45ХН и т.д.), марганцовистые (15Г, 20Г, 30Г, 40Г, 50Г и т. д.) и другие.

Для некоторых высококачественных сталей бывают отклонения в обозначении марок. *Шарикоподшипниковые стали* обозначают буквами ШХ, затем стоит содержание хрома в десятых долях процента, например ШХ15, ШХ9, ШХ6.

Инструментальные стали подразделяют на три группы: не обладающие теплостойкостью (углеродистые и легированные стали, содержащие до 3 - 4 % легирующих элементов), полутеплостойкие до 400 - 500 °С (содержащие свыше 0,6 - 0,7 % С и 4 - 18 % Cr) и теплостойкие до 550 - 650 °С (высоколегированные стали, содержащие Cr, W, V, Mo, Co, ледебуритного класса), получившие название быстрорежущих.

*Углеродистые инструментальные стали* маркируют буквой «У» (углеродистая); следующая за ней цифра (У7, У8, У10 и т. д.) показывает среднее содержание углерода в десятых долях процента. Буква «А» в конце (У10А) указывает, что сталь высококачественная (таблица 2). *Легированные*

инструментальные стали X, 9X, 9XC, 6XBG и т.д. маркируют цифрой, показывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента, если его содержание <1 %. Если содержание углерода ~1 %, то цифра чаще отсутствует. Буквы означают легирующие элементы, а следующие за ними цифры - содержание (в целых процентах) соответствующего легирующего элемента.

Таблица 3 - Химический состав углеродистых инструментальных качественных и высококачественных сталей по ГОСТ 1435-90

Марки сталей	Массовая доля элементов, %				
	C	Si	Mn	S	P
				Не более	
У7; У7А	0,65 – 0,74	0,17 – 0,33	0,17 – 0,33	0,028; 0,018	0,030; 0,025
У8; У8А	0,75 – 0,84	0,17 – 0,33	0,17 – 0,33	0,028; 0,018	0,030; 0,025
У9; У9А	0,85 – 0,94	0,17 – 0,33	0,17 – 0,33	0,028; 0,018	0,030; 0,025
У10; У10А	0,95 – 1,04	0,17 – 0,33	0,17 – 0,33	0,028; 0,018	0,030; 0,025
У11; У11А	1,05 – 1,14	0,17 – 0,33	0,17 – 0,33	0,028; 0,018	0,030; 0,025
У12; У12А	1,15 – 1,24	0,17 – 0,33	0,17 – 0,33	0,028; 0,018	0,030; 0,025
У13; У13А	1,25 – 1,35	0,17 – 0,33	0,17 – 0,33	0,028; 0,018	0,030; 0,025

*Быстрорежущие стали* маркируют буквой «Р». Следующая за ней цифра указывает среднее содержание главного легирующего элемента быстрорежущей стали - вольфрама (в процентах). Среднее содержание молибдена (в процентах) в стали обозначают цифрой, проставленной за буквой «М», кобальта - цифрой за буквой «К», ванадия – цифрой после буквы «Ф» и т. д. Среднее содержание хрома в большинстве быстрорежущих сталей составляет 4% и поэтому в обозначении марки стали не указывается.

**Сортовой прокат** делят на три группы: I – для применения без обработки поверхности; II – для механической обработки резанием; III – для горячей обработки давлением.

Пример условного обозначения проката (ГОСТ 535-88): прокат горячекатаный круглый диаметром 30 мм обычной точности прокатки (В) по ГОСТ 2590-88, марки Ст5пс, категории 1, группы II:

Круг 30-В ГОСТ 2590-88

Ст5пс-1-II ГОСТ 535-88

Аналогично условно обозначают уголок, двутавр и т.д.

**Порядок выполнения работы.** 1. Изучить микрошлифы углеродистых сталей на микроскопе, определить структурные составляющие, фазовый состав и указать группу стали - доэвтектоидная, эвтектоидная, заэвтектоидная.

2. По микроструктуре предложенной доэвтектоидной стали определить содержание углерода и марку стали.

3. Зарисовать схемы изученных микроструктур.

**Содержание отчета.** В отчет необходимо включить участок диаграммы состояния железо - цементит для сталей и график зависимости механических свойств от содержания углерода; оценить влияние увеличения содержания углерода на структуру и механические свойства сталей; описать строение и свойства структурных составляющих; возле зарисованных схем микроструктур указать структурные составляющие, группу стали по назначению, ее марку, содержание углерода, механические свойства (НВ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$  - из справочника) и область применения.

### **Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №7**

1. Что называют сталью?

2. В **зависимости от чего** сталь классифицируют по качеству?

Приведите марки сталей различного качества.

3. Каковы концентрационные интервалы (по содержанию С) и

структуры эвтектоидной, до - и заэвтектоидных сталей?

4. На чем основана классификация углеродистых сталей по назначению? Приведите несколько марок сталей различного назначения, укажите содержание в них углерода.

5. На какие группы подразделяется сталь по химическому составу?

6. Сколько содержится углерода в среднеуглеродистой стали?

7. Чем отличаются кипящие от спокойных сталей?

8. На какие группы подразделяются легированные стали?

## Лабораторная работа 8

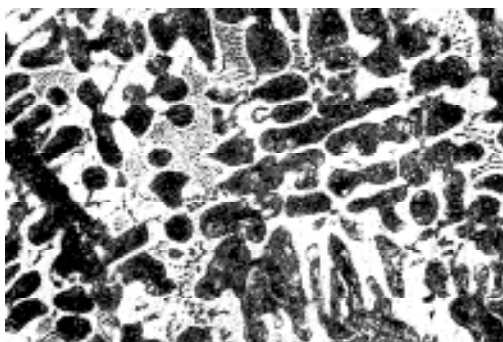
### Изучение микроструктуры и свойств чугунов

**Цели работы:** получить навыки определения по микроструктуре вида чугуна (белый, серый, ковкий, высокопрочный), оценить приближенно его механические свойства, установить область применения.

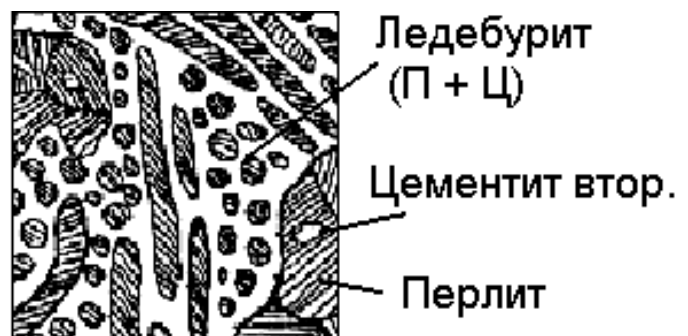
**Теоретические сведения.** По химическому составу чугуны отличаются от сталей более высоким содержанием углерода (более 2,14%) и постоянных примесей (S, P, Si, Mn). Чугун обладает более низкими механическими свойствами, чем сталь, но в тоже время он имеет высокую жёсткость, а также обладает отличными технологическими свойствами (литейными, обрабатываемостью режущим инструментом, износостойкостью, антифрикционными свойствами и т. д.), что делает чугун пригодным для изготовления различных деталей сельскохозяйственных машин.

В зависимости от состояния углерода чугуны подразделяют на *две группы*: чугуны, в которых весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита ( $Fe_3C$ ), и чугуны, в которых весь углерод или большая часть его находится в свободном состоянии в виде графита.

К *первой группе* относятся **белые чугуны**. Их структура зависит от содержания углерода и соответствует диаграмме равновесного состояния железо - цементит, поэтому они бывают *доэвтектические* (2,14...4,3% C). Структура их включает три составляющие - *перлит, ледебурит, вторичный цементит* (рисунок 1).



а



б



Рисунок 1 - Доэвтектический белый чугун: *а* - микроструктура; *б* - эскиз

*Эвтектические чугуны* (4,3 %С) состоят из *ледебурита*, представляющего собой равномерную механическую смесь *перлита* с *цементитом* (рисунок 2).

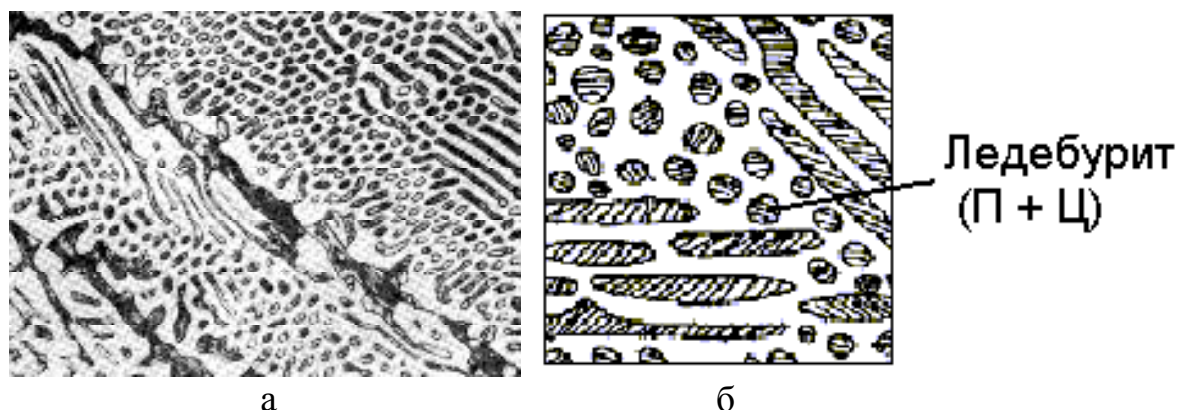


Рисунок 2 - Эвтектический белый чугун: *а* - микроструктура; *б* – эскиз

*Заэвтектические чугуны* (4,3...6,7 %С) характеризуются двумя структурными составляющими - *первичным цементитом* (вытянутая форма) и *ледебуритом* (рисунок 3).

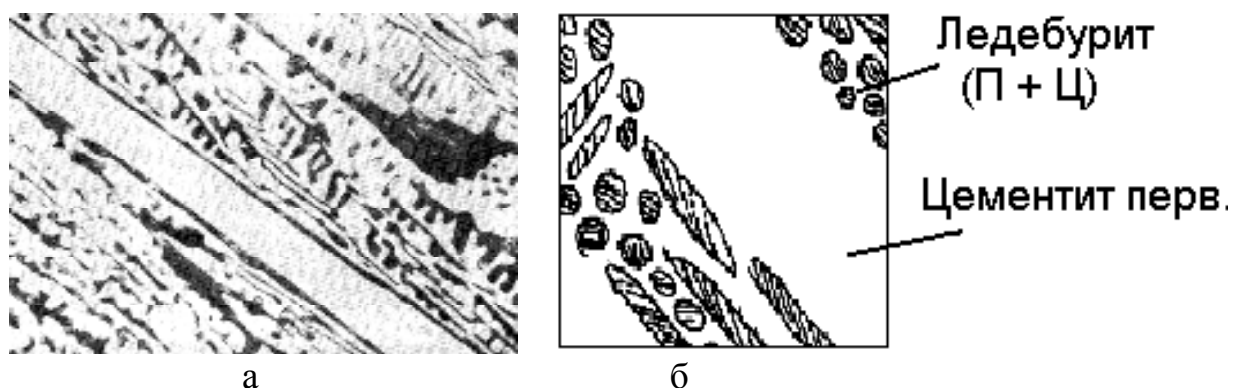


Рисунок 3 - Заэвтектический белый чугун: *а* - микроструктура; *б* - эскиз

Характерная особенность структуры белого чугуна - наличие в ней весьма твердых и малопластичных составляющих: цементита и ледебурита. Получению такой структуры в белых чугунах способствуют повышенное содержание в них марганца, пониженное кремния и сравнительно быстрое охлаждение. Белые чугуны очень хрупки и тверды, плохо поддаются

обработке режущим инструментом. Поэтому такие чугуны в машиностроении используют редко (дробильные шары, звездочки-ежи для очистки литья и др.). Они обычно идут на переделку в сталь и для получения ковкого чугуна путём длительного отжига.

Ко второй группе чугунов относятся **серые, высокопрочные, и ковкие чугуны**. Структура их представляет собой стальную металлическую основу, пронизанную графитными включениями. От структуры металлической основы, которая выявляется после травления шлифа (ферритно-перлитная, перлитная или ферритная), зависят такие свойства, как предел прочности при сжатии, твердость, износостойкость, закаливаемость. Такие свойства чугуна, как сопротивление растяжению и износостойкость, а иногда даже пластичность зависят главным образом от формы, размеров, количества и характера расположения графитовых включений. Прочность графита по сравнению с металлической основой ничтожна, его присутствие равносильно полости - пустоте. Поэтому чем равномернее расположены графитовые включения в металлической основе, чем они мельче и их форма ближе к округлой, тем меньше будет ослаблена металлическая основа чугуна и прочностные свойства будут выше. В соответствии с отмеченным качество чугунов оценивается не только структурой металлической основы, но и формой, размером и характером распределения в ней графитовых включений.

В чугунах встречаются три формы графитовых включений: *пластинчатая* (рисунок 4), *шаровидная* (рисунок 5), *хлопьевидная* (рисунок 6).

*Пластинчатая (лепестковая)*, самая неблагоприятная с точки зрения прочности и пластичности, форма графита свойственна **серым чугунам**. Такую форму можно рассматривать как трещины (надрезы), создающие концентрацию напряжений в металлической основе. Серые чугуны получают

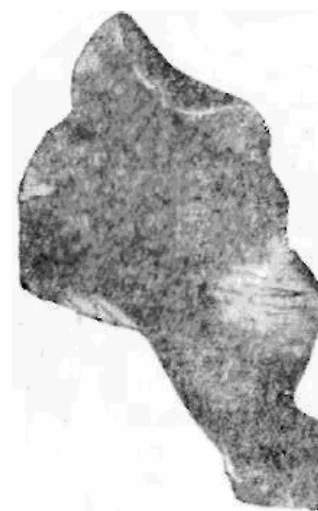
при меньшей скорости охлаждения отливок, чем белые. Они содержат 1 - 3 %Si - обладающего сильным графитизирующим действием.

Пластинчатая форма графита резко снижает прочностные свойства чугуна. Однако серые чугуны самые дешёвые, а их получение не является сложной технологической проблемой.

Повышение механических свойств серых чугунов достигается модифицированием, т. е. воздействием на процесс графитизации за счет введения в жидкий расплав чугуна особых добавок (модификаторов).



а



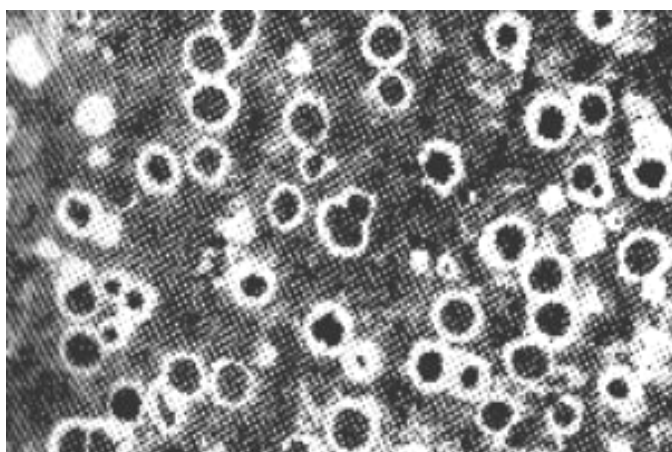
б

Рисунок 4 - Серый чугун: а - микроструктура; б - пластинчатая форма графита

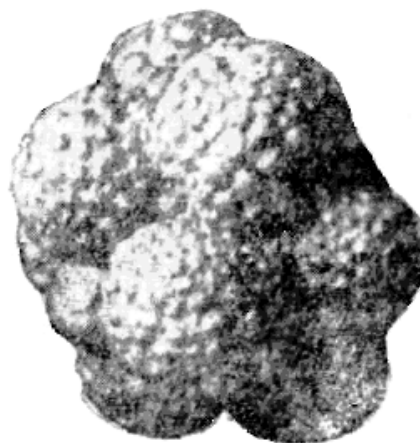
Модификаторами являются ферросилиций, силикокальций, вторичный алюминий. Будучи введенными в жидкий чугун перед его разливкой, модификаторы раскисляют его и образуют в нем тугоплавкие окислы типа  $\text{SiC}_2$ ,  $\text{CaO}$ , которые, находясь во взвешенном состоянии, служат дополнительными центрами графитизации и способствуют размельчению графита. Из серых чугунов изготавливают блоки цилиндров, картеры, маховики, выпускные коллекторы, ступицы, корпуса подшипников редукторов, станины станков, втулки сельхозмашин и др. Серые чугуны маркируются буквами СЧ и далее следует величина предела прочности при растяжении (в  $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ), например СЧ 15, СЧ 20, СЧ 35 (ГОСТ 1412-85).

В автотракторостроении и сельскохозяйственном машиностроении часто применяют следующие марки серых чугунов: СЧ18, СЧ20, СЧ25 (немодифицированные) и СЧ-30, СЧ35 (модифицированные).

**Шаровидная или сфероидальная** форма графита свойственна **высокопрочному чугуну**. Его получают спецтехнологией двойным модифицированием серого чугуна: добавкой в жидкий чугун незадолго перед заливкой двух модификаторов - ферросилиция для создания большего количества центров графитизации и магнезия или церия для получения шаровидной формы графита (рисунок 5).



а



б

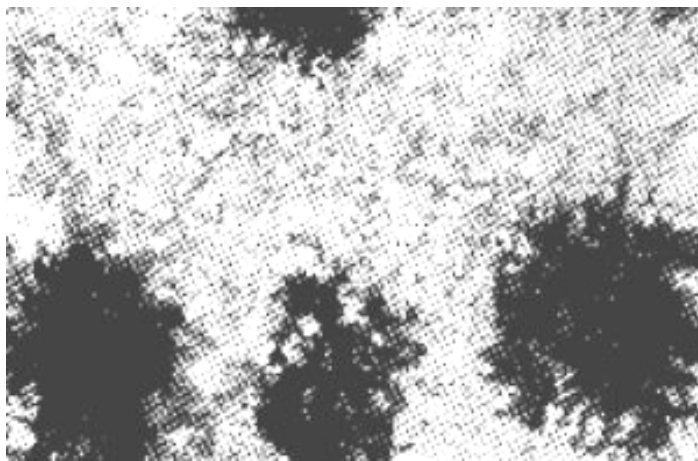
Рисунок 5 - Высокопрочный чугун: *а* - микроструктура; *б* - шаровидная форма графита

Структура высокопрочного чугуна состоит из ферритной или перлитно-ферритной металлической основы, в которой располагаются графитовые включения *шаровидной* формы. Такая форма графита практически не нарушает сплошности металлической основы, и это способствует повышению прочности и пластичности этого чугуна.

Маркируют высокопрочный чугун буквами ВЧ и далее следуют величины предела прочности при растяжении (в  $кгс/мм^2$ ) ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 80 (ГОСТ 7293-85).

Высокопрочный чугун - хороший заменитель литой стали и применяется для изготовления коленчатых (УМЗ, ВАЗ) и распределительных валов (ВАЗ), гильз цилиндров автомобильных двигателей, зубчатых колёс, кронштейнов и других деталей машин. В сельскохозяйственном машиностроении часто применяют высокопрочные чугуны марок ВЧ60, ВЧ45.

**Хлопьевидная** форма графита присуща **ковкому чугуну**, (название условное, подчёркивающее пластичность этого чугуна, относительное удлинение в 10-15 раз выше чем у обычных серых чугунов) (рисунок б) который получают специальным графитизирующим отжигом (томлением) белых доэвтектических чугунов, содержащих от 2,2 до 3,2 % С.



а



б

Рисунок 6 - Ковкий чугун: *а* - микроструктура; *б* - хлопьевидная форма графита

Более компактная форма графита обеспечивает повышение механических свойств ковкого чугуна по сравнению с серым чугуном с пластинчатым графитом. Обладая механическими свойствами, близкими к литой стали и высокопрочному чугуны, высоким сопротивлением ударным нагрузкам, износостойкостью, обрабатываемостью резанием, ковкий чугун находит свое применение во многих отраслях промышленности. В

автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении применяют ковкие чугуны марок КЧ 37 - 12, КЧ 35 - 10, КЧ 50 - 4. Из них изготавливают мосты (УАЗ), картеры редукторов рулевых механизмов, ступицы колес, корпуса дифференциалов автомобилей и тракторов, тормозные диски и барабаны, педали и др., которые в процессе работы испытывают ударные нагрузки.

В зависимости от вида отжига белого чугуна металлическая основа может иметь структуры: при одностадийном отжиге - ферритно-перлитную или перлитную, при двухстадийном - ферритно-перлитную, ферритную. Наиболее часто применяют ферритный ковкий чугун, так как он характеризуется высокой (для чугунов) пластичностью.

**Метод отжига ковкого чугуна.** Изделия для отжига помещают в печь. Процесс графитизирующего отжига (рисунок 7) разделяется на две стадии общей продолжительностью 60 ч. Первая стадия графитизации происходит при  $950 - 1050^{\circ} \text{C}$ , где избыточный первичный цементит, находящийся в равновесии с аустенитом, распадается на графит. Вторая стадия графитизации идет при  $700 - 740^{\circ} \text{C}$ , где аустенит эвтектоидного состава разлагается на графит и феррит. В зависимости от продолжительности второй стадии графитизации можно получить ферритный, ферритно-перлитный или даже перлитный ковкий чугун.

Существуют различные варианты сокращения продолжительности отжига ковкого чугуна: выдержка отливок в солевых ваннах при повышенной температуре; модифицирование чугуна алюминием; проведение предварительной закалки отливок.

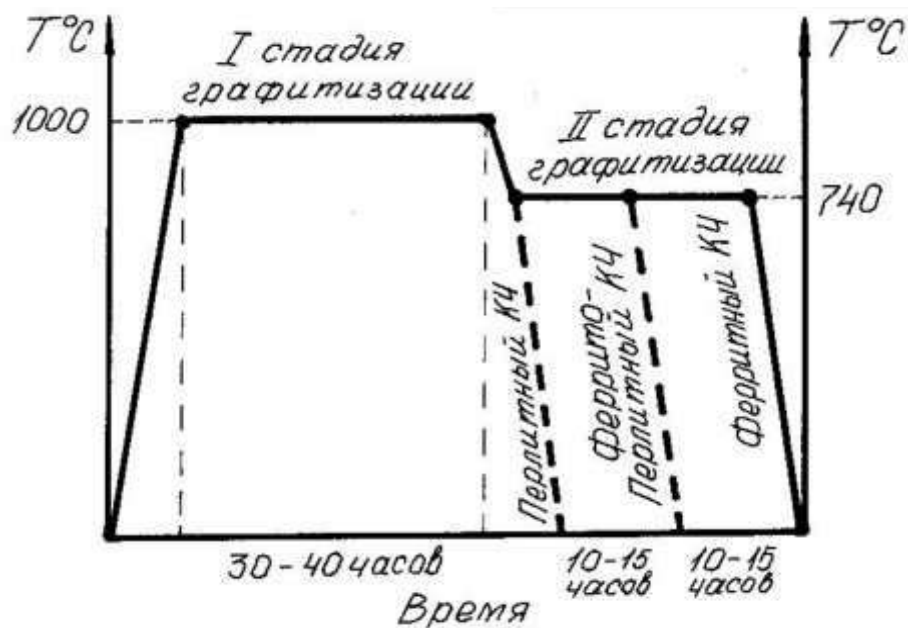


Рисунок 7 - График отжига белого чугуна на ковкий

Маркируется ковкий чугун буквами КЧ и цифрами, из которых первые две обозначают предел прочности при растяжении  $\sigma_B$ , а последние - относительное удлинение  $\delta$ , например КЧ 30 - 6.

### Специальные чугуны

К специальным относятся износостойкие, жаростойкие и коррозионностойкие чугуны.

Износостойкий чугун обладает высокой сопротивляемостью изнашиванию. В зависимости от условий работы их делят на фрикционные, для поршневых колец, антифрикционные и отбеленные.

Фрикционный чугун имеет высокий коэффициент трения, износостойкость и способность противостоять образованию задиров в большом интервале температур. В качестве фрикционного чугуна служит серый и ковкий чугун с перлитной основой. Никель, хром и молибден и другие легирующие элементы увеличивают прочность и износостойкость фрикционного чугуна.

Чугун для поршневых колец должен сочетать износостойкость с высокой упругостью. Этим требованиям отвечают серые фосфористые чугуны с основой из мелкого пластинчатого перлита.



Антифрикционные чугуны предназначены для работы в подшипниковых и иных узлах трения. Эти чугуны должны обладать хорошей прирабатываемостью при трении по металлу. В качестве антифрикционных материалов применяются серые, высокопрочные, ковкие нелегированные и легированные чугуны марок АСЧ-1, АСЧ-2, АСЧ-3; ЛВЧ-1, АВЧ-2, АКЧ-1, АКЧ-2 и др.

Отбеленный чугун на определенную глубину с поверхности представляет собой белый или половинчатый чугун, а в сердцевине - серый. Такой чугун используется, для изготовления деталей, работающих на износ, например: кулачки распределительных валов, толкатели ДВС, валки станов листовой прокатки. Отбеленный слой на чугунных отливках получают ускоренным охлаждением их поверхностей, например отливкой в металлические формы.

**Жаростойкие чугуны** хорошо сопротивляются окислению. В качестве жаростойкого применяют чугун с высоким содержанием алюминия (марка ЖЧЮ-22) или с добавкой хрома (марок ЖЧХ-1, ДЖЧХ-30).

**Коррозионностойкие чугуны** работают в агрессивных средах, их легируют алюминием, хромом, никелем, медью (ЧНХТ, ЧН15Д7Х2 и др.).

### **Вопросы для самопроверки к лабораторной работе № 8**

1. В чем состоит отличие чугуна от стали?
2. В зависимости от чего чугуны подразделяют на две группы?
3. Каково содержание углерода в эвтектическом, до - и заэвтектических белых чугунах? Каковы их структуры?
4. Почему белые чугуны не используют в качестве конструкционных материалов? Где они находят свое применение?
5. От каких структурных факторов зависят механические свойства серых чугунов?
6. В чем состоит отличие по структуре серого, высокопрочного и ковкого чугунов.

7. Какие детали изготавливают из серого, высокопрочного и ковкого чугунов?

8. Как маркируются чугуны второй группы?

### ***Лабораторная работа 9***

#### **Построение и анализ диаграммы изотермического превращения аустенита**

**Цели работы:** изучить методику построения диаграммы изотермического превращения аустенита способом пробных закалок; построить диаграмму для сталей У8 и ХВГ; проанализировать диаграмму изотермического превращения аустенита.

**Теоретические сведения.** Термическая обработка стали состоит из трех этапов: нагрева, выдержки и охлаждения.

Превращения в сталях при нагреве до аустенитного состояния. При нагреве эвтектоидной стали с равновесной структурой перлит (П) выше температуры в точке  $A_1$  (линия *PSK* диаграммы состояния железо-углерод) в сталях начинается процесс диффузионного превращения перлита, состоящего из феррита и цементита, в аустенит. Кристаллы аустенита зарождаются преимущественно на межфазных поверхностях раздела феррита и цементита.

Поскольку в каждом зерне перлита зарождается несколько центров кристаллизации аустенита, превращение сопровождается измельчением зерна аустенита.

Число зарождающихся кристаллов аустенита возрастает с увеличением дисперсности перлита и скорости нагрева (рисунок 1). При высокоскоростном нагреве, например токами высокой частоты (ТВЧ), можно получить очень мелкое зерно аустенита.

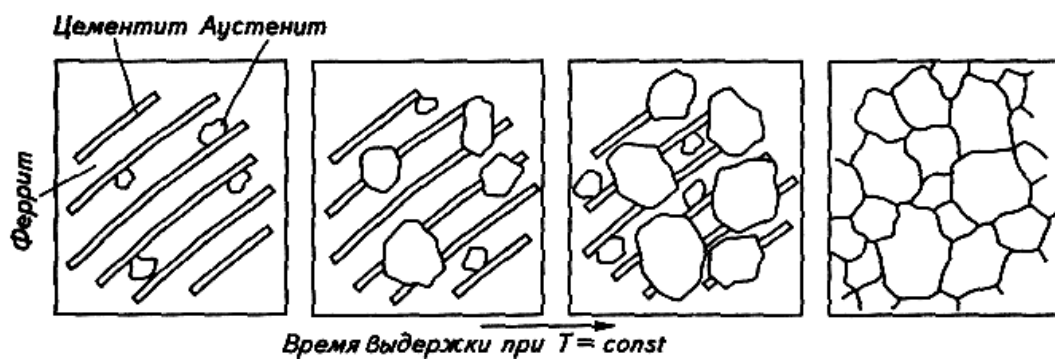


Рисунок 1 - Схемы образования аустенитного зерна в зерне перлита при нагреве

После выдержки при температуре нагрева структура стали полностью состоит из аустенита. В процессе охлаждения аустенит претерпевает превращения, которые описываются диаграммой.

*Диаграмма изотермического превращения аустенита* (С - образная диаграмма). Ее строят в координатах температура - время (рисунок 2). Эта диаграмма представляет собой графическое изображение превращений аустенита при разных скоростях охлаждения. При построении диаграммы используют значения времени по логарифмической шкале, так как оно может колебаться в пределах от долей секунды до нескольких часов.

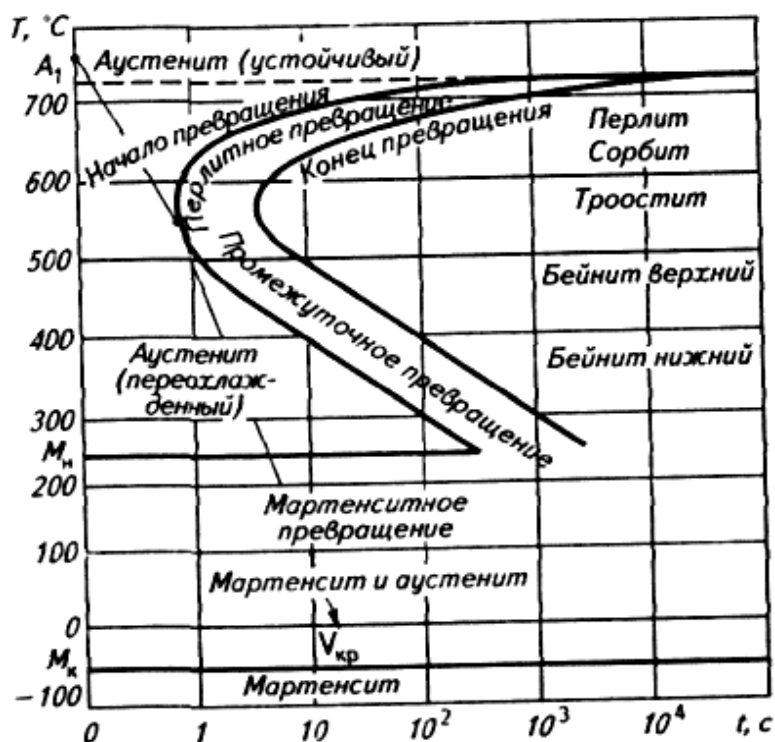


Рисунок 2 - Диаграмма изотермического превращения аустенита в стали, содержащей 0,8 % С

На диаграмме можно выделить четыре основные области:

выше критической точки  $A_1$ , - область устойчивого аустенита ( $A_{уст}$ );

между осью температуры и левой С-образной линией - область переохлажденного аустенита ( $A_{пер}$ );

между точками  $A_1$  и  $M_n$  - область диффузионного превращения переохлажденного аустенита (включающая промежуточное превращение) в ферритно-цементитную смесь ( $\Phi + \Pi$ ) различной дисперсности - перлит, сорбит, троостит, бейнит;

между точками  $M_n$  и  $M_k$  - область бездиффузионного превращения переохлажденного аустенита в мартенсит (М).

С-образные кривые на диаграмме являются границами начала (левая кривая) и конца (правая кривая) диффузионного превращения аустенита.

***Превращения аустенита при охлаждении.*** Превращение аустенита происходит при температуре ниже 727 С (критическая точка  $A_1$ ) и связано с изменением свободной энергии аустенита.

Разность между теоретической (727 °С, линия  $PSK$ ) и реальной температурами превращения аустенита называют *степенью его переохлаждения*.

Степень переохлаждения аустенита влияет на механизм и кинетику превращения и соответственно на строение и свойства образующихся структур. Чем больше степень переохлаждения аустенита, тем выше прочность, твердость и ниже пластичность образующихся структур.

В зависимости от степени переохлаждения аустенита различают следующие превращения: перлитное, бейнитное и мартенситное. При малой степени переохлаждения образуется перлит, затем сорбит, троостит, бейнит и, наконец, при наибольшей степени переохлаждения - мартенсит.

В эвтектоидной стали перлитное превращение происходит в интервале температур от 727 (в точке  $A_1$ ) до 550 °С, бейнитное - от 550 до 240 °С, мартенситное - ниже 240 °С.

*Перлитное превращение* переохлажденного аустенита носит кристаллизационный характер и начинается по диффузионному механизму. Аустенит углеродистой стали, практически однородный по концентрации углерода, распадается с образованием феррита (почти чистое железо) и цементита, содержащего 6,67 % С, т. е. состоит из фаз, резко различающихся концентрацией углерода. Ведущей фазой при этом является цементит (карбид железа). Как правило, его зародыши образуются на границах зерен аустенита (рисунок 3).

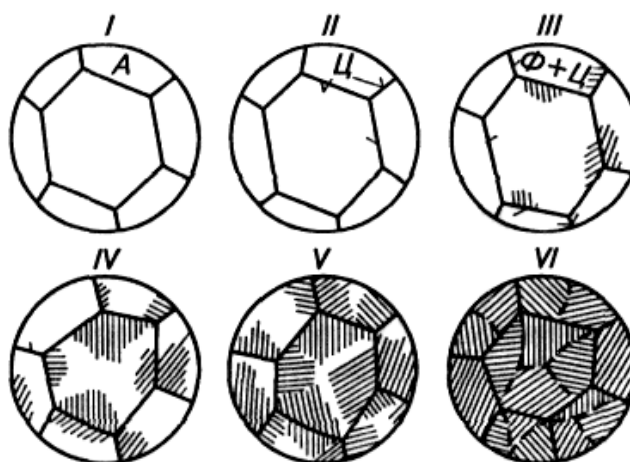


Рисунок 3 - Схема образования перлитных зерен при охлаждении аустенита: I ... VI - этапы формирования перлитных колоний

В результате роста цементита прилегающий к нему объем аустенита обедняется углеродом, снижает свою устойчивость и испытывает полиморфное  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. При этом кристаллики феррита зарождаются на межфазных границах с цементитом, где этот процесс облегчен. Происходит колониальный (совместный) рост кристалликов феррита и цементита, образующих перлитную колонию. Размер перлитных колоний и субколоний тем меньше, чем мельче зерно исходного аустенита и больше степень его переохлаждения.

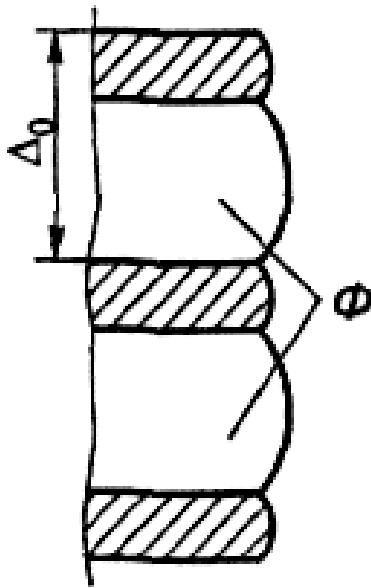


Рисунок 4 - Схема к определению межпластинчатого расстояния в зерне перлита

Структуры перлитного класса (перлит, сорбит, троостит) имеют пластинчатое строение. Разделение на перлит, сорбит и троостит условно; между этими структурами нет четкой границы. Чем больше переохлаждение, тем тоньше получающаяся ферритно-цементитная структура, т. е. меньше межпластинчатое расстояние  $\Delta_0$  (рисунок 4), равное усредненной сумме толщин двух пластинок феррита и цементита. Пластинчатые структуры различаются лишь степенью дисперсности.

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

Перлит образуется в интервале температур от 727 (в точке  $A_1$ ) до 650 °С и представляет собой достаточно грубую пластинчатую ферритно-цементитную смесь с  $\Delta_0 = 0,6...1$  мкм и твердостью 18 HRC (рисунок 5, а).

Сорбит образуется при температурах от 650 до 600 °С, более дисперсен, имеет  $\Delta_0 = 0,25...0,4$  мкм, твердость 30 HRC (рисунок 5, б).

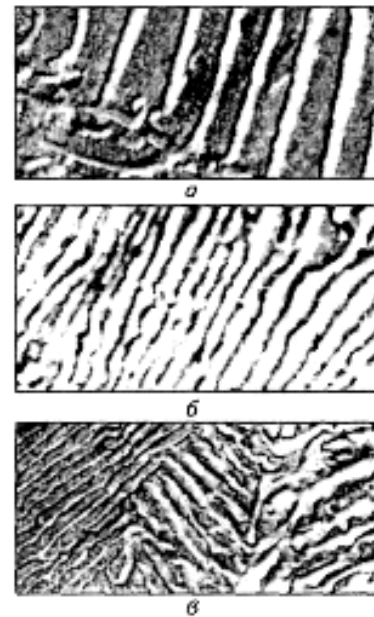


Рисунок 5 - Микроструктуры: а - перлита; б - сорбита; в - троостита

При температуре от 600 до 550 °С образуется еще более дисперсная смесь феррита и цементита, называемая троостит, с  $\Delta_0 = 0,1...0,2$  мкм и твердостью 40...45 HRC (рисунок 5, в).

**Мартенситное превращение** интенсивно протекает при непрерывном охлаждении в интервале температур от линии  $M_n$  до линии  $M_k$  (см. рисунок 2). В результате большой скорости охлаждения при значительном переохлаждении образуется мартенсит - пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в кристаллическую решетку  $Fe_\alpha$ . Мартенситное превращение бездиффузионное. При образовании кристаллической решетки мартенсита атомы сдвигаются на расстояния, меньшие межатомных. Искривленную избытком атомов углерода кристаллическую решетку мартенсита называют тетрагональной.

Минимальную скорость охлаждения аустенита, при которой образуется мартенсит, называют критической скоростью закалки  $v_{кр}$ . Кривая изменения критической скорости закалки является касательной к левой С-образной кривой (см. рисунок 3). Значение  $v_{кр}$  зависит от устойчивости переохлажденного аустенита, определяемой химическим составом стали. Чем больше минимальная устойчивость, тем меньше  $v_{кр}$ . Легирующие элементы повышают устойчивость переохлажденного аустенита, сдвигают С-образные кривые вправо, в результате чего критическая скорость закалки легированных сталей снижается.

Мартенсит имеет игольчатое строение. Мартенситные иглы растут в пределах исходного зерна аустенита под углом 60° друг к другу. Чем мельче было зерно аустенита, тем мельче получаются иглы мартенсита. Свойства мартенсита зависят от количества углерода. Чем больше было углерода в аустените, тем больше искажается кристаллическая решетка  $Fe_\alpha$  и соответственно повышается твердость мартенсита. Образование мартенсита сопровождается увеличением объема, в связи с чем часть аустенита



оказывается сильно сжатой, не претерпевает превращений, сохраняется в структуре и называется остаточным аустенитом ( $A_{ост}$ ).

Увеличение содержания углерода в стали снижает положение критических точек  $M_n$  и  $M_k$ . При содержании углерода более 0,6 % мартенситное превращение заканчивается при температуре ниже нуля (рисунок 6). Введение в сталь легирующих элементов способствует еще большему снижению точек  $M_n$  и  $M_k$  и тем самым увеличению количества остаточного аустенита.

Получаемые в результате превращения аустенита структуры можно расположить в следующем порядке в соответствии с уменьшением объема: мартенсит - троостит - сорбит - перлит.

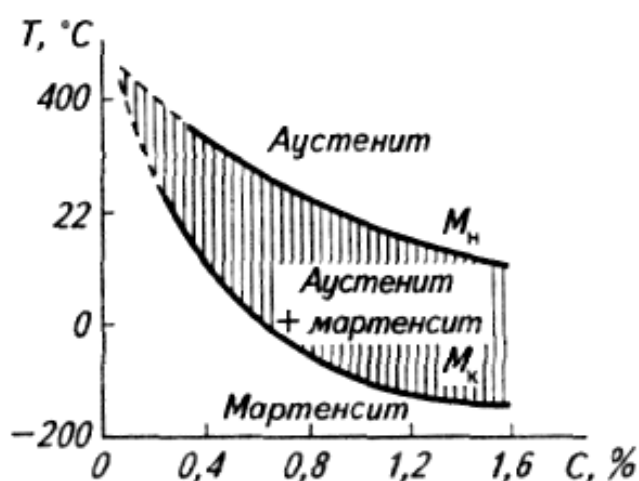


Рисунок 6 - Влияние содержания углерода на температуры начала и конца мартенситного превращения

**Бейнитное (промежуточное) превращение** характеризуется сочетанием как диффузионного (перлитного), так и бездиффузионного (мартенситного) превращений. Бейнит, образовавшийся в интервале температур 550...400 °С, называют верхним бейнитом. Он имеет перистое строение и твердость 450 НВ. Нижний бейнит образуется при более низких температурах, имеет игольчатое строение и твердость 500 НВ.

Диаграмма изотермического превращения имеет большое практическое значение. На основании этой диаграммы разрабатывают режимы различных видов термообработок, выбирая скорость охлаждения (охлаждающую среду).

Для построения диаграммы изотермического превращения аустенита в данной работе использован метод пробных закалок.

**Метод пробных закалок.** Из исследуемой стали диаметром 10... 15 мм изготавливают образцы толщиной 2...3 мм, просверливая в них отверстие для крепления. Образцы нагревают в печи до температуры образования устойчивого аустенита (выше критических точек  $A_1$  или  $A_3$ ), выдерживают необходимое время и быстро переносят в среду с заданной температурой изотермической выдержки, например  $T_b$  (рисунок 7). Обычно для этого используют соляные ванны с расплавленными солями, например селитрой. В изотермической ванне каждый образец выдерживают определенное время (1, 2, 3, 4, 5, 10, 100, 200 с и более), которое зависит от химического состава стали, а затем охлаждают в воде со скоростью, большей критической скорости закалки. После этого измеряют твердость образцов и по полученным данным строят график зависимости твердости HRC от времени выдержки в соляной ванне (рисунок 8). Перегибы на графике (точки  $b$  и  $d$ ) соответствуют времени начала и конца диффузионного превращения аустенита в ферритно-цементитную смесь.

Если при изотермической выдержке образцов в соляной ванне (точки  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , рисунок 7) не произошло диффузионного превращения аустенита, то при последующем резком охлаждении в воде весь аустенит превратится в мартенсит, т. е. произойдет закалка. Увеличение времени выдержки образцов (точка  $c$ ) приводит к частичному превращению аустенита в ферритно-цементитную смесь ( $\Phi + Ц$ ), поэтому при последующем охлаждении мартенсита будет образовываться меньше и соответственно твердость образцов будет уменьшаться. При длительной изотермической выдержке (точки  $d$ ,  $e$ ) аустенит полностью превратится в ферритно-цементитную смесь,

и тогда при охлаждении мартенсит не образуется, твердость образцов будет еще меньше и станет постоянной.

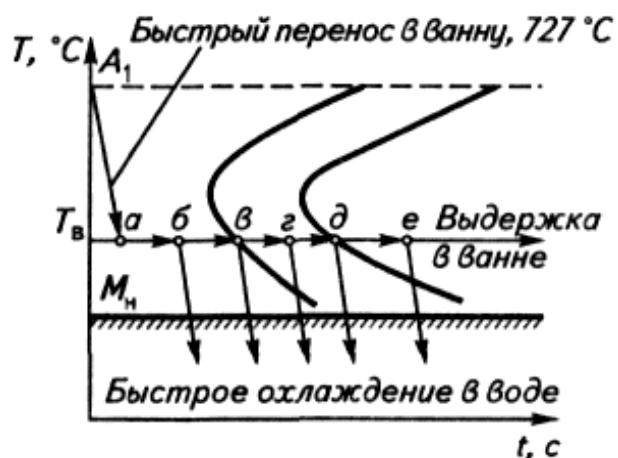


Рисунок 7 - Схема метода пробных закалок при изотермической выдержке

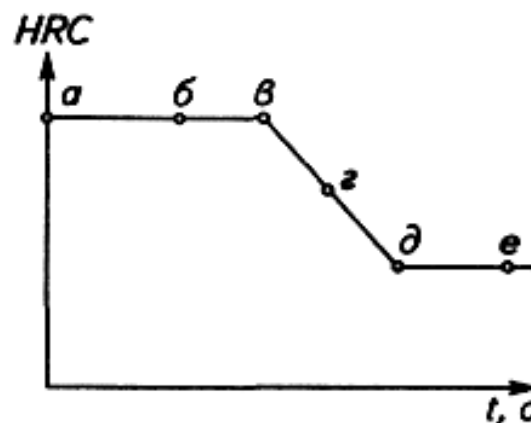


Рисунок 8 - Изменение твердости стали в зависимости от времени выдержки при температуре  $T_i$  и последующей закалки

Подобные графики изменения твердости в зависимости от времени изотермической выдержки строят для соляных ванн с другими температурами и по ним определяют значения начала и конца превращения аустенита, соответствующие этим температурам.

Затем по найденным значениям начала и конца аустенитного превращения при разных температурах строят С-образные кривые; наносят горизонтальные линии, соответствующие критическим точкам  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $M_n$ ,  $M_k$ ; обозначают области диаграммы.

**Порядок выполнения работы.** 1. Нагреть образцы из сталей У8 и ХВГ до температуры 760 °С.

2. Закалить эти образцы в процессе различной выдержки их в соляной ванне с температурой 400 °С.

3. Замерить твердость образцов из сталей У8 и ХВГ.

4. Определить по таблице 1.7 значения начала и окончания диффузионного превращения для стали У8 при других температурах.

Таблица 1 - Время начала и конца аустенитного превращения в сталях У8 и ХВГ при различных температурах

Сталь У8			Сталь ХВГ		
температура, °С	начало превращений	конец превращений	температура, °С	начало превращения	конец превращения
В точке $A_1$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^5$	В точке $A_1$	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^6$
550	1,5	40	550	5	80
400	*	*	400	*	*
$M_n = 245$	$8 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^3$	$M_n = 210$	$1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$

Примечания: 1. Вместо знака \* указать результаты, полученные при выполнении лабораторной работы.

2. Температуры, соответствующие концу мартенситных превращений: для У8 -  $M_k = -10$  °С, для ХВГ -  $M_k = -50$  °С.

**Содержание отчета.** В отчет необходимо включить: краткие теоретические сведения; таблицу с результатами испытания; графики изменения твердости сталей У8 и ХВГ в зависимости от времени изотермической выдержки; время начала и конца изотермического превращения аустенита для сталей У8 и ХВГ при 400 °С (внести полученные данные в соответствующую строку таблицы); справочные данные о положении критических точек  $A_1$ ,  $M_n$ ,  $M_k$ ; значения времени начала и конца превращений аустенита при различных температурах; построенные по экспериментальным и справочным данным диаграммы изотермического превращения аустенита для сталей У8 и ХВГ; анализ построенных диаграмм.

### Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №9

1. Нарисуйте диаграмму изотермического превращения переохлажденного аустенита эвтектоидной стали; объясните смысл ее линий.

2. Что такое критическая скорость закалки ( $V_{кр}$ )? Как определяется ее величина?

3. Какую структуру и механические свойства приобретает сталь при охлаждении со скоростью  $V > V_{кр}$ ?

4. Какие структуры получаются в стали при охлаждении со скоростями  $V < V_{кр}$ ? Что у них общего, чем отличаются?

5. В чем принципиальное отличие мартенситного превращения от перлитного?

6. В чем причина высокой твердости мартенсита? Как зависит твердость закаленной стали от содержания в ней углерода?

## ***Лабораторная работа 10***

### **Термическая обработка углеродистых сталей**

**Цели работы:** ознакомиться с оборудованием для термической обработки стали; изучить технологию отжига, нормализации и закалки углеродистых сталей; определить влияние скорости охлаждения на твердость углеродистых сталей после термической обработки.

**Теоретические сведения.** Термической обработкой стали называется технологический процесс, состоящий из нагрева стали до определенной температуры, выдержки и последующего охлаждения с заданной скоростью. При термической обработке получают необходимые свойства стали, изменяя ее структуру без изменения химического состава.

Любой режим термической обработки может быть представлен графически в координатах «температура» - «время». Температура нагрева углеродистой стали, ориентировочно, в зависимости от содержания углерода выбирается по диаграмме железо - цементит (рисунок 1), по справочным данным и уточняется экспериментальным путем. Время определяется расчетом, по справочным данным и опытом. Основные виды термической обработки - ***отжиг, нормализация, закалка и отпуск.***

**Отжиг.** Отжигом называется термическая обработка, заключающаяся в нагреве, выдержке и медленном охлаждении сплава в печи с целью получения устойчивой (равновесной) и ненапряженной структуры и

устранения *ликвации* (неравномерное распределение примесей в объёме детали, заготовки).

Отжиг применяют для облегчения механической обработки, или пластической деформации а также, подготовки сплава к последующей термической обработке. Различают **отжиг I и II рода**.

**Отжиг I** рода не обусловлен фазовыми превращениями. Основное значение при проведении такого отжига имеют температура нагрева и время выдержки. Существуют следующие разновидности отжига I рода.

Диффузионный отжиг (гомогенизирующий) применяют для устранения химической неоднородности (ликвации) сплава. Выравнивание химического состава достигается диффузионными процессами. Отжиг проводят при высокой температуре ( $0,8 - 0,9 T_{пл}$ ) и длительной выдержке.

Рекристаллизационный отжиг применяют для снятия в изделиях *наклепа* (резкое увеличение твёрдости и снижение пластичности) и внутренних напряжений после холодной обработки давлением. При этом в наклёпанном деформированном металле образуются новые равноосные зерна и восстанавливается пластичность. Нагревание производят до температур вблизи фазовых превращений ( $0,4 T_{пл}$ ).

Отжиг для снятия напряжений, возникающих при ковке, сварке, литье и т. д., проводят при нагреве деталей до  $400—600^{\circ} \text{C}$ .

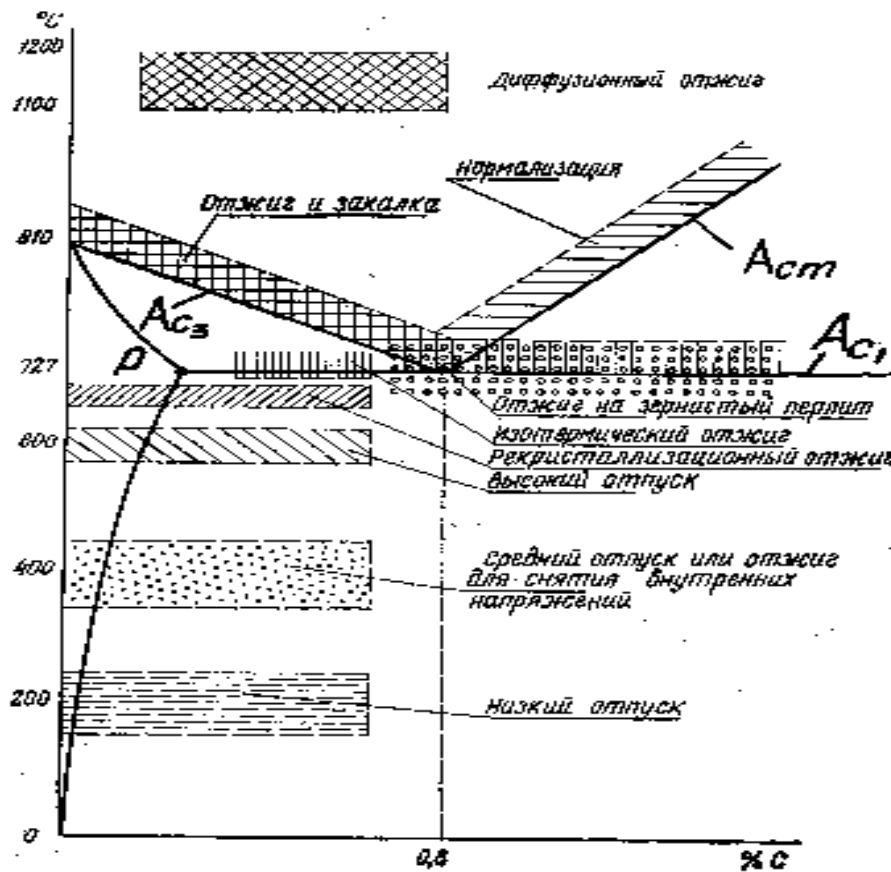


Рисунок 1 - Температура нагрева стали при различных видах термической обработки

**Отжиг II** рода связан с фазовыми превращениями в твердом состоянии. В этом случае изделия нагревают выше температуры фазовых превращений и охлаждение производят медленно, чтобы полностью произошел распад аустенита. Различают полный, неполный и изотермический отжиг.

Полный отжиг проводят для доэвтектоидной стали. Сталь нагревают на 30 - 50° С выше точки  $A_{c3}$ , выдерживают и медленно охлаждают вместе с печью. Полный отжиг происходит с фазовой перекристаллизацией - образованием аустенитной структуры при нагреве и полного ее распада на ферритно-цементитную смесь при охлаждении. В результате полного отжига получается мягкая и вязкая структура, свободная от внутренних напряжений.



Неполный отжиг применяют для заэвтектоидной стали. Сталь нагревают на 20—50° С выше точки  $A_{c1}$  (в структуре сохраняется вторичный цементит), выдерживают и медленно охлаждают. Процесс отжига может состоять в многократном нагревании выше точки  $A_{c1}$ . В результате неполного отжига цементит приобретает округленную или зернистую форму. Такой отжиг называют отжигом на зернистый перлит (сфероидизацией). Получению зернистого перлита способствует предшествующая отжигу горячая пластическая деформация, при которой пластинчатый цементит дробится. Неполный отжиг снижает твердость и улучшает обрабатываемость инструментальных сталей.

Изотермический отжиг в основном применяют для легированных сталей. Он заключается в нагреве стали до аустенитного состояния, охлаждения на 50 - 100° С ниже точки  $A_{r1}$ , выдержке при этой температуре до полного распада аустенита на ферритно-цементитную смесь и последующего охлаждения на воздухе. Изотермический отжиг позволяет сокращать длительный процесс обыкновенного отжига в 2 - 3 раза.

**Нормализация.** Нормализацией стали называют нагрев доэвтектоидных сталей выше критической точки  $A_{c3}$ , эвтектоидных и заэвтектоидных сталей - выше критической точки  $A_{cm}$  на 30...50°С с непродолжительной выдержкой и последующим охлаждением на спокойном воздухе. После нормализации углеродистые стали имеют ту же структуру, что и при отжиге, но перлитные смеси получаются мелкодисперсными, так как распад аустенита происходит при больших степенях переохлаждения. Цель нормализации - перекристаллизация зерна стали, снятие внутренних напряжений, подготовка стали к дальнейшей пластической деформации, механической или термической обработке. Нормализация - дешевый и простой вид термической обработки углеродистых сталей, содержащих менее 0,5...0,6 %С, при подготовке их к обработке резанием и может заменять отжиг. В заэвтектоидных сталях нормализация с температуры выше  $A_{cm}$  предназначена для устранения цементитной сетки.

**Закалка.** Закалкой называется термообработка, состоящая из нагрева доэвтектоидных сталей выше критической точки  $A_{c3}$ , эвтектоидных и заэвтектоидных сталей выше  $A_{c1}$  на 30...50 °С, выдержки при данной температуре и последующего охлаждения со скоростью больше критической (минимальная скорость охлаждения, обеспечивающая превращение переохлажденного аустенита в мартенсит). При скорости охлаждения больше критической углерод не успевает выделиться из кристаллической решетки (в соответствии с ее перестройкой из  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо), в результате чего образуется однофазный перенасыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе, который получил название *мартенсита*. (Нем. металлург А. Martens 1850 - 1914гг.). При этом наблюдаются значительные искажения пространственной кубической (т.н. тетрагональность) решетки, создается высокая плотность порогов дислокаций и в стали накапливается значительная внутренняя потенциальная энергия. Сталь приобретает высокую твердость, а ее пластичность при этом падает. В зависимости от температуры нагрева стали различают следующие виды закалок.

Полная закалка - проводится в основном для доэвтектоидных сталей и заключается в нагреве стали выше критической точки  $A_{c3}$  на 30...50°С с последующим охлаждением со скоростью больше критической. Структура стали при этом состоит из мелкоигльчатого мартенсита, а при содержании углерода более 0,6%, кроме мартенсита, имеется небольшое количество остаточного аустенита. Полная закалка применяется только для доэвтектоидных сталей.

Перегрев стали, т. е. нагрев ее до температур, превышающих температуры критической точки  $A_{c3}$  на 150...200 °С, вызывает рост зерен аустенита, что увеличивает склонность стали к появлению деформации и образованию трещин при закалке. Структура такой стали состоит из крупноигльчатого мартенсита и обладает пониженной ударной вязкостью.

Неполная закалка применяется для заэвтектоидных сталей; нагрев стали выше критической точки  $A_{c1}$  на 30...50°С с последующей выдержкой и

охлаждением со скоростью больше критической. Структура заэвтектоидной стали после неполной закалки состоит из мартенсита, вторичного цементита и остаточного аустенита. Цементит обладает высокой твердостью и не снижает твердости закаленной стали; аустенит, наоборот, мягче мартенсита и снижает общую твердость. Закалка заэвтектоидных сталей с температур, превышающих линии  $A_{cm}$ , ведет к получению крупноигльчатого мартенсита с большим количеством остаточного аустенита. Такая структура создает в стали повышенные внутренние напряжения, коробление, трещины и пониженную ударную вязкость и поэтому не применяется. Повышение содержания углерода в заэвтектоидных сталях значительно снижает линии начала и конца мартенситных превращений. Конец мартенситного превращения оказывается в области отрицательных температур, что приводит к увеличению количества остаточного аустенита при закалке до комнатных температур.

Охлаждающими средами при закалке стали служат вода, водные растворы солей, щелочей, кислот, масло.

Охлаждающими средами при закалке углеродистых сталей служат вода, водные растворы солей, щелочей, кислот, масло. Охлаждающие среды должны обеспечивать высокую скорость охлаждения в интервале температур диффузионного превращения (интервал I), чтобы избежать распада переохлажденного аустенита в ферритно-цементитную смесь, и низкую скорость охлаждения в интервале мартенситных превращений (интервал II), чтобы не допустить образования повышенных внутренних напряжений.

Вода охлаждает быстро. В интервале I это является ее преимуществом, а в интервале II может привести к образованию закалочных трещин. Масло охлаждает медленно. В интервале I это может привести к распаду переохлажденного аустенита, а в интервале II считается его преимуществом. В масле закалывают легированные стали, которые имеют небольшую критическую скорость закалки.

*Непрерывная закалка*, или *закалка в одном охладителе* (рисунок 2, кривая 1). Ее применяют для изделий несложной формы. Изделия из углеродистых сталей, нагретые до заданной температуры, охлаждают в воде; из легированных - в масле. При использовании воды высокая скорость охлаждения в интервале мартенситного превращения может привести к образованию таких дефектов, как трещины и коробление. Для легированных сталей применяют нагретое минеральное масло с температурой 60...90°C. Масло обеспечивает относительно невысокую скорость охлаждения, что предотвращает образование закалочных структур.

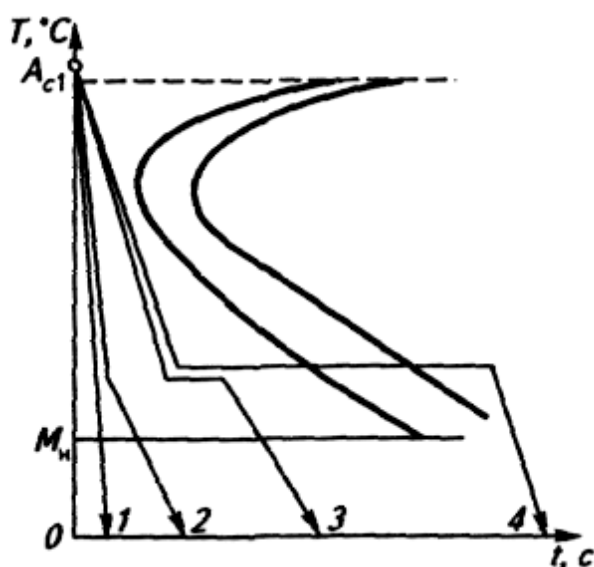


Рисунок 2 - Кривые охлаждения при различных способах закалки в зависимости от охлаждающей среды: 1 - непрерывной; 2 - прерывистой; 3 - ступенчатой; 4 - изотермической

*Прерывистую закалку*, или *закалку в двух средах* (рисунок 2, кривая 2), применяют для инструментов небольшого сечения. До температуры 300...400 °C охлаждение проводят в воде, а затем в масле. Образуется мартенситная структура. После такой закалки уменьшаются коробление, деформация, микротрещины.

*Ступенчатую закалку* (рисунок 2, кривая 3) используют для изделий небольшого сечения. При ступенчатой закалке нагретую деталь переносят в расплав соли (селитры) с температурой -300 °C (несколько выше линии  $M_n$ ),

выдерживают в этой среде до выравнивания температуры по всему сечению и затем охлаждают на воздухе. При охлаждении на воздухе превращение аустенита в мартенсит происходит одновременно по всему объему изделия. В результате значительно уменьшаются внутренние напряжения.

*Изотермическая закалка* (рисунок 2, кривая 4) - единственная, при которой не получается мартенсит. Выдержку проводят в соляной ванне при температуре, соответствующей бейнитному превращению (выше критической точки на линии  $M_n$ ), до полного превращения аустенита в нижний бейнит с последующим охлаждением на воздухе.

**Дефекты закалки** наблюдаются при нарушении режима закалки.

*Недостаточная твердость* появляется при невысокой температуре нагрева детали, малой выдержке, небольшой скорости охлаждения. При недостаточном прогреве или неинтенсивном охлаждении появляются мягкие пятна на поверхности закаленных изделий.

*Коробление, закалочные трещины, изменение размеров* возникают от термических и структурных напряжений.

*Термические напряжения* появляются в результате различной скорости охлаждения отдельных частей изделия.

*Структурные напряжения* возникают при образовании новых фаз, имеющих различные объемы. Один из способов уменьшения образования этих дефектов - медленное охлаждение деталей в области температур мартенситного превращения.

*Перегрев стали* ведёт к появлению перед охлаждением крупнозернистого аустенита вследствие длительной выдержки при повышенной температуре. Это приводит после закалки к образованию крупноиглочатого мартенсита повышенной хрупкости. Данный дефект устраняется повторной термической обработкой при правильном режиме.

*Окисление и обезуглероживание* поверхности изделия возникает при взаимодействии атмосферы печи с металлом нагретой детали ввиду длительного пребывания детали в печи.

**Отпуск** - обязательная операция после закалки. Структура закаленной стали состоит из мартенсита или мартенсита и остаточного аустенита. Эти структуры нестабильные. Кроме того, из-за высоких внутренних напряжений закаленная сталь при высокой твердости и прочности имеет низкие ударную вязкость, пластичность и предел упругости, вследствие чего она малопригодна для использования.

Цель отпуска - уменьшение внутренних напряжений и получение структуры с необходимыми эксплуатационными свойствами. При отпуске изменяются структура закаленной стали и ее свойства: повышаются ударная вязкость, предел упругости и пластичность, снижаются внутренние напряжения и твердость. Сталь становится менее хрупкой. В зависимости от температуры нагрева различают следующие виды отпуска: низкий, средний, высокий.

Низкий отпуск - закаленные изделия нагревают и выдерживают в течение заданного времени и интервале температур 150...200°C. Структура закаленной стали до отпуска состоит из тетрагонального мартенсита или тетрагонального мартенсита и остаточного аустенита, причем остаточный аустенит характерен для высокоуглеродистых сталей. В процессе низкого отпуска атомы углерода диффундируют из решетки тетрагонального мартенсита и образуют высокодисперсный карбид железа. Концентрация углерода в решетке мартенсита постепенно снижается, что приводит к снижению тетрагональности мартенсита. При этом образуется *отпущенный мартенсит*, представляющий собой совокупность перенасыщенного твердого раствора углерода в  $\alpha$ -железе и высокодисперсного не отделившегося от него карбида железа. Такая структура обеспечивает почти ту же твердость и износостойкость, как и после закалки но при этом снижаются остаточные напряжения, повышаются ударная вязкость и пластичность. Низкотемпературному отпуску подвергают режущий и измерительный инструмент, а также детали машин, поверхностно закаленные и закаленные после цементации и цианирования.

Средний отпуск - закаленные изделия нагревают и выдерживают в течение определенного времени при температурах 350...500°C. В указанном интервале температур завершается диффузионное превращение остаточного аустенита в отпущенный мартенсит, карбиды полностью обособляются от решетки мартенсита, укрупняется карбидно-ферритная смесь и наблюдается дальнейшее снижение твердости. Завершается диффузия углерода из мартенсита, и уменьшаются остаточные напряжения. Структура среднеотпущенной стали состоит из *троостита отпуска*, представляющего собой очень мелкодисперсную смесь феррита с цементитом. В результате среднего отпуска сталь приобретает повышенную прочность и упругость при твердости HB 450...500 (HRC 46-50). Среднему отпуску подвергают закаленные изделия, которые должны иметь максимально упругие свойства при относительно высокой твердости: пружины, рессоры, ударный инструмент - зубила, штампы и др.

Высокий отпуск - закаленные изделия нагревают в течение заданного времени в интервале температур 500...650°C. Процесс сопровождается укрупнением и округлением цементитных частиц в ферритной основе. С укрупнением цементита понижаются твердость до HB250...300, внутренние напряжения, а пластичность и ударная вязкость значительно возрастают. В результате высокого отпуска получается структура, называемая *сорбитом отпуска*. Высокому отпуску подвергают детали, испытывающие ударные и знакопеременные нагрузки: шатуны двигателей, полуоси, оси автомобилей и тракторов, болты, пальцы, валы и многие другие детали. Закалку с последующим высоким отпуском часто называют *улучшением стали*.

Время выдержки при отпуске зависит от температуры и размера деталей. Оно должно быть достаточно для завершения процессов диффузии в закаленной стали. В противном случае эффективность отпуска понижается. Время выдержки при отпуске, особенно легированных сталей, несколько больше времени выдержки при нагреве под закалку. При низких температурах выдержка больше, чем при высоких. Охлаждение



углеродистых сталей после отпуска можно проводить с любой скоростью, поскольку оно не вызывает в стали каких-либо дополнительных структурных превращений (температура нагрева  $A_{c1}$  - ниже фазовых превращений). Однако чрезмерно быстрое охлаждение может вызвать образование термических напряжений (особенно в деталях сложной формы). Поэтому обычно стали охлаждают на воздухе.

На рисунке 3 показан график изменения механических свойств стали 40 (твердости НВ, прочности  $\sigma_b$ , пластичности  $\delta$ ,  $\psi$  и ударной вязкости КС) в зависимости от температуры отпуска. Нагрев при отпуске особенно влияет на изменение ударной вязкости стали.

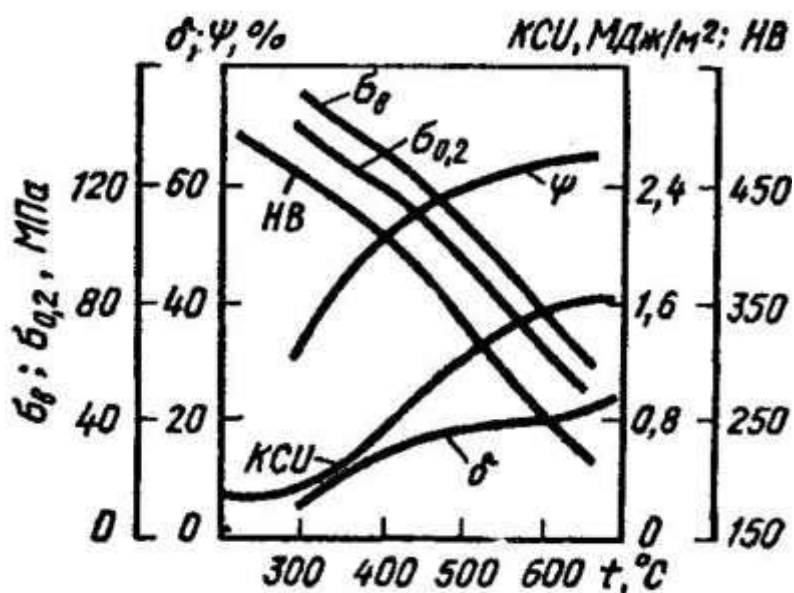


Рисунок 3 - Механические свойства стали марки 40 в зависимости от температуры отпуска

**Порядок выполнения работы.** 1. До термической обработки измерить твердость отожженных образцов из сталей с различным содержанием углерода на приборе Роквелла.

2. Определить по диаграмме железо - цементит и уточнить по справочнику и таблице 1 режимы термической обработки (отжига, нормализации, закалки и отпуска) для выбранных сталей.

Таблица 1 - Температуры критических точек при нагреве сталей и их твердость после закалки

Марка стали	Массовая доля углерода, %	Температура, °С		Твердость правильно закаленной стали, HRC
		A <sub>C1</sub>	A <sub>C3</sub>	
Углеродистые конструкционные стали				
20	0,17 – 0,24	735	850	34 – 40
25	0,22 – 0,30	735	835	
30	0,27 – 0,35	730	820	42 – 48
35	0,32 – 0,40	730	810	
40	0,37 – 0,45	730	790	48 – 51
45	0,42 – 0,50	730	770	
50	0,47 – 0,55	725	760	54 – 60
55	0,52 – 0,60	725	755	
60	0,57 – 0,65	725	750	60 – 62
Углеродистые инструментальные стали				
У7	–	725	765	62 – 64
У8 – У13	–	730	–	63 – 65

3. Загрузить образцы в печи и после заданной выдержки охладить на воздухе и в воде.

4. Провести отпуск образцов, закаленных в воде.

5. Измерить твердость образцов после нормализации, и после закалки на приборе Роквелла.

6. Результаты экспериментов занести в таблицу 2

7. На основании полученных результатов построить график изменения твердости нормализованных и закаленных сталей в зависимости от содержания в них углерода (рисунок 4).

**Содержание отчета.** В отчет необходимо включить: описание видов термообработки; участок диаграммы состояния железо - цементит для сталей и указать на нем области оптимальных температур нагрева для отжига, нормализации, закалки и отпуска; сводную таблицу результатов испытаний; графики изменения твердости сталей в зависимости от скорости охлаждения при термообработке и содержания углерода.

В выводах объяснить влияние скорости охлаждения и температуры нагрева при закалке на твердость сталей с различным содержанием углерода и указать условия, при соблюдении которых получается наивысшая твердость.

Таблица 2 – Технологические параметры термической обработки

Исходные данные		Вид термической обработки				
Марка стали	Массовая доля углерода, %	Нормализация		Закалка		Средний отпуск
		t, °C	HRC	t, °C	HRC	

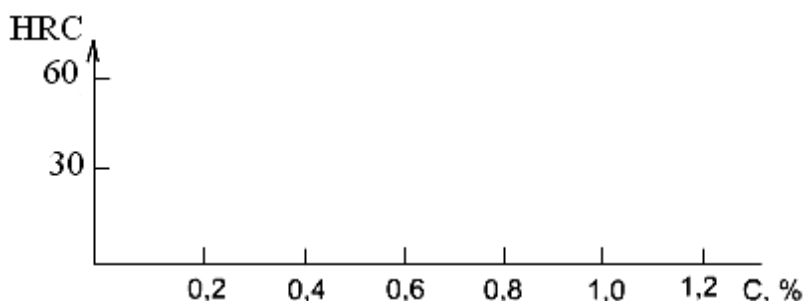


Рисунок 4 – Координатная плоскость

### Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №10

1. Что такое термическая обработка? Виды термической обработки.
2. От чего зависит температура нагрева при термической обработке и как ее определить?
3. От чего зависит время выдержки и как его определить?
4. Что такое отжиг? Какие существуют виды отжига и каково их назначение?
5. Что такое нормализация, и каково ее назначение?
6. Что такое закалка сталей? Какова ее цель?
7. Какие существуют разновидности закалки?
8. Какие дефекты могут возникнуть в результате закалки? Каковы причины возникновения данных дефектов?

9. Для какой цели применяется отпуск?

10. Перечислите виды и режимы отпуска. Как изменяются структура и свойства закаленной стали с повышением температуры отпуска?

11. Что такое «улучшение»? Какие стали (и изделия) ему подвергаются?

## ***Лабораторная работа 11***

### **Изучение микроструктуры и свойств сталей после поверхностной закалки с нагревом токами высокой частоты и химико – термической обработки**

**Цели работы:** изучить макро- и микроструктуру и свойства стали после поверхностной закалки с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ), цементации, азотирования, цианирования и диффузионной металлизации.

**Теоретические сведения.** К основным способам поверхностного упрочнения сталей относятся поверхностная закалка ТВЧ, цементация, азотирование, цианирование, нитроцементация и диффузионная металлизация. При этих способах упрочнения получают твердые и износостойкие поверхности деталей при сохранении достаточно вязкой сердцевины.

**Поверхностная закалка с нагревом ТВЧ** состоит в том, что поверхностный слой детали быстро нагревают до аустенитного состояния в переменном электромагнитном поле и затем охлаждают со скоростью, ниже критической. Этой закалке подвергают среднеуглеродистые стали, содержащие 0,35...0,6 % углерода. Процесс отличается высокой производительностью и применяется преимущественно в массовом производстве при упрочнении шеек коленчатых валов, кулачков распределительных валов, сегментов, после восстановления изношенных деталей различными видами наплавки и др. После поверхностной закалки на поверхности деталей получают структуру очень мелкого, скрытокристаллического мартенсита (рисунок 1, а), твердость которого на

2...3 единицы больше, чем у обычного мартенсита. С удалением от поверхности мартенситная структура переходит в структуру мартенсита и феррита (переходная зона рисунок 1, б) и твердость снижается. Сердцевина сохраняет первоначальную структуру перлита и феррита (рисунок 1, в).

Для снижения Остаточных напряжений в закаленном слое детали обычно подвергают низкому отпуску при 160 ... 200 °С или самоотпуску, который осуществляется за счет тепла, оставшегося в них после закалки при охлаждении не до конца.

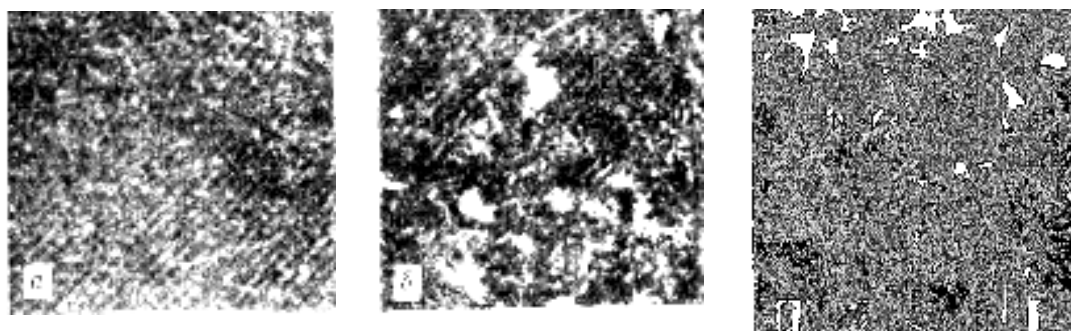


Рисунок 1 - Микроструктура стали марки 45 после поверхностной закалки с самоотпуском: а - поверхность; б - переходная зона; в - сердцевина. Травление 4%-ным раствором  $\text{HNO}_3$  в спирте,  $\times 750$

**Химико-термическая обработка (ХТО)** – процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностного слоя детали.

Изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой, газообразной, плазменной), в которой осуществляется нагрев.

В результате изменения химического состава поверхностного слоя изменяются его фазовый состав и микроструктура,

Основными параметрами химико-термической обработки являются температура нагрева и продолжительность выдержки.

В основе любой разновидности химико-термической обработки лежат процессы *диссоциации, адсорбции, диффузии*.

*Диссоциация* – получение насыщающего элемента в активированном атомарном состоянии в результате химических реакций, а также испарения.

Например,



*Адсорбция* – захват поверхностью детали атомов насыщающего элемента.

Адсорбция – всегда экзотермический процесс, приводящий к уменьшению свободной энергии.

*Диффузия* – перемещение адсорбированных атомов вглубь изделия.

Для осуществления процессов адсорбции и диффузии необходимо, чтобы насыщающий элемент взаимодействовал с основным металлом, образуя твердые растворы или химические соединения.

Химико-термическая обработка является основным способом поверхностного упрочнения деталей.

Основными разновидностями химико-термической обработки являются:

- цементация (насыщение поверхностного слоя углеродом);
- азотирование (насыщение поверхностного слоя азотом);
- нитроцементация или цианирование (насыщение поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом);
- диффузионная металлизация (насыщение поверхностного слоя различными металлами).

**Назначение и технология видов химико-термической обработки: цементации, азотирования нитроцементации и диффузионной металлизации**

***Цементация***

*Цементация* - химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя атомами углерода при нагреве до температуры  $900...950\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (до  $0,25\%$ ).

Нагрев изделий осуществляют в среде, легко отдающей углерод. Подобрав режимы обработки, поверхностный слой насыщают углеродом до требуемой глубины.

*Глубина цементации ( $h$ )* - расстояние от поверхности изделия до середины зоны, где в структуре имеются одинаковые объемы феррита и перлита ( $h = 1...2$  мм).

*Степень цементации* - среднее содержание углерода в поверхностном слое (обычно, не более  $1,2\%$ ).

Более высокое содержание углерода приводит к образованию значительных количеств цементита вторичного, сообщающего слою повышенную хрупкость.

На практике применяют цементацию в твердом и газовом карбюризаторе (науглероживающей среде).

Участки деталей, которые не подвергаются цементации, предварительно покрываются медью (электролитическим способом) или глиняной смесью.

### Цементация в твердом карбюризаторе

Почти готовые изделия, с припуском под шлифование, укладывают в металлические ящики и пересыпают твердым карбюризатором. Используется древесный уголь с добавками углекислых солей  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в количестве  $10...40\%$ . Закрытые ящики укладывают в печь и выдерживают при температуре  $930...950\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



За счет кислорода воздуха происходит неполное сгорание угля с образованием окиси углерода ( $CO$ ), которая разлагается с образованием атомарного углерода по реакции:



Образующиеся атомы углерода адсорбируются поверхностью изделий и диффундируют вглубь металла.

Недостатками данного способа являются:

- значительные затраты времени (для цементации на глубину 0,1 мм затрачивается 1 час);
- низкая производительность процесса;
- громоздкое оборудование;
- сложность автоматизации процесса.

Способ применяется в мелкосерийном производстве.

### Газовая цементация

Процесс осуществляется в печах с герметической камерой, наполненной газовым карбюризатором.

Атмосфера углеродосодержащих газов включает азот, водород, водяные пары, которые образуют газ-носитель, а также окись углерода, метан и другие углеводороды, которые являются активными газами.

Глубина цементации определяется температурой нагрева и временем выдержки.

Преимущества способа:

- возможность получения заданной концентрации углерода в слое (можно регулировать содержание углерода, изменяя соотношение составляющих атмосферу газов);
- сокращение длительности процесса за счет упрощения последующей термической обработки;

- возможность полной механизации и автоматизации процесса.

Способ применяется в серийном и массовом производстве.

### Структура цементованного слоя

Структура цементованного слоя представлена на рисунке 2.

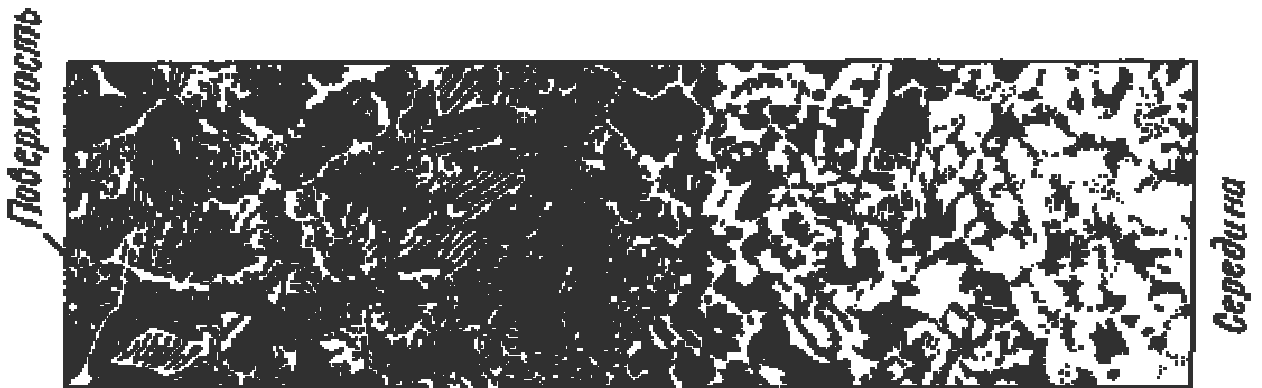


Рисунок 2 - Структура цементованного слоя

На поверхности изделия образуется слой заэвтектоидной стали, состоящий из перлита и цементита. По мере удаления от поверхности, содержание углерода снижается и следующая зона состоит только из перлита. Затем появляются зерна феррита, их количество, по мере удаления от поверхности увеличивается. И, наконец, структура становится отвечающей исходному составу (феррит-перлит).

### Термическая обработка после цементации

В результате цементации достигается только выгодное распределение углерода по сечению. Окончательно формирует свойства цементованной детали последующая термообработка. Все изделия подвергают закалке с

низким отпуском. После закалки цементованное изделие приобретает высокую твердость и износостойкость, повышается предел контактной выносливости и предел выносливости при изгибе, при сохранении вязкой сердцевины.

Комплекс термической обработки зависит от материала и назначения изделия.

Если сталь наследственно мелкозернистая или изделия неотчетливого назначения, то проводят однократную закалку с температуры  $820...850\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом обеспечивается получение высокоуглеродистого мартенсита в цементованном слое, а также частичная перекристаллизация и измельчение зерна сердцевины.

При газовой цементации изделия по окончании процесса подстуживают до этих температур, а затем проводят закалку (не требуется повторный нагрев под закалку).

Для удовлетворения особо высоких требований, предъявляемых к механическим свойствам цементованных деталей, применяют двойную закалку.

Первая закалка (или нормализация) проводится с температуры  $880...900\text{ }^{\circ}\text{C}$  для исправления структуры сердцевины.

Вторая закалка проводится с температуры  $760...780\text{ }^{\circ}\text{C}$  для получения мелкоигльчатого мартенсита в поверхностном слое.

Завершающей операцией термической обработки всегда является низкий отпуск, проводимый при температуре  $150...180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В результате отпуска в поверхностном слое получают структуру мартенсита отпуска, частично снимаются напряжения.

Цементации подвергают зубчатые колеса, поршневые кольца, червяки, оси, ролики.

### *Азотирование*

*Азотирование* - химико-термическая обработка, при которой поверхностные слои насыщаются азотом.

Впервые азотирование осуществил Чижевский И.П., промышленное применение - в двадцатые годы.

При азотировании увеличиваются не только твердость и износостойкость, но также повышается коррозионная стойкость.

При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда поступает аммиак  $NH_3$  с определенной скоростью. Атомарный азот поглощается поверхностью и диффундирует вглубь изделия.

Фазы, получающиеся в азотированном слое углеродистых сталей, не обеспечивают высокой твердости, и образующийся слой хрупкий.

Для азотирования используют стали, содержащие алюминий, молибден, хром, титан. Нитриды этих элементов дисперсны и обладают высокой твердостью и термической устойчивостью.

Типовые азотируемые стали: *38ХМЮА, 35ХМЮА, 30ХТ2НЗЮ.*

Глубина и поверхностная твердость азотированного слоя зависят от ряда факторов, из которых основные: температура азотирования, продолжительность азотирования и состав азотируемой стали.

В зависимости от условий работы деталей различают азотирование:

- для повышения поверхностной твердости и износостойкости;
- для улучшения коррозионной стойкости (антикоррозионное азотирование).

В первом случае процесс проводят при температуре  $500...560$  °С в течение  $24...90$  часов, так как скорость азотирования составляет  $0,01$  мм/ч. Содержание азота в поверхностном слое составляет  $10...12$  %, толщина слоя ( $h$ ) –  $0,3...0,6$  мм. На поверхности получают твердость около  $1000$  НВ. Охлаждение проводят вместе с печью в потоке аммиака.

Значительное сокращение времени азотирования достигается при ионном азотировании, когда между катодом (деталью) и анодом

(контейнерной установкой) возбуждается тлеющий разряд. Происходит ионизация азотосодержащего газа, и ионы бомбардируя поверхность катода, нагревают его до температуры насыщения. Катодное распыление осуществляется в течение 5...60 мин при напряжении 1100...1400 В и давлении 0,1...0,2 мм рт. ст., рабочее напряжение 400...1100 В, продолжительность процесса до 24 часов.

Антикоррозионное азотирование проводят и для легированных, и для углеродистых сталей. Температура проведения азотирования - 650...700 °С, продолжительность процесса - 10 часов. На поверхности образуется слой ε - фазы толщиной 0,01...0,03 мм, который обладает высокой стойкостью против коррозии. (ε - фаза - твердый раствор на основе нитрида железа  $Fe_3N$ , имеющий гексагональную решетку).

Азотирование проводят на готовых изделиях, прошедших окончательную механическую и термическую обработку (закалка с высоким отпуском).

После азотирования в сердцевине изделия сохраняется структура сорбита, которая обеспечивает повышенную прочность и вязкость.

### ***Цианирование и нитроцементация***

*Цианирование* – химико-термическая обработка, при которой поверхность насыщается одновременно углеродом и азотом.

Осуществляется в ваннах с расплавленными цианистыми солями, например  $NaCN$  с добавками солей  $NaCl$ ,  $BaCl$  и др. При окислении цианистого натрия образуется атомарный азот и окись углерода:



Глубина слоя и концентрация в нем углерода и азота зависят от температуры процесса и его продолжительности.

Цианированный слой обладает высокой твердостью 58...62 HRC и хорошо сопротивляется износу. Повышаются усталостная прочность и коррозионная стойкость.

Продолжительность процесса 0,5...2 часа.

*Высокотемпературное цианирование* – проводится при температуре 800...950°C, сопровождается преимущественным насыщением стали углеродом до 0,6...1,2 %, (жидкостная цементация). Содержание азота в цианированном слое 0,2...0,6 %, толщина слоя 0,15...2 мм. После цианирования изделия подвергаются закалке и низкому отпуску. Окончательная структура цианированного слоя состоит из тонкого слоя карбонитридов  $Fe_2(C, N)$ , а затем азотистый мартенсит.

По сравнению с цементацией высокотемпературное цианирование происходит с большей скоростью, приводит к меньшей деформации деталей, обеспечивает большую твердость и сопротивление износу.

*Низкотемпературное цианирование* – проводится при температуре 540...600°C, сопровождается преимущественным насыщением стали азотом

Проводится для инструментов из быстрорежущих, высокохромистых сталей, является окончательной обработкой.

Основным недостатком цианирования является ядовитость цианистых солей.

*Нитроцементация* - газовое цианирование, осуществляется в газовых смесях из цементующего газа и диссоциированного аммиака.

Состав газа температура процесса определяют соотношение углерода и азота в цианированном слое. Глубина слоя зависит от температуры и продолжительности выдержки.

*Высокотемпературная нитроцементация* проводится при температуре 830...950°C, для машиностроительных деталей из углеродистых и малолегированных сталей при повышенном содержании аммиака. Завершающей термической обработкой является закалка с низким отпуском. Твердость достигает 56...62 HRC.

На ВАЗе 95 % деталей подвергаются нитроцементации.

*Низкотемпературной нитроцементации* подвергают инструмент из быстрорежущей стали после термической обработки (заковки и отпуска). Процесс проводят при температуре  $530...570^{\circ}\text{C}$ , в течение  $1,5...3$  часов. Образуется поверхностный слой толщиной  $0,02...0,004$  мм с твердостью  $900...1200$  HV.

Нитроцементация характеризуется безопасностью в работе, низкой стоимостью.

### ***Диффузионная металлизация***

*Диффузионная металлизация* – химико-термическая обработка, при которой поверхность стальных изделий насыщается различными элементами: алюминием, хромом, кремнием, бором и др.

При насыщении хромом процесс называют *хромированием*, алюминием - *алитированием*, кремнием - *силицированием*, бором - *борированием*.

Диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, жидких и газообразных средах.

При *твердой диффузионной металлизации* металлизатором является ферросплав с добавлением хлористого аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). В результате реакции металлизатора с  $\text{HCl}$  или  $\text{Cl}_2$  образуется соединение хлора с металлом ( $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CrCl}_2$ ,  $\text{SiCl}_4$ ), которые при контакте с поверхностью диссоциируют с образованием свободных атомов.

*Жидкая диффузионная металлизация* проводится погружением детали в расплавленный металл (например, алюминий).

*Газовая диффузионная металлизация* проводится в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов.



Диффузия металлов протекает очень медленно, так как образуются растворы замещения, поэтому при одинаковых температурах диффузионные слои в десятки и сотни раз тоньше, чем при цементации.

Диффузионная металлизация - процесс дорогостоящий, осуществляется при высоких температурах ( $1000...1200^{\circ}\text{C}$ ) в течение длительного времени.

Одним из основных свойств металлизированных поверхностей является жаростойкость, поэтому жаростойкие детали для рабочих температур  $1000...1200^{\circ}\text{C}$  изготавливают из простых углеродистых сталей с последующим алитированием, хромированием или силицированием.

Исключительно высокой твердостью (2000 HV) и высоким сопротивлением износу из-за образования боридов железа ( $\text{FeB}$ ,  $\text{FeB}_2$ ) характеризуются борированные слои, но эти слои очень хрупкие.

**Порядок выполнения работы.** 1. Изучить, зарисовать микроструктуру шлифов образцов и указать ее структурные составляющие.

2. Указать марку стали исследуемых шлифов - образцов.

3. Определить толщину упрочненного слоя образцов.

4. Указать твердость на поверхности упрочненного слоя и в сердцевине.

5. Результаты исследований занести в протокол.

**Содержание отчета.** В отчет необходимо включить краткие сведения о сущности и применении поверхностной закалки ТВЧ, цементации, азотировании, цианировании и диффузионной металлизации; обоснование температуры нагрева и выбор марки стали.

В выводах по работе отметить особенности влияния различных способов поверхностного упрочнения на макро- и микроструктуру упрочненного слоя, сердцевины, на толщину слоя и изменения в нем твердости.

### **Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №11**

1. В чем состоит сущность способов поверхностного упрочнения?

2. Каковы особенности закалки токами высокой частоты?
3. В чем принципиальное различие химико-термической и термической обработки?
4. Что такое цементация? Какова ее цель? Какие стали и изделия обычно подвергают цементации? Какая термическая обработка применяется после цементации, какова ее цель? Каковы структура и свойства стали после цементации? Какие существуют способы цементации, в чем их суть?
5. Что такое азотирование, какова его цель? Какие стали и изделия подвергают обычно азотированию? В чем заключается сущность основных способов азотирования?
6. В чем суть цианирования? Как оно осуществляется? В чем заключается сущность основных способов цианирования?
7. В чем заключается борирование? Каковы способы его осуществления? Каковы свойства борированной стали? В каких случаях целесообразно применять этот метод химико-термической обработки?
8. Перечислите распространенные способы диффузионного насыщения стали металлами. Каковы характерные свойства изделий после насыщения их поверхности различными металлами? Приведите примеры использования этих видов обработки.

## *Лабораторная работа 12*

### **Микроанализ цветных металлов и сплавов**

**Цели работы:** изучить микроструктуру широко применяемых цветных металлов и сплавов; установить связь между их структурой, свойствами и областью применения.

**Теоретические сведения.** Цветные металлы названы так из-за характерной окраски: красной, желтой, белой, синеватой, серой. Они обладают рядом специфических свойств: медь - высокой электропроводностью; алюминий и магний - низкой плотностью; свинец -

пластичностью; олово, свинец, цинк - легкоплавкостью. Поэтому перечисленные металлы широко применяют в промышленности в качестве составляющих элементов сплавов. Ниже дана краткая характеристика некоторых наиболее распространенных в сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве цветных металлов и сплавов.

**Медь.** Температура плавления меди 1083 °С, плотность 8,94 т/м<sup>3</sup>. Медь имеет гранцентрированную кубическую решетку (ГЦК). Механические свойства меди:  $\sigma_B = 200...250$  МПа;  $\delta = 45...50\%$ ; 35...40 НВ.

Чистая медь имеет ряд ценных технологических свойств: сваривается всеми видами сварки, легко поддается пайке, хорошо обрабатывается давлением, но обладает низкими литейными свойствами, так как склонна к газонасыщению и дает большую усадку. Высокая пластичность, большие электро- и теплопроводность, малая окисляемость обуславливают широкое применение меди. По электро- и теплопроводности медь занимает второе место после серебра. Недостатки меди: высокая плотность, плохая обрабатываемость резанием, низкая жидкотекучесть.

Механические свойства меди в большей степени зависят от ее состояния и в меньшей от содержания примесей. После холодной пластической деформации (наклепа), достигающей 90 % (и более), до 1,5 раза увеличивается прочность меди, но снижаются ее пластичность (до 8...10 %) и электропроводность.

Элементы Al, Fe, Ni, Sn, Zn, Ag, растворяющиеся в меди, повышают ее прочность и твердость, но уменьшают тепло- и электро- проводность, поэтому их используют для легирования сплавов на медной основе. Нерастворимые элементы РЬ и Вi ухудшают механические свойства меди. Наиболее вреден висмут - он охрупчивает медь и ее сплавы. Элементы Se, S, O образуют с медью хрупкие химические соединения и понижают ее пластичность. Сера вызывает хладноломкость.

Медь марки М1, содержащую 0,1 % примесей, используют для изготовления проводов, контактов и проводников электрического тока.

Микроструктура деформированной марки М1 после отжига состоит из крупных светлых зерен с темными границами и следами пластической деформации (прокатки) в виде линий сдвига и двойников. Для получения медных сплавов используют медь марки М4.

**Медные сплавы.** По химическому составу их подразделяют на латуни и бронзы. Сплавы меди с цинком называют латунями, все другие сплавы (за исключением сплавов с никелем - мельхиоров) - бронзами.

По технологическим признакам медные сплавы делят на литейные и деформируемые. Последние могут быть термически упрочняемые и неупрочняемые.

**Маркировка латуней и бронз.** Буквы в начале марки соответствуют названию сплава (Л - латунь, Бр - бронза), последующие буквы обозначают элементы, входящие в сплав: Ц - цинк, О - олово, С - свинец, Н - никель, А - алюминий, Ж - железо, Кр (К) - кремний, Ф - фосфор, Мц - марганец, Б - бериллий, Мг - магний, Т - титан и т. д. Цифры в марке означают количество входящих элементов в целых процентах.

Деформируемые и литейные латуни маркируют по-разному. В деформируемых латунях (ГОСТ 15527 - 70) после буквы Л стоит число, указывающее массовое содержание меди в сплаве в процентах, например Л90. Если латунь легирована наряду с цинком другими элементами, то после буквы Л перечисляют буквы этих элементов (кроме цинка), затем массовое содержание меди и легирующих элементов в соответствии с буквами. Например, латунь марки ЛЖМц59-1-1 содержит 59 % Cu, 1 % Fe, 1 % Mn, остальное Zn.

В марках литейных латуней после буквы Л указывают сначала основной легирующий компонент - Ц и массовое содержание его в процентах, а затем остальные легирующие компоненты и их содержание. Содержание меди в маркировке не указывают. Марки литейных латуней: ЛЦ40С (40 % Zn, 1 % Pb, остальное Cu); ЛЦ16К4; ЛЦОМц3Ж; ЛЦ14К3С3 и др.

При маркировке деформируемых бронз сначала буквами указывают легирующие элементы, а затем цифры, соответствующие их количеству. Например, в бронзе марки БрОЦС 4-4-3 содержится 4 % Sn, 4 % Zn, 3 % Pb, остальное Cu. В марке литейных бронз количество каждого легирующего элемента указывают после обозначающей его буквы, например БрО5Ц5С5 (5 % Sn, 5 % Zn, 5 % Pb, остальное Cu).

**Латуни** представляют собой двойные или многокомпонентные медные сплавы. По сравнению с медью они обладают более высокими прочностью, коррозионной стойкостью, упругостью, технологичностью и трибологическими характеристиками.

Основной легирующий элемент в латуни - цинк. Он может образовывать в сплаве  $\alpha$ -фазу (твердый раствор цинка в меди) и  $\beta$ -фазу (электронное соединение CuZn). При содержании до 39 % Zn латуни являются однофазными - состоят из  $\alpha$ -фазы. При большем содержании цинка в латуни образуется  $\beta$ -фаза, и тогда латунь становится двухфазной, состоящей из ( $\alpha + \beta$ )-фаз. На практике применяют латуни, содержащие до 45 % Zn (со структурой  $\alpha$  и  $\alpha + \beta$ ), поскольку при дальнейшем увеличении цинка в сплаве прочность латуни уменьшается, а хрупкость увеличивается (рисунок 1).

Для легирования латуней применяют алюминий, железо, кремний, марганец, мышьяк, никель, олово и свинец. Алюминий, никель, олово и кремний повышают прочность, коррозионную стойкость и улучшают антифрикционные характеристики. Кремний улучшает жидкотекучесть, свариваемость и способность к горячей и холодной пластической деформации. Железо, измельчая зерно, повышает температуру рекристаллизации и твердость латуни, марганец - жаростойкость. Мышьяк предохраняет латуни от обесцинкования в агрессивных пресных водах. Добавки свинца улучшают обработку резанием, но в однофазных латунях вызывают красноломкость.

Однофазные латуни с содержанием Zn до 10 % называют томпаками, до 20% - полутомпаками. Эти латуни (Л96, Л90, Л80, Л 70) обладают высокой пластичностью и хорошо обрабатываются давлением в холодном состоянии. В результате такой обработки значительно повышаются их прочность и твердость. Из них изготавливают трубки, сетки, гильзы, прутки, листы, фольгу и различные профили.

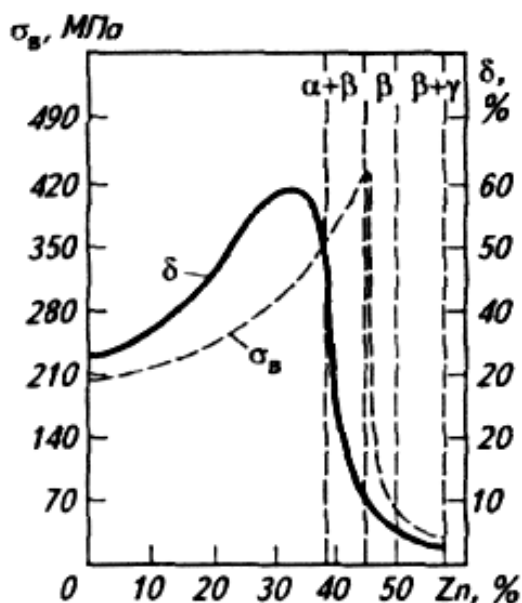
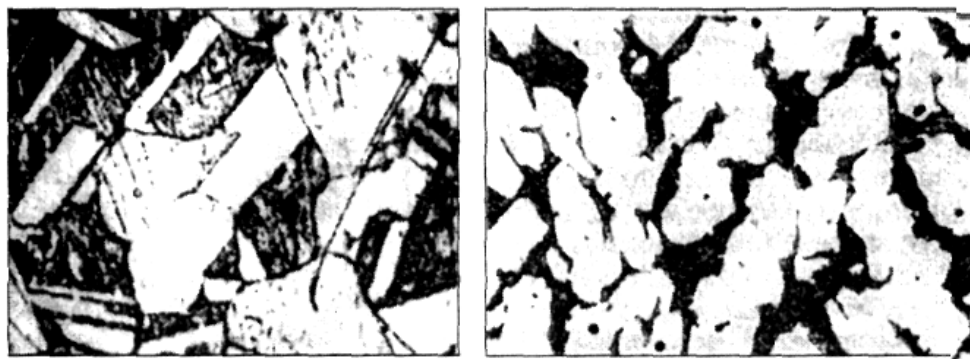


Рисунок 1 - Влияние содержания цинка на механические свойства и фазовый состав латуни

Латунь марки Л70 (70 % Cu, 30 % Zn) обладает коррозионной стойкостью и высокой пластичностью. Из нее изготавливают изделия прокаткой и штамповкой: проволоку, листы, трубы, поплавки карбюраторов двигателей, бачки радиаторов. Микроструктура деформированной однофазной латуни марки Л70 после отжига показана на рисунке 2, а. На ней видны темные линии сдвига и двойников. Зерна пластичной  $\alpha$ -фазы вследствие анизотропии травятся на разную глубину и поэтому имеют неодинаковую окраску.



а

б

Рисунок 2 - Микроструктура латуней Л70 (а) и ЛС59-1 (б)

Повышение содержания цинка удешевляет латуни, улучшает их обрабатываемость резанием, способность противостоять изнашиванию, однако при этом уменьшаются тепло- и электропроводность. Двухфазные латуни (Л60, ЛС59-1, ЛМц58-2, ЛАЖ60-1-1; ЛАН59-3-2) имеют большую прочность и износостойкость, но низкую пластичность, поэтому их обрабатывают давлением только в горячем состоянии.

Латунь марки ЛС59-1 (59 % Си, 1 % РЬ, 40 % Zn) обладает хорошей обрабатываемостью резанием, вследствие чего из нее изготавливают изделия прокаткой или прессованием: листы, прутки, трубы, втулки, гайки, жиклеры, тройники, пробки и др. Эту латунь выпускают также в виде цветного литья. Микроструктура литой двухфазной латуни марки ЛС59-1 состоит из светлых зерен пластичной  $\alpha$  - фазы и темных зерен твердой и хрупкой  $\beta$ -фазы (рисунок 2, б).

Литейные латуни (ГОСТ 17711 - 93) содержат те же элементы, что и латуни, обрабатываемые давлением, но их отличает, как правило, большее легирование цинком и другими металлами. Вследствие малого интервала кристаллизации они обладают хорошими литейными характеристиками.

Литейные латуни используют для фасонного литья. Из них изготавливают детали, работающие в морской воде, подшипнику и втулки неотчетственного назначения, сепараторы подшипников, шестерни, детали для судо- и автомобилестроения и др.



В ГОСТ 17711 - 93 кроме химического состава нормированы механические свойства медно-цинковых сплавов:  $\sigma_B = 146 \dots 686$  МПа;  $\delta = 6 \dots 20\%$ ;  $60 \dots 185$ НВ.

**Бронзы** подразделяют по химическому составу на оловянные и безоловянные. По фазовому составу бронзы бывают пластичные однофазные и более твердые и хрупкие двухфазные. Как и латуни, по технологическому признаку бронзы делят на деформируемые и литейные.

Бронза марки БрО10 (10 % Sn, 90 % Cu) относится к однофазным оловянным бронзам и обладает хорошими литейными свойствами и поэтому применяется для сложного фасонного литья, арматуры и др. Микроструктура оловянной бронзы (рисунок 3) состоит из неоднородного твердого  $\alpha$ -раствора (твердый раствор олова в меди) и твердых включений эвтектоида. Темные участки неоднородного твердого  $\alpha$ -раствора обогащены медью, светлые - оловом. Из бронзы марки БрО10 изготавливают подшипники скольжения, детали арматуры, сложные отливки.



Рисунок 3 - Микроструктура бронзы БрО10

*Антифрикционные сплавы.* Для снижения трения в узлах механизмов и заливки вкладышей подшипников скольжения машин ответственного назначения (турбин, компрессоров, дизелей) используют антифрикционные сплавы.

*Антифрикционность* - это свойство материала, характеризующееся низким коэффициентом трения скольжения и в результате небольшими потерями на трение и малой скоростью изнашивания сопряженной детали - стального или чугунного вала. Сплавы для подшипников скольжения

должны иметь высокую теплопроводность, хорошую смачиваемость смазочным материалом, способность образовывать на поверхности защитные пленки мягкого металла, хорошую прирабатываемость за счет пластического деформирования.

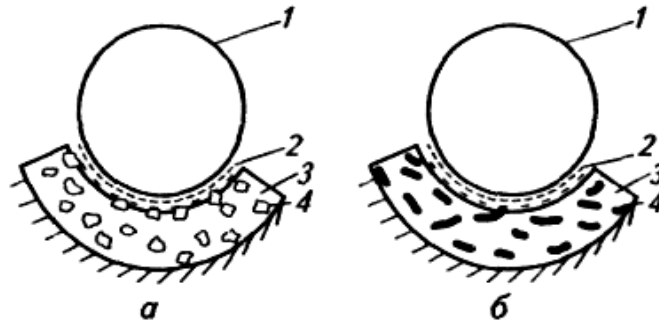


Рисунок 4 - Узлы трения скольжения с различными антифрикционными сплавами: *а* – с твердыми включениями; *б* - с мягкими включениями; 1 - вал; 2 - смазочный материал; 3 - основа; 4 - включения

Структура антифрикционных сплавов бывает двух типов: первого (называется схемой Шарпи) с мягкой матрицей и твердыми включениями (рисунок 4, *а*); второго - с твердой матрицей и мягкими включениями (рисунок 4, *б*).

К сплавам первого типа относятся баббиты (Б83, Б88) и сплавы на основе меди - бронзы (БрО10Ф1, БрО10Ц2, Бр05Ц5С5) и латуни (ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2). Мягкая матрица в этих сплавах обеспечивает хорошую прирабатываемость, а твердые включения - износостойкость.

В сплавах второго типа мягкой составляющей служат включения свинца или олова. Тонкая пленка этих мягких легкоплавких металлов при трении наволакивается на поверхность вала и хорошо защищает шейки вала от изнашивания. К сплавам этого типа относятся свинцовистая бронза БрС30, алюминиевые сплавы с оловом, а также серые чугуны, в которых функцию мягкой составляющей выполняют включения графита.

Баббит Б83 (83% Sn, 11% Sb, 6% Cu) - подшипниковый сплав, обладающий высокими антифрикционными свойствами. Микроструктура сплава (рисунок 5) состоит из темной пластичной основы -  $\alpha$ -фазы (твердого раствора сурьмы и меди в олове), светлых твердых кубических кристаллов

SnSb и мелких игл или пластинок кристаллов  $Cu_6Sn_5$ . В случае перегрева образуются более крупные интерметаллидные соединения, и качество баббита резко ухудшается.

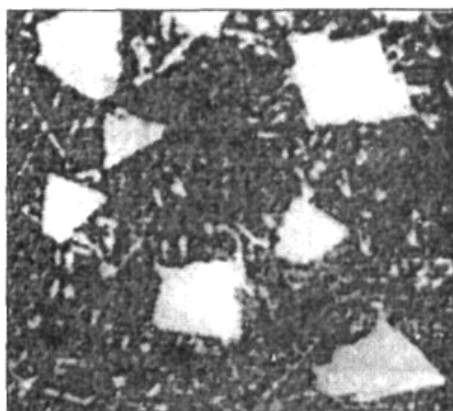


Рисунок 5 - Микроструктура баббита Б83

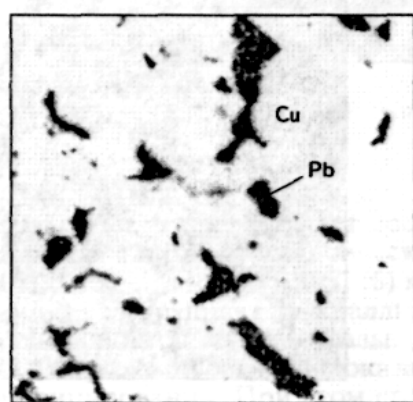


Рисунок 6 - Микроструктура антифрикционной свинцовой бронзы БрС30

Бронза БрС30 (30% Рb, 70% Сu) - свинцовая. Это высококачественный антифрикционный материал, широко применяемый в машиностроении. Ее микроструктура состоит из отдельных зерен меди и свинца (рисунок 6). Высокие антифрикционные свойства обеспечиваются равномерным вкраплением свинца в медь, но получить требуемую структуру трудно из-за различия в плотности свинца и меди, приводящего к усиленной ликвации по плотности.

**Алюминий.** Температура плавления алюминия  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; плотность  $2,7\text{ г/м}^3$ , т. е. почти в три раза ниже, чем у железа. Алюминий имеет кристаллическую гранецентрированную решетку (ГЦК), обладает высокой теплопроводностью и пластичностью, но низкой прочностью. Электропроводность алюминия составляет 65 % электропроводности меди. Механические свойства прокатанного и отожженного алюминия:  $\sigma_b = 58\text{ МПа}$ ;  $\delta = 40\text{ \%}$ ; 25 НВ.

Для алюминия характерна высокая химическая активность, но образующаяся на его поверхности тонкая, очень прочная пленка  $Al_2O_3$  хорошо защищает от воздействия окружающей среды. Алюминий хорошо

сваривается, легко обрабатывается давлением, имеет большую линейную усадку - 1,8 %; обработка резанием затруднена.

**Алюминиевые сплавы.** Различают деформируемые неупрочняемые термической обработкой, деформируемые упрочняемые термической обработкой (ГОСТ 4784 - 97), а также литейные (ГОСТ 1583 - 93) алюминиевые сплавы.

К деформируемым сплавам, неупрочняемым термической обработкой, относятся сплавы  $Al - Mn$  ( $AMu$ ) и  $Al - Mg$  ( $AMr2$ ,  $AMr5$ ,  $AMr6$ ). Их используют в отожженном, нагартованном или полунагартованном состоянии. Эти сплавы хорошо свариваются. Из них изготавливают коррозионностойкие изделия, получаемые методом горячей и холодной деформации и сварки (например, профили, панели, сварные бензобаки, трубопроводы для масла и бензина, корпуса судов и вагонов).

К деформируемым сплавам, упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы:  $Al - Cu - Mg$  (дуралюмины Д1, Д16, Д18, ВД17 и др.),  $Al - Zn - Mg - Cu$  (высокопрочные сплавы В93, В95),  $Al - Mg - Si - Cu$  (ковочные сплавы АК6, АК8). Для их упрочнения применяют закалку в воде и старение (естественное или искусственное).

Дуралюмин марки Д1 (3,8...4,8 % Cu; 0,6% Mg; 0,6% Mn; < 0,7 % Si; остальное Al) обладает достаточной прочностью и пластичностью. Легирующие элементы Cu, Mg, Fe, Mn формируют упрочняющие фазы и зоны. Кроме того, Mg повышает коррозионную стойкость, а Fe снижает ее. Вместе с тем Mg и Mn снижают тепло- и электропроводность алюминия.

Посредством прокатки и штамповки из дуралюмина изготавливают листы, прутки, трубы и др. Для получения требуемых свойств дуралюмин закалывают в воде от 510 °С и затем подвергают естественному старению при 18...20°С в течение нескольких суток. После закалки микроструктура дуралюмина Д16 (рисунок 7) состоит из светлых зерен перенасыщенного твердого раствора. В процессе старения происходит упрочнение сплава за

счет выделения мелкодисперсной упрочняющей фазы  $\text{CuAl}_2$  (на микрошлифе не видна).

*Литейные алюминиевые сплавы (силумины)* в качестве основного легирующего элемента содержат кремний.

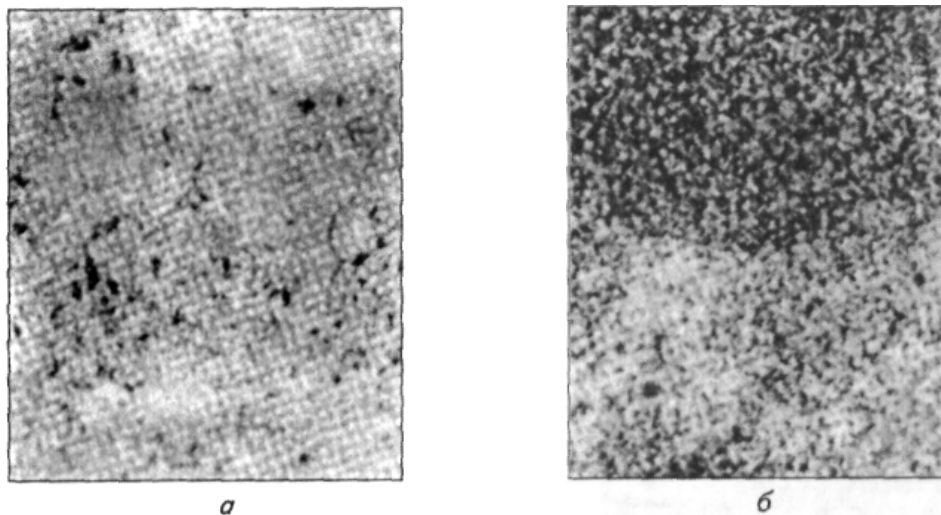


Рисунок 7 - Микроструктура дуралюмина Д16: а - после закалки; б - после старения

Силумин АЛ2 (12 ... 13 % Si, остальное А1) обладает коррозионной стойкостью и хорошими литейными свойствами. Из него изготавливают отливки крышек, кожухов, корпусов водяных насосов, барабанов и др. Немодифицированный силумин АЛ2, содержащий 12 % Si, представляет собой заэвтектический сплав и имеет структуру, состоящую из эвтектики ( $\alpha + \text{Si}$ ) грубого строения и темных крупных хрупких игл кремния, снижающих пластические свойства сплава (рисунок 8, а). Фаза  $\alpha$  представляет собой твердый раствор внедрения атомов кремния в кристаллической решетке алюминия. Модифицирование сплава натрием (~1 %) меняет характер кристаллизации силумина: затрудняет кристаллизацию кремния и создает центры кристаллизации для  $\alpha$ -фазы. После модифицирования в структуре присутствуют светлые зерна  $\alpha$ -фазы и темная мелкокристаллическая эвтектика (рисунок 8, б). Модифицирование значительно улучшает пластичность и прочность силумина.

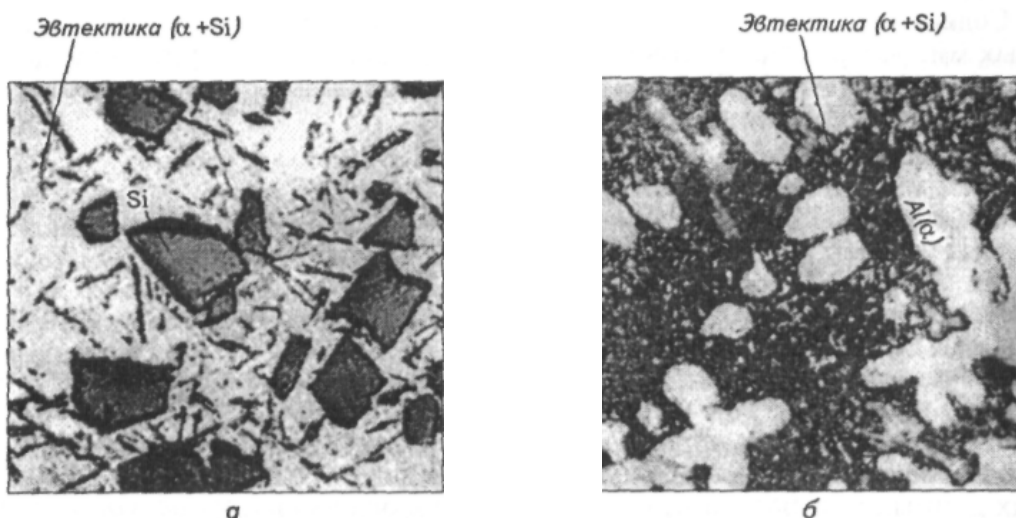


Рисунок 8 - Микроструктура силумина АЛ2: *а* - до модифицирования; *б* - после модифицирования

- Порядок выполнения работы.**
1. Рассмотреть на микроскопе и зарисовать схемы микроструктур изучаемых цветных металлов и сплавов.
  2. Описать структурные составляющие и свойства изучаемых сплавов.
  3. Зарисовать диаграммы состояния Al - Cu и Al - Si, описать особенности упрочняющей технологии и модифицирования силумина.

**Содержание отчета.** В отчет включить: схемы и описания изучаемых микроструктур цветных металлов и сплавов; диаграммы состояния Al - Cu и Al - Si; сущность закалки и старения дуралюмина и модифицирования силумина.

### Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №12

1. Какими свойствами обладает медь?
2. Как маркируется медь?
3. Что представляет собой латунь? От чего зависят механические свойства латуни? Как маркируются латуни? Что изготавливают из латуней?
4. Что представляет собой бронза? Как маркируются бронзы? Что изготавливают из бронз?
5. Какими бывают типы структур антифрикционных сплавов?
6. Какими свойствами обладает алюминий?

7. Как маркируется медь?

8. Какие сплавы на основе алюминия применяются в автотракторостроении? Как маркируются данные сплавы?

### *Домашнее задание*

#### **Разработка технологического процесса термической обработки стальных деталей**

**Цель задания:** самостоятельно разработать технологический процесс термической обработки стальных деталей автомобиля, трактора или сельскохозяйственной машины, используя справочную литературу, по выданному преподавателем варианту задания (таблица 1).

Таблица 1 - Варианты домашнего задания по разработке технологического процесса термообработки деталей автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин

Номер варианта	Наименование детали	Марка стали	Твердость после термообработки, HRC, HB
1	Коленчатый вал	45Г2	56...58 HRC (пов.) 207...255 HB (серд.)
2	Поршневой палец	12ХН3А	58...62 HRC (пов.) 331...375 HB (серд.)
3	Вал коробки передач	20ХН3А	56...62 HRC (пов.) 255...302 HB (серд.)
4	Полуось конической передачи	35ХГС	241...285 HB
5	Ось задняя ведущих колес	45ХН	235...311 HB
6	Палец звеньев гусеницы	50Г	40...49 HRC
7	Червяк руля	20ХНР	56...62 HRC (пов.) 331...401 HB (серд.)
8	Сошка руля	40Х	255...302 HB
9	Зубчатое колесо бортовой передачи	12Х2Н4А	58...62 HRC (пов.) 311...375 HB (серд.)



10	Пружина клапана	50ХФА	42...49 HRC
11	Впускной клапан	40Х9С2	293...375 НВ
12	Полуось заднего моста автомобиля	30ХГСА	352...415 НВ
13	Болт коренных подшипников	40Х	241...311НВ
14	Червяк руля	20ХНМ	59...64 HRC (пов.) 293...352 НВ (серд.)
15	Зубчатое колесо полуоси автомобиля	18ХГТ	56...62 HRC (пов.) 363...415 НВ (серд.)
16	Шатун двигателя	18Х2Н4ВА	302...352 НВ
17	Рессора	60С2	363...444 НВ
18	Пружина навивочного автомата	65Г	42...48 HRC
19	Сегмент режущего аппарата косилки	У9А	50...56 HRC (лезв.) 311...363 НВ (тела)
20	Коленчатый вал	40ХНМА	56...58 HRC (пов.) 210...250 НВ (серд.)
21	Червяк руля	12ХН3А	58...63 HRC (пов.) 300...340 НВ (серд.)

Продолжение таблицы 1

22	Болт шатуна	38ХН3МА	279...321 НВ
23	Рессора передней подвески	50ХГФА	42...48 HRC
24	Игла форсунки	38ХМЮА	60...65 HRC (пов.) 240...250 НВ (серд.)
25	Зубчатое колесо	30ХГТ	56...62 HRC (пов.) 360...410 НВ (серд.)
26	Вал турбокомпрессора	35ХМ	230...260 НВ
27	Поршневой палец	20Х2Н4А	58...62 HRC (пов.) 290...350 НВ (серд.)
28	Шестерня полуоси заднего моста автомобиля	20ХГР	56...62 HRC (пов.) 260...320 НВ (серд.)
29	Пружина передней подвески	60С2ХФА	420...470 НВ
30	Толкатель	25ХГСА	56...62 HRC (пов.) 360...440 НВ (серд.)
31	Распределительный вал	20ХГНР	56...62 HRC (пов.) 360...440 НВ (серд.)
32	Вал коробки передач	30ХН3А	280...330 НВ
33	Клапан двигателя	40Х10С2М	200...260 НВ

34	Кольцо подшипника	ШХ15СГ	61...62 HRC
35	Рессора	55СГ2Р	380...450 НВ
36	Шестерня редуктора	25ХГТ	58...64 HRC (пов.) 260...310 НВ (серд.)
37	Крестовина кардана	20ХГНТР	56...62 HRC (пов.) 250...290 НВ (серд.)
38	Подшипник для работы в агрессивной среде	110Х18М	58...62 HRC
39	Протяжка	ХВСГ	58...63 HRC
40	Клапан двигателя	40Х9С2	290...370 НВ
41	Рессора	60С2Н2А	420...470 НВ
42	Распределительный вал	40ХНМА	64...70 HRC (пов.) 290...320 НВ (серд.)
43	Шатун	20ХН4ФА	270...300 НВ
44	Вал коробки передач	40ХФА	260...290 НВ
45	Плунжер	38Х2Ю	60...64 HRC (пов.) 250...270 НВ (серд.)

Продолжение таблицы 1

46	Резьбонарезная плашка	9ХС	60...65 HRC
47	Шатун	40ХНР	300...350 НВ
48	Поршневой палец	20ХН3А	58...62 HRC (пов.) 290...350 НВ (серд.)
49	Плунжер топливного насоса	38ХВФЮ	60...65 HRC (пов.) 230...290 НВ (серд.)
50	Вал редуктора	30ХГСНА	350...410 НВ
51	Ротор турбины	38ХГН	290...310 НВ
52	Лопатка турбины	1Х12В2МФ	250...290 НВ
53	Штампы для холодного деформирования	6ХВ2С	42...48 HRC
54	Штампы для горячего деформирования	5ХГМ	40...46 HRC
55	Резец	Р6М5К5	63...65 HRC
56	Пружина передней подвески	60С2ХФА	360...400 НВ
57	Карбюраторная игла	40Х13	55...60 HRC
58	Отрезной штамп	Х12М	60...62 HRC

59	Шары дробильных мельниц	110Г13Л	190...220 НВ
60	Поршневой палец	12ХН3А	60...62 HRC (пов.) 280...300 НВ (серд.)
61	Шатун двигателя	40ХНМА	300...350 НВ
62	Пружина клапана	50ХФА	380...430 НВ
63	Шестерня коробки передач	18ХГТ	58...62 HRC (пов.) 380...430 НВ (серд.)
64	Подшипник качения	20Х2Н4А	58...62 HRC (пов.) 320...400 НВ (серд.)
65	Режущий инструмент	Х6ВФ	61...64 HRC
66	Нож для холодной резки металла	9ХВГ	55...60 HRC
67	Вал коробки передач	25ХГТ	58...62 HRC (пов.) 290...360 НВ (серд.)
68	Протяжка	9Х5ВФ	62...65 HRC (пов.) 280...300 (серд.)
69	Вал коробки передач	20ХНМА	56...60 HRC (пов.) 250...300 НВ (серд.)
70	Измерительный инструмент	35ХЮА	68...70 HRC

Продолжение таблицы 1

71	Вал руля	35ХГСА	320...360 НВ
72	Вал	36Х2Н2МФА	360...380 НВ
73	Шестерня	12ХН3А	58...62 HRC (пов.) 290...350 НВ (серд.)
74	Вал коробки передач	30ХГСН2А	260...280 НВ
75	Плунжер	15ХФ	56...62 HRC (пов.) 210...250 НВ (серд.)

**Исходные данные** заполнить по форме:

Наименование детали \_\_\_\_\_

Марка стали \_\_\_\_\_

Твердость после окончательной термической обработки:

после поверхностного упрочнения

... HRC или поверхности, ... НВ сердцевины;

после объемной термообработки

... HRC или ... HB

**Порядок выполнения задания.** 1. Расшифровать марку заданной стали, зарисовать схему микроструктуры с указанием фаз и структурных составляющих, указать химический состав и механические свойства в состоянии поставки (после нормализации или отжига) и классифицировать сталь по назначению, химическому составу и качеству.

2. Описать характер влияния углерода и легирующих элементов (каждого в отдельности и в комплексе) заданной стали на положение критических точек  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$  и  $A_{cm}$ , рост зерна аустенита, закаливаемость и прокаливаемость стали, положение точек  $M_n$  и  $M_k$ , количество остаточного аустенита и этапы термической обработки.

3. Составить маршрутную технологию изготовления детали, включив предварительную и окончательную термообработку. Обосновать необходимость предварительной и окончательной термической обработки детали.

4. Назначить и обосновать режимы предварительной и окончательной термической обработки детали (температуру нагрева и микроструктуру после каждого этапа термической обработки, охлаждающую среду).

5. Выбрать основное и вспомогательное оборудование для термической обработки детали.

6. Зарисовать и описать микроструктуру с указанием фаз и структурных составляющих и механические свойства стали после окончательной термической обработки.

7. Работу сопроводить следующими графическими материалами: диаграммой состояния сплавов Fe - Fe<sub>3</sub>C с указанием температур термической обработки;

диаграммой изотермического превращения аустенита для заданной марки стали, на диаграмме провести векторы скоростей охлаждения для выбранных термообработок;

схемой режима термообработки стали в координатах «температура (°C) - время (час)» с указанием температуры нагрева, охлаждающей среды и получаемой структуры.

Варианты задания (см. таблицу 1) студенту выдает преподаватель.

**Методика выполнения задания.** Разработку технологии термической обработки заданной детали следует начинать с изучения условий работы детали и оценки свойств стали, способа изготовления заготовки. Ответы должны быть конкретными и изложены в соответствии с порядком выполнения задания.

При расшифровке марки заданной стали указать содержание основных и легирующих элементов по марке и по справочнику, зарисовать исходную микроструктуру и указать ее название, описать механические свойства стали (твердость, предел прочности при растяжении, пластичность и ударную вязкость) в состоянии поставки, отметить особенности структуры и свойств стали для области ее применения.

Проанализировать влияние углерода и легирующих элементов (каждого в отдельности и в комплексе) на этапы термической обработки стали. Температуры критических точек  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ,  $A_{cm}$  для заданной углеродистой стали определить по диаграмме состояния железо - цементит или по справочнику, а для легированной стали - только по справочнику.

При оценке влияния химического состава на рост зерна аустенита проанализировать склонность стали к перегреву и дать рекомендации по режиму нагрева заданной стали (медленно или быстро).

Особое внимание следует обратить на анализ закаливаемости и прокаливаемости заданной стали, так как от них зависят ее конечные свойства (твердость, глубина закалки и др.). В зависимости от закаливаемости и прокаливаемости стали по справочнику или по диаграмме изотермического превращения аустенита выбрать соответствующую охлаждающую закалочную среду, обеспечивающую необходимую скорость охлаждения.

По справочнику или по диаграмме превращения переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении (термокинетической диаграмме) определить положение точек начала  $M_n$  или конца  $M_k$  мартенситного превращения. При наличии в структуре остаточного аустенита указать способ его устранения.

Оценить влияние состава стали на превращения при отпуске.

При выполнении пунктов 3 и 4 задания использовать информацию пунктов 1 и 2. Обосновать последовательность операций предварительной термообработки заготовки и окончательной термообработки детали в общем процессе изготовления детали.

В качестве предварительной термической обработки заготовки в основном применяют отжиг или нормализацию. Нормализации рекомендуется подвергать штампованные заготовки из низко- и среднеуглеродистых сталей (10, 20, 30, 40, 45 и др.) и низколегированных сталей (15X, 30X, 35X, 40X, 40P, 50Г, 18ХГТ и др.).

Отжиг назначают преимущественно для крупных и сложных отливок и штамповок, проката, которые могут быть изготовлены из высокоуглеродистых сталей или сталей с повышенным содержанием легирующих элементов (Л65, 60С2, 65Г, 45Г2, У8А, 50ХФА, 45ХН, 12ХНЗА, 12Х2Н4А, 20ХНМ, 35ХГС, 40Х9С2, ШХ9, Р18, ХВГ и др.). После предварительной термической обработки выполняют черновую механическую обработку заготовок (точение, фрезерование, сверление, протягивание, нарезание резьбы и др.). После окончательной термической обработки проводят чистовую механическую обработку деталей точением, фрезерованием, шлифованием, хонингованием и др.

Пример последовательности операций термической и механической обработки зубчатого колеса, изготовленного из стали 12ХНЗА: штамповка - отжиг - черновая механическая обработка - цементация - закалка - низкий отпуск - чистовая механическая обработка (шлифование отверстий, канавок, зубьев).

Далее следует назначить и обосновать режим каждой термической обработки (температуру нагрева, охлаждающую среду и получаемую структуру), дополнительно пользуясь справочником.

Вид и типоразмер основного технологического оборудования (закалочные, цементационные и отпускные печи и ванны) выбирают применительно к единичному и мелкосерийному производству в зависимости от условий производства, габаритных размеров деталей, требуемой чистоты их поверхности, минимально допустимого обезуглероживания и окалинообразования.

В единичном и мелкосерийном производстве, как правило, применяют универсальные нагревательные печи общего назначения.

При высокочастотном нагреве температуру закалки выбирают по справочнику, температуру нагрева детали для химико-термической обработки (цементации) - по диаграмме состояния Fe - Fe<sub>3</sub>C или по справочнику.

Затем необходимо описать микроструктуру стали после окончательной термической обработки, зарисовать ее схему, указать основные фазы и структурные составляющие, а также основные механические свойства (твердость, прочность, пластичность, ударная вязкость).

Разработка технологического процесса завершается составлением технологической карты. В конце выполненного задания студент должен указать список использованной литературы.

## РАЗДЕЛ 2. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### *Лабораторная работа 1*

#### **Изучение оборудования для электродуговой сварки**

**Цели работы:** изучить оборудование для дуговой сварки и приобрести навыки его настройки на оптимальный режим по качеству сварного шва.

**Теоретические сведения.** Сварка - это процесс неразъемного соединения металлов, осуществляемый на основе использования сил межатомного сцепления.

Основоположниками использования тепла электрической дуги для целей сварки были русские ученые В.В. Петров, Н.Н. Бенардос и Н.Г. Славянов.

В 1802 г. впервые в мире профессор физики Санкт-Петербургской медико-хирургической академии Василий Владимирович Петров открыл явление электрического разряда в газах - электрическую дугу.

Источником тепла для расплавления металла при дуговой сварке является электрическая сварочная дуга, которая представляет собой длительный мощный электрический разряд, происходящий в газовой среде между двумя электродами, либо между электродами изделием. В обычных условиях газы не проводят электрического тока, для того, чтобы газ начал проводить ток, он должен быть ионизирован, т.е. в нем должно образовываться достаточное количество свободных электронов и ионов, процесс ионизации газового промежутка и возникновение электрической дуги происходит следующим образом, при коротком замыкании электрода на изделие в месте контакта выделяется большое количество тепла и металл сильно нагревается, при этом увеличивается тепловое колебание атомов и вместе с тем значительно ускоряется движение свободных электронов, при отрыве электрода от металла свободные электроны под действием сил



электрического поля начинают выбрасываться катодом в межэлектродное газовое пространство. Возникает так называемая электронная эмиссия, т.е. самопроизвольный выброс катодом свободных электронов. В газовом промежутке эти электроны сталкиваются с нейтральными молекулами газа и расщепляют их на положительно и отрицательно заряженные частицы-ионы. Это явление называется ионизацией, соударением. Под действием высокой температуры возникшей дуги происходит тепловая ионизация, а за счет мощного лучевого потока - фотоионизация. В результате действия этих различных причин ионизации становится настолько интенсивной, что газовая среда получает высокую электрическую проводимость, обеспечивая устойчивое горение дуги.

Для повышения устойчивости горения дуги в нее через покрытие электродов вводят химические вещества, которые снижают потенциал ионизации и тем самым обеспечивают образование свободных электронов, увеличивая степень ионизации газа.

Одной из важнейших характеристик источника питания сварочной дуги является внешняя вольт-амперная характеристика (рисунок 1). Внешней характеристикой называется кривая, показывающая зависимость между напряжением сварочной дуги и силой сварочного тока. Источник тока для ручной дуговой сварки должен обладать круто падающей внешней характеристикой (кривая 3). Если же сварка ведется в защитных средах с применением тонких электродных проволок, то в этом случае требуется источник тока с жесткими характеристиками (кривая 2).

В качестве источников сварочного тока могут применяться: а) источники постоянного тока - сварочные генераторы или полупроводниковые выпрямительные установки; б) источники переменного тока - сварочные трансформаторы.

Источники питания сварочной дуги должны удовлетворять следующим требованиям: 1) напряжение холостого хода, т.е. напряжение на зажимах источника питания при разомкнутой сварочной цепи, должно быть

достаточным для зажигания дуги, но не превышать безопасную для сварщика величину (60-65В); 2) мощность источника тока должна быть достаточной для питания дуги необходимым по силе сварочным током; 3) источники питания дуги должны иметь устройства для плавного регулирования тока в нужных для сварки пределах; 4) источники питания дуги должны иметь небольшой вес, размеры и стоимость.

Сварочные аппараты с дросселем (рис. 2а) состоят из понижающего трансформатора, и дросселя. Трансформатор имеет сердечник (магнитопровод) из штампованных пластин, изготовленных из тонкой трансформаторной стали толщиной 0,5 мм. На сердечнике расположены первичная и вторичная обмотка. Первичная обмотка подключается к сети переменного тока напряжением 220 или 380 В. Во второй обмотке индуцируется ток напряжением 60-70 В. Небольшое магнитное рассеивание и малое омическое сопротивление обмоток обеспечивают незначительное внутреннее падение напряжения и высокий к.п.д. трансформатора. Последовательно вторичной обмотке сварочную цепь включена обмотка дросселя. Сердечник дросселя набран из пластин тонкой трансформаторной стали и состоит из двух частей: неподвижной на которой расположена обмотка дросселя и подвижной, перемещаемая с помощью винтового приспособления. Дроссель предназначен для регулирования величины сварочного тока и создания подающей внешней характеристики трансформатора на дуге. Изменяя величину зазора между неподвижным и подвижным магнитопроводом, изменяют индуктивное сопротивление дросселя и тем самым величину тока в сварочной цепи. При увеличении зазора магнитное сопротивление магнитопровода дросселя увеличивается, магнитный поток ослабляется, уменьшается э.д.с. самоиндукции катушки и ее индуктивное сопротивление. Это приводит к возрастанию сварочного тока. При уменьшении воздушного зазора величина сварочного тока уменьшается. По этой схеме изготовлены сварочные трансформаторы типа СТЭ.

Сварочные аппараты со встроенным дросселем (рисунок 2б) имеют электромагнитную схему, разработанную академиком Б.П. Никитиным. Магнитопровод трансформатора состоит из основного сердечника, на котором расположены первичная и вторичная обмотки собственно трансформатора и добавочного сердечника с обмоткой дросселя (редуктор тока). Добавочный магнитопровод расположен над основным и состоит из неподвижной и подвижной частей, между которыми при помощи винтового механизма устанавливается необходимый воздушный зазор. Регулирование величины сварочного тока производится изменением воздушного зазора: чем больше зазор, тем больше сила сварочного тока.

Сварочные аппараты с увеличенным магнитным рассеянием и подвижной обмоткой (рисунок 3) без дросселя. Трансформатор имеет магнитопровод в виде стержней, на которых расположены по две катушки: одна с первичной обмоткой, а вторая с вторичной обмоткой. Катушки обмоток соединены параллельно. Первичная обмотка закреплена неподвижно. Катушки вторичной обмотки перемещаются винтовым механизмом вручную. Регулирование сварочного тока осуществляется путем изменения расстояния между катушками первичной и вторичной обмоток трансформатора. Чем меньше расстояние между катушками обмоток, тем сварочный ток больше. По этому принципу изготовлены трансформаторы типа ТС и ТСК, ТСП.

Сварочные преобразователи типа ПСО и АСО состоят из смонтированных в общем корпусе асинхронного двигателя и однопостового сварочного генератора типа ГСО с независимым возбуждением и последовательной размагничивающей обмоткой. Эти генераторы (рисунок 4) имеют две обмотки возбуждения. Обмотка независимого возбуждения (ОНВ) получает питание от отдельного источника переменного тока через полупроводниковый выпрямитель, а последовательная размагничивающая обмотка (ОВП) включена последовательно с обмоткой якоря генератора.

Сила тока в цепи независимого возбуждения регулируется реостатом. Генератор работает следующим образом. Магнитный поток, создаваемый обмоткой ОНВ противоположен по направлению магнитному потоку создаваемому обмотками (ОПВ). На холостом ходу, когда сварочного тока нет и размагничивающая обмотка (ОПВ) не действует, ЭДС генератора создается только магнитным потоком первичной цепи (ОНВ). При замыкании цепи сварочный ток начинает создавать магнитный поток, направленный навстречу потоку первичной цепи. Результирующий магнитный поток генератора равен разности потоков, благодаря этому с увеличением сварочного тока результирующий магнитный поток, ЭДС и напряжение генератора будут падать. Таким образом, данные генераторы имеют падающую внешнюю характеристику. Силу сварочного тока генератора можно регулировать не только реостатом (плавная регулировка), но и переключением числа витков обмотки (ОВП) (грубая регулировка).

В качестве источников постоянного сварочного тока применяют сварочные выпрямители с селеновыми, кремниевыми или германиевыми полупроводниковыми выпрямительными элементами. Сварочные выпрямители состоят из понижающего трансформатора и блока выпрямительных элементов. Преимущество выпрямителей перед обычными сварочными преобразователями заключается в том, что здесь отсутствуют вращающиеся части, меньше вес, размер и стоимость, высокий КПД и, кроме того, простое обслуживание. К их достоинствам следует отнести малые потери на холостой ход, лучшие сварочные качества, меньший шум при работе.

В промышленности, строительстве и ремонтном производстве наибольшее распространение получила электродуговая сварка плавящимся электродом на постоянном и переменном токе.

Сварочная дуга представляет собой мощный электрический разряд сильно ионизированной газовой среде. Температура в осевой части дуги 6000-7000 °С.

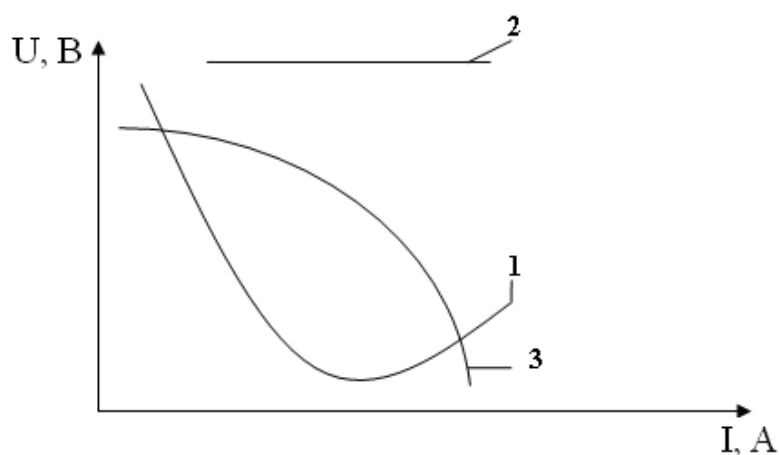


Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика

На рисунке 1 кривая представлена опытная электрическая характеристика сварочной дуги (зависимость падения напряжения на столбе дуги от силы тока) при постоянной длине дуги. Изменения силы тока при построении такой опытной характеристики достигается специальными регуляторами, имеющимися у источников тока питающих сварочную дугу. Характеристика дуги показывает, что с увеличением силы тока падение напряжения на столбе дуги быстро уменьшается до определенного значения, что можно объяснить уменьшением электрического сопротивления дуги в виду повышения ионизированности и температуры в зоне дуги при увеличении силы тока. Для получения высококачественного сварного соединения необходимо иметь устойчивое горение дуги и не допускать её прерывистости. Средняя длина дуги при сварке составляет 3-4 мм. При короткой дуге происходит меньшее насыщение расплавленного металла азотом и кислородом воздуха, что снижает прочность сварного шва.

Использование постоянного тока обеспечивает более устойчивое горение дуги и лучшее качество сварки и, однако источники постоянного тока (генераторы и выпрямители) отличаются большей сложностью и стоимостью.

При сварке на переменном токе применяются сварочные трансформаторы понижающие напряжения сети с 220/380 В до 45 - 90 В. Меньшая устойчивость горения дуги при сварке на переменном токе объясняется тем, что дуга периодически гаснет (сто раз в сек. При частоте = 50 Гц) и зажигается вновь. Повышение устойчивости горения дуги достигается также применением обмазки электродов. Компоненты обмазки (мел, жидкое стекло, порошки марганцовых, титановых, других руд и ферросплавов, крахмала и др.) способствуют интенсивной ионизации дугового столба и повышению качества металла шва.

Обычные источники электрического тока, применяемые для освещения питания электрических двигателей и др. цели имеют так называемую жесткую характеристику – кривая 2, которая обеспечивает относительное постоянство напряжения при увеличении тока, что является одним из основных требований, предъявляемых к таким источникам. Однако для питания сварочной дуги необходимы специальные источники с падающей характеристикой – кривая 3 более соответствующей характеристике дуги (полного соответствия добиться технически сложно).

## 2. Оборудование для дуговой сварки

На рис.2 и 3 показаны две наиболее распространенные схемы сварочных трансформаторов.

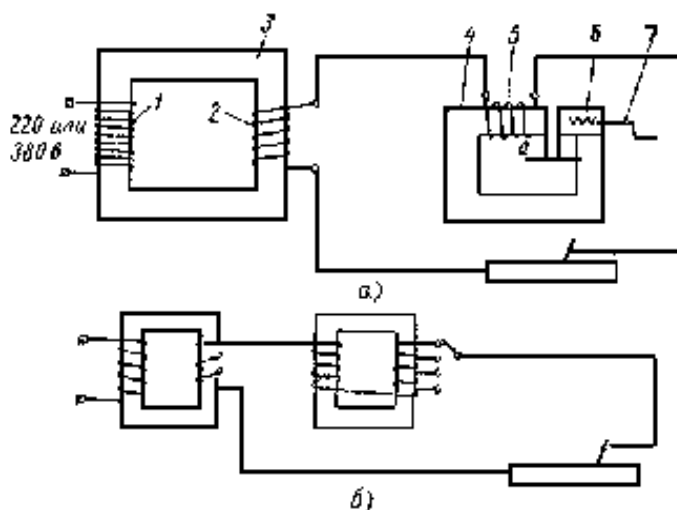


Рисунок 2а - Принципиальная электрическая схема сварочных трансформаторов с отдельными дросселями: а) сварочный ток регулируется изменением воздушного зазора, б) ступенчато передвигающимся контактом: 1 – первичная обмотка, 2 – вторичная обмотка, 3 – магнитопровод, 4 – дроссель, 5 – витки медного провода, 6 – подвижная часть магнитопровода, 7 – винт с рукояткой

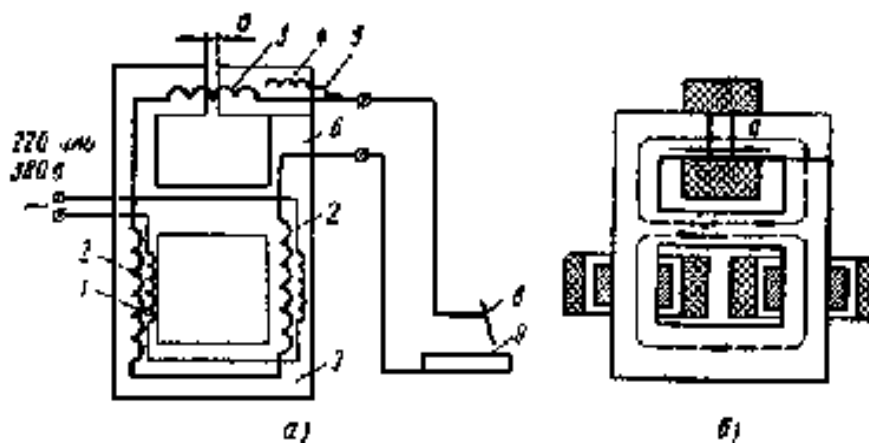


Рисунок 2б - Принципиальная электрическая и конструктивная схема трансформатора типа СТН в однокорпусном исполнении (а) и его магнитная система (б): 1 – первичная обмотка, 2 – вторичная обмотка, 3 – реактивная обмотка, 4 – подвижный пакет магнитопровода, 5 – винтовой механизм с рукояткой, 6 – магнитопровод регулятора, 7 – магнитопровод трансформатора, 8 – электрододержатель, 9 – свариваемое изделие

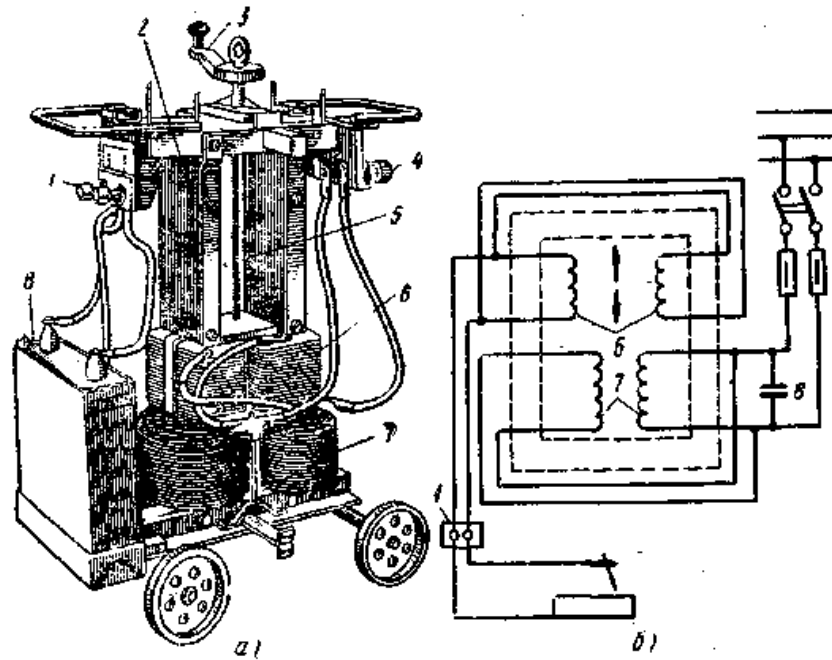


Рисунок 3 - Трансформатор с подвижными обмотками с увеличенным магнитным рассеиванием: 1 – сетевые клеммы, 2 – сердечник, 3 – рукоятка для регулирования, 4 – клеммы для сварочных проводов, 5 – винт для регулировки тока, 6 – вторичная обмотка, 7 – первичная обмотка, 8 – конденсатор

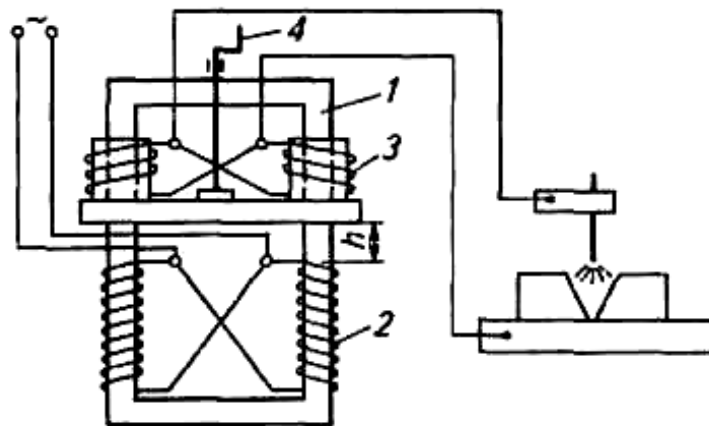


Рисунок 4 - Схема сварочного трансформатора ТД-300: 1 – сердечник (стержневой магнитопровод); 2 – первичная обмотка; 3 – вторичная обмотка; 4 – ходовой винт

Регулирование тока и падающая характеристика в первом случае рис.2а (а) достигается применением дополнительного регулятора – дросселя,



который представляет собой катушку индуктивности, индуктивное сопротивление которой, изменяется за счет перемещения подвижного стержня, изменяющего величину воздушного зазора. На схеме 2а (б) дроссель конструктивно объединен с сердечником трансформатора, во втором случае, (рисунок 4) изменение расстояния между 1-й (неподвижной) и второй (подвижной) обмотками изменяет индуктивность рассеивания, обеспечивая изменения сварочного тока. Такие особенности конструкции сварочных трансформаторов обеспечивают большое напряжение холостого хода, превышающее в 2,5-3 раза напряжение дуги, что является совершенно необходимым условием для получения падающей характеристики.

Падающая характеристика обеспечивается магнитным потоком, возникающим во вторичной обмотке в процессе сварки и противодействующим основному потоку, который создается первичной обмоткой.

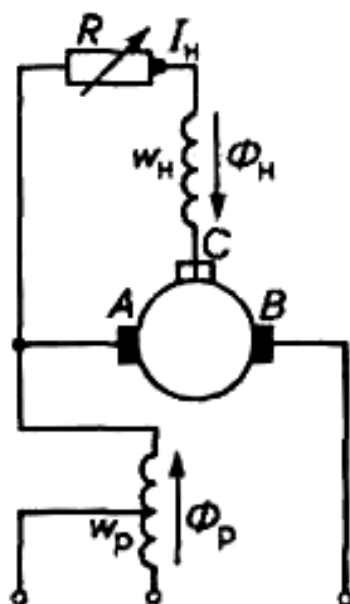


Рисунок 5 - Принципиальная электрическая схема сварочного генератора ГСО-300 с самовозбуждением и последовательной размагничивающей обмоткой

На рисунке 5 показана схема сварочного генератора, который в принципе является обычным электрогенератором со смешанным

возбуждением. Регулирование силы тока в нем достигается реостатом включенным последовательно в независимую обмотку возбуждения питающуюся от специального выпрямителя небольшой мощности.

Падающая характеристика сварочного генератора создается за счет размагничивающего действия дополнительной обмотки возбуждения, включенной последовательно в цепь якоря питающего сварочную дугу. Магнитный поток этой обмотки направлен встречно магнитному потоку основной обмотки.

При увеличении силы сварочного тока размагничивающее действие дополнительной обмотки увеличивается и напряжение генератора снижается (пример использования принципа отрицательной обратной связи).

Вращение сварочного генератора осуществляется от двигателя внутреннего сгорания (передвижные сварочные посты для ремонта в полевых условиях) или от электрического мотора соединенного обычно в одном агрегате – сварочном преобразователе (используется в основном стационарно в условиях ремонтных мастерских и цехов).

#### Техника ручной электродуговой сварки

Сварочный пост должен иметь следующее оснащение:

- 1) распределительный щит со стандартной пусковой и защитной аппаратурой в ответственных случаях имеется контрольно-измерительная (вольтметр, амперметр) и сигнальная аппаратура;
- 2) рабочий стол;
- 3) кабина или ширма защитного ограждения;
- 4) электрододержатель с гибким кабелем;
- 5) сварочное приспособление (зажимы, кондукторы);
- 6) молоток и щётка;
- 7) гибкий кабель массы с зажимом (при сварке отдельных крупногабаритных конструкций).

Сварщик должен быть обеспечен брезентовой спецодеждой, щитком со специальным темным светофильтром и рукавицами.

Основной параметр режима электродуговой сварки – сила тока зависит от толщины свариваемых деталей и диаметра электрода (чем больше толщина и диаметр, тем больше ток). Установленная с помощью рукоятки регулятора ориентировочная сила тока корректируется в дальнейшем в ходе процесса сварки. Сила сварочного тока  $I_{св}$  для ручной электродуговой сварки стали в нижнем положении ориентировочно определяется по формуле академика К.К. Хренова  $I_{св} = (20 + 6d_э) d_э$ , где  $d_э$  – диаметр металлического электрода, мм.

Для зажигания дуги производят касание (замыкание) электрода в месте предполагаемой сварки и последующий быстрый отвод электрода на 3-5 мм.

Сварка вертикальных швов выполняется короткой дугой с целью облегчения перехода металла электрода на основной металл. Удобнее и проще производить сварку снизу вверх, при этом на наплавленный металл откладываются последующие слои металла при движении электрода вверх.

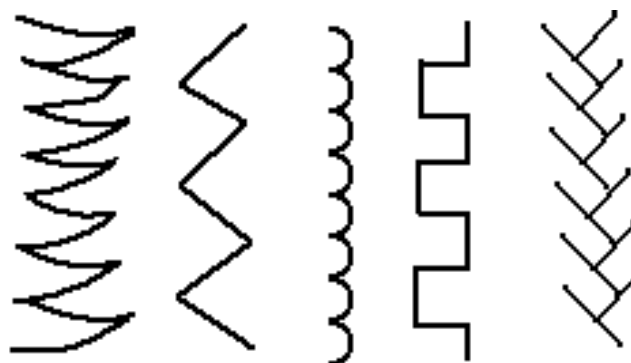


Рисунок 6 – Траектории движения конца электрода

При сварке на постоянном токе применяют прямую (плюсы источника на изделии) и обратную полярность (минус источника на изделии). Обратная полярность (минус источника на изделии). Обратная полярность характеризуется меньшим выделением тепла на детали и применяются для сварки тонких листов чугуна, а также в случае, применения электродов с толстой обмазкой.

**Электродами** называют металлические или угольные стержни, предназначенные для дуговой сварки и резки металлов. Электроды должны

обеспечивать: стабильность электрической дуги; хорошее формирование сварочного шва; получение сварочного шва заданного химического состава; хорошую отделимость шлака; высокую производительность сварки; минимальную токсичность при сварке; возможность сварки в любом пространственном положении. Электродные стержни изготавливают из электродной проволоки диаметром от 1,6 до 12 мм, длиной 350-450 мм согласно ГОСТ 2246-70 марок Св-08А, Св-08ГА и т.д.

На электродный стержень можно наносить тонкое (0,1-0,3 мм на сторону) или толстое (0,5-3,0 мм на сторону) покрытия. Электроды с тонкими покрытиями применяются при сварке неответственных изделий. Покрытия в этих электродах обеспечивают лишь ионизирующее действие при сварке и незначительно предохраняют жидкий металл от окисления, электроды с толстым покрытием изготавливают на специальных установках методом опрессовывания. В состав толстых покрытий входят следующие составляющие: шлакообразующие (титановый концентрат, марганцевые руды, полевой шпат, каолин, мел и др.); газообразующие (древесная мука, декстрин) раскисляющие (ферротитан, алюминий и др.); легирующие (феррохром, ферротитан, феррованадий, ферровольфрам); стабилизирующие (соединения калия, натрия, кальция); связующие (жидкое стекло).

По покрытию присваивают электроду марку (промышленное обозначение): УОНИ-13, АН-1, АМО-1, ОМА-2 и т.д. В зависимости от составляющих покрытия электроды подразделяются на руднокислые (Mn, SiO<sub>2</sub>, FeO), фтористо-кальциевые (CaF<sub>2</sub>, CaCO<sub>2</sub>), рутиловые (TiO<sub>2</sub>) органические (крахмал, мука).

Электроды с руднокислым покрытием (АН-1; УНЛ-1) дают возможность производить сварку в любом пространственном положении шва, с ржавыми кромками и окалиной, переменным и постоянным током. Недостатками этих электродов являются повышенное разбрызгивание металла и выделение соединений, вредно влияющих на организм человека.

Для сварки стали с повышенным содержанием углерода, эти электроды не применяются.

Электроды с фтористо-кальциевым покрытием (УОНИ-13, СМ-11) преимущественно применяют при сварке постоянным током обратной полярности во всех пространственных положениях. Они чувствительны к ржавчине, маслу, влаге и удлинению дуги. Электроды с рутиловым покрытием (АНО-5, МР-3, ОЗС-4) дают устойчивое горение дуги, хорошее формирование шва, небольшое разбрызгивание и используются при сварке постоянным и переменным током в любом пространственном положении, не боятся ржавых кромок.

Электроды с органическим покрытием (ОМА-2, ВСП-1) способствуют уменьшению разбрызгивания металла, дают малое количество шлака и пригодны для сварки во всех пространственных положениях шва как переменным, так и постоянным током. Металлический стержень и покрытие в совокупности образуют соответствующий тип электрода (Э42, Э50, Э55 и др.).

Таблица 1 – Технические данные трансформаторов для ручной сварки

Показатели	Марка трансформатора							
	ТСП-2	ТСМ-250	СТН-350	ТС-300	СТ-500	ТД-300	ТД-500	СТШ-500
Номинальный сварочный ток при ПР-65%	300 (при ПР-20%)	250	350 (при ПР-50%)	300	500	300	500	500
Номинальное напряжение	30	25-30	30	30	30	30	30	40
Номинальная мощность	12	10	25	20	32	19	32	33
Напряжение холостого хода	62	60	70	63	60	60 и 79	60 и 76	66 и 71
Пределы регулирования сварочного типа, А	1 ст. 140-300 2 ст. 90-140	92-250	80-450	Основной диапазон 10-385 Вспомогат. диапазон 30-100	165-650	160-385	240-650	47-560
Напряжение сети, В	220-280	380	220-380	220-380	220-380	220-380	220-380	220-380
Коэффициент полезного действия	-	-	0,83	0,84	0,85	0,85	0,85	0,90
Коэффициент мощности	0,6	-	0,5	0,51	0,53	0,54	0,54	0,53
Вес, кг	65	38	220	180	250	137	210	170

### Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с техникой безопасности при электродуговой сварке.

2. Изучить оборудование, приборы и приспособления для дуговой сварки.

3. Приобрести практические навыки зажигания и поддержания дуги с различными положениями сварного шва при сварке стыкового соединения пластин из стали.

4. Определить влияние силы сварочного тока на качество шва при сварке стали различной толщины в такой последовательности:

а) определить силу сварочного тока для сварки стальных пластин электродом диаметром  $d_э = 3$  мм;

б) очистить металлической щеткой пластины из стали Ст.3 толщиной 1,3 и 6 мм и собрать под прихватку;

в) прихватить и сварить пластины толщиной 1,3, 6 мм в один проход;

г) удалить со швов шлак (после полного остывания) и визуально оценить качество швов, полученных на пластинах различной толщины, измерить ширину шва;

д) сломать по шву сваренные пластины, измерить высоту усиления и глубину провара шва;

е) визуально оценить по ширине шва и излома его качества.

#### **Содержание отчета.**

В отчет необходимо включить схему сварочного поста; схему сварочного преобразователя ПС-500; схему сварочного трансформатора ТД-300 (ТД-500); расчеты диаметра электрода и силы сварочного тока на качество шва в зависимости от толщины свариваемых пластин.

#### **Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №1**

1. Что называется сваркой?
2. Кто является основоположником явления электрической дуги?
3. Каким требованиям должны удовлетворять источники питания сварочной дуги?

4. Какие существуют источники питания сварочной дуги? Дайте их характеристику.
5. Какова температура в осевой части электрической дуги?
6. Какие марки электродов используются для электродуговой сварки?
7. От чего зависит выбор диаметра электрода? Электроды каких диаметров используются для ручной электродуговой сварки?

## ***Лабораторная работа 2***

### **Изучение оборудования для газовой сварки**

**Цели работы:** изучить оборудование и аппаратуру для газовой сварки; научиться выбирать соответствующий наконечник горелки, обеспечивающий оптимальный расход ацетилена.

**Теоретические сведения.** Газовая сварка является одним из способов сварки плавлением. Сущность этого способа заключается в том, что для нагревания и плавления свариваемых кромок изделия и присадочного материала используется пламя, получающееся при сжигании горючего газа в смеси с кислородом.

Для производства работ по газовой сварке и резке сварочные посты должны иметь следующее оборудование и инвентарь: ацетиленовый генератор или баллон с горючим газом; кислородный баллон; редукторы (кислородный и для горючего газа) для понижения давления газа, выходящего из баллона и подаваемого в сварочную горелку или резак; сварочную горелку и резак с набором сменных наконечников; шланги для подачи горючего газа и кислорода в горелку или резак; сварочный стол; приспособления, необходимые для сборки изделий под сварку; комплект инструментов сварщика, очки с защитными стеклами; спецодежду сварщика.

В качестве горючих газов при газовой сварке и резке используются ацетилен, водород, природный газ, пары бензина и керосина и т.п. (таблица 1).

Таблица 1 - Горючие газы, используемые при газосварочных работах

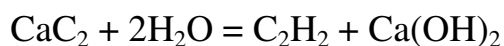
Горючие материалы	Температура пламени, °С	Способ подачи	Область применения
Ацетилен	3100-3150	По шлангам и трубопроводам из генераторов или баллонов	Все случаи сварки, резки и нагрева металлов
Водород	2100	-/-/-	Резка, пайка, сварка свинца и алюминия
Природный газ	2000-2100	В баллонах или по трубопроводу	-/-/-
Керосин	2450-2500	Из бачка под давлением до 3 кг/см <sup>2</sup>	Резка, пайка, закалка

Широкое применение в газовой сварке получил газ ацетилен. *Ацетилен* ( $C_2H_2$ ) является химическим соединением углерода и водорода. Технический ацетилен при нормальном давлении и температуре представляет собой бесцветный горючий газ с резким запахом из-за содержания в нем примесей сернистого водорода, фосфорного водорода, аммиака. Длительное вдыхание его вызывает тошноту, головокружение и даже отравление. При взаимодействии ацетилена с медью и серебром образуются взрывоопасные смеси. В связи с этим в аппаратуре для получения ацетилена запрещается применение серебряных припоев и сплавов, содержащих более 70% меди. В определенных соотношениях смесь ацетилена с воздухом взрывоопасна даже при атмосферном давлении (если в смеси содержится 2,2-81% ацетилена по объему). Смесь ацетилена с чистым кислородом взрывоопасна при атмосферном давлении и содержания в нем 2,8-93% ацетилена по объему. Технический ацетилен получают двумя способами:

1) из карбида кальция действием на него водой в специальных ацетиленовых генераторах. Технический карбид кальция ( $CaC_2$ ) представляет



собой твердое кристаллическое вещество темно-серого или темно-коричневого цвета, получаемое в электродуговых печах сплавлением негашеной извести с коксом или антрацитом. Хранение и транспортировка его производится в герметически закрытых железных барабанах. При взаимодействии с водой карбид кальция разлагается с образованием ацетилена и гашеной извести.



Для получения 1 м<sup>3</sup> ацетилена расходуется 4,3 - 4,5 кг технического карбида кальция;

2) из углеродных продуктов, содержащихся в природных газах, нефти, газах от переработки угля и торфосланцев, путем крекингования.

Первый способ имеет большее применение, однако все шире внедряется в промышленность и второй способ.

Ввиду крайне высокой взрывчатости в технике применяется растворенный ацетилен. Это ацетилен, находящийся в баллоне, заполненном пористой массой, пропитанной растворителем-ацетоном. В парах пористой массы ацетилен растворен в ацетоне. При открывании вентиля баллона ацетилен выделяется из ацетона в виде газа.

**Водород** (H<sub>2</sub>) – газ без цвета и запаха. В смеси с кислородом образует взрывчатую смесь, называемую гремучим газом. Получают водород электролизом воды; методом глубокого охлаждения газов смесей, содержащих водород; разложение водяного пара при пропускании его через слой раскаленного железа и другими способами. Температура сжижения водорода - 253°С. При сгорании водорода пламя не светится и его зоны не имеют четких границ. Хранят и транспортируют водород в стальных баллонах под давлением 150 кгс/см<sup>2</sup>. При работе с водородом особое внимание надо обращать на герметичность аппаратуры и газовых коммуникаций, т.к. он способен проникать через мельчайшие неплотности,

что может привести к образованию взрывоопасных концентраций его с воздухом.

**Природные газы** - это газы без цвета с легким чесночным запахом, получаемые из газовых месторождений. Они состоят в основном из метана ( $\text{CH}_4$ ) с примесью этана, пропана, бутана и азота. К месту потребления доставляются по трубопроводам, реже в баллонах. Температура сжижения около  $-158^\circ\text{C}$ .

**Бензин и керосин** - легкоиспаряющиеся прозрачные жидкости, получающиеся при переработке нефти. При газовой сварке они применяются в виде паров. С этой целью горелки снабжают специальными испарителями или распылителями. Жидкое горючее подается в горелку из специальных бачков с насосом, содержащим давление в бачке до  $3 \text{ кгс/см}^2$ . Пары бензина ядовиты и при продолжительном вдыхании могут вызвать головную боль и головокружение. Поэтому чаще применяют керосин вместо бензина. Водород, природный газ, пары бензина и керосина непригодны для обычной сварки стали вследствие недостаточной температуры сварочного пламени ( $1900^\circ\text{C}$ - $2300^\circ\text{C}$ ). Их применяют для сварки металлов, имеющих низкую температуру плавления и резки металлов.

**Ацетиленовые генераторы** - аппараты, предназначенные для производства ацетилена из карбида кальция. В зависимости от давления вырабатываемого ацетилена генераторы делятся на 2 группы:

низкого давления - до  $1 \text{ кгс/см}^2$ ;

среднего давления - от  $1 \text{ кгс/см}^2$  -  $15 \text{ кгс/см}^2$ .

Устройство и работа генератора будет описана далее.

**Баллоны** для сжатых газов представляют собой цилиндрические стальные сосуды с выпуклым днищем внизу и узкой горловиной вверху. В горловине имеется конусное отверстие с резьбой, куда ввертывается запорный вентиль. При температуре, примерно равной  $-183^\circ\text{C}$  и нормальном

давлении кислород превращается в жидкость голубого цвета. Один литр жидкого кислорода весит 1146 г и содержит 860 л газа, отнесенного к нормальным условиям. Для промышленных целей кислород получают из воздуха методом глубокого охлаждения. Полученный жидкий кислород испаряют и в газообразном состоянии нагнетают в стальные баллоны до давления 150 кг/см<sup>2</sup> (рисунок 1).

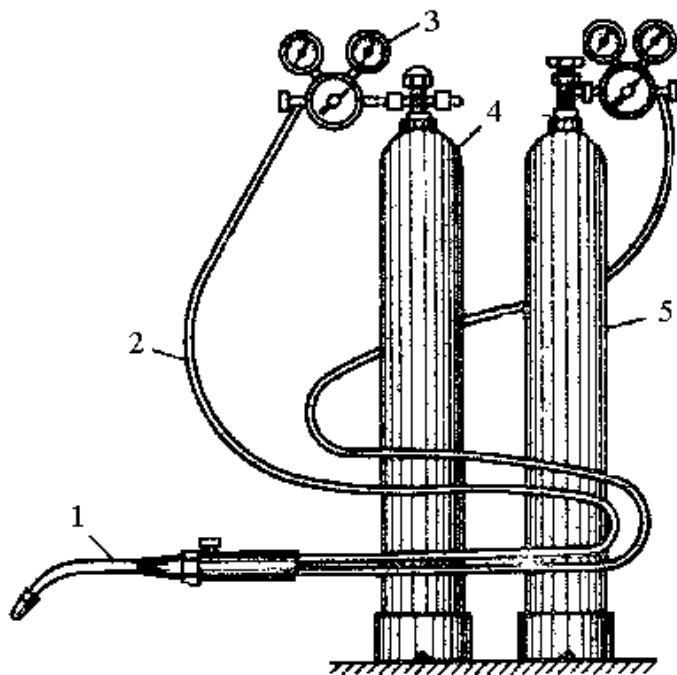


Рисунок 1 - Схема газосварочного поста с питанием от баллонов: 1 - сварочная горелка; 2 - гибкий шланг; 3 - редуктор; 4 - баллон с ацетиленом; 5 - баллон с кислородом

Баллоны подлежат испытанию через каждые 5 лет на пробное давление 220 кг/см<sup>2</sup>. Некоторые данные о баллонах приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика горючих газов, используемых при газосварочных работах

Газ	При температуре 20 °С		Цвет окраски	Текст надписи	Цвет надписи
	состояние газа в баллоне	предельное давление кгс/см <sup>2</sup>			

Азот	сжатый	150	черный	Азот	Желтый
Ацетилен	растворенный	15-16	белый	Ацетилен	Красный
Аргон чистый	сжатый	150	серый	Аргон чистый	Зеленый
Водород	сжатый	150	темно-зеленый	Водород	Красный
Кислород	сжатый	150	голубой	Кислород	Черный
Пропан	сжиженный	16	красный	Пропан	Белый
Углекислый	сжиженный	125	черный	СО <sub>2</sub> свароч.	Желтый

Газовую сварку наиболее часто осуществляют кислородно-ацетиленовым пламенем. Ацетилен получают в специальных генераторах или поставляют в баллонах под давлением. Кислород также поставляется в баллонах. В случае использования баллонов с кислородом или ацетиленом для снижения и поддержания постоянного давления применяют специальные редукторы.

В настоящее время в широкой эксплуатации находится генератор АНВ-1,25 (рисунок 2). Этот генератор работает по принципу «вода на карбид» в сочетании с принципом её вытеснения. Корпус 14 разделен перегородкой 13 на две части. В верхней части расположен водосборник 16, в нижней газосборник 12. Обе части соединены циркуляционной трубкой, через которую вода попадает в нижнюю часть, или наоборот, вытесняется в верхнюю при работе генератора. В нижней части газосборника вварена реторта 8. Перед работой генератор заливают водой до шайбы 3, устанавливают корзину 6 с карбидом кальция в реторту и закрывают ее крышкой 7. При открывании крана 4 вода через трубу 5 попадает в реторту 8, заполняет ее, смачивает карбид кальция и в результате образуется ацетилен. Ацетилен по трубе 5 поступает в газосборник 12, а затем через осушитель, водяной затвор и шланг в горелку. Подача воды прекращается, как только ее уровень опускается ниже крана 4.

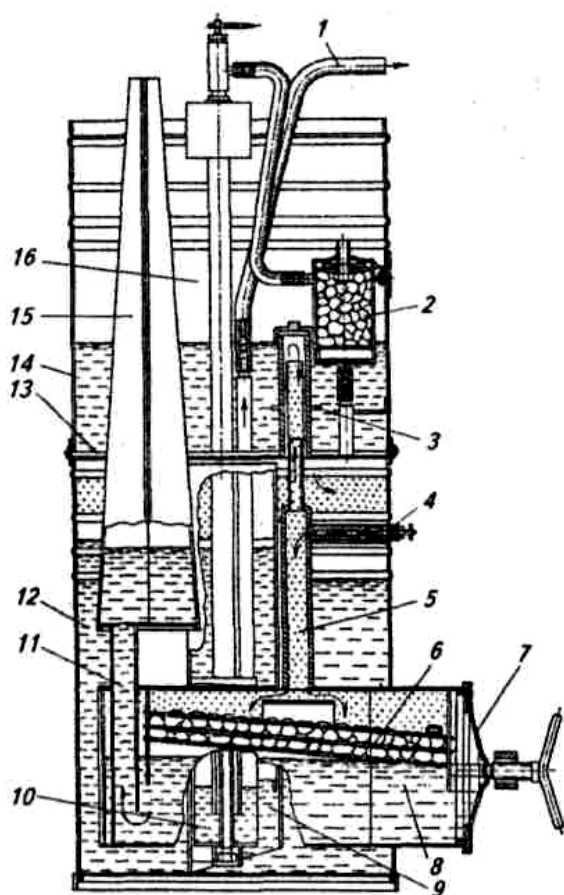


Рисунок 2 - Генератор АНВ-1,25

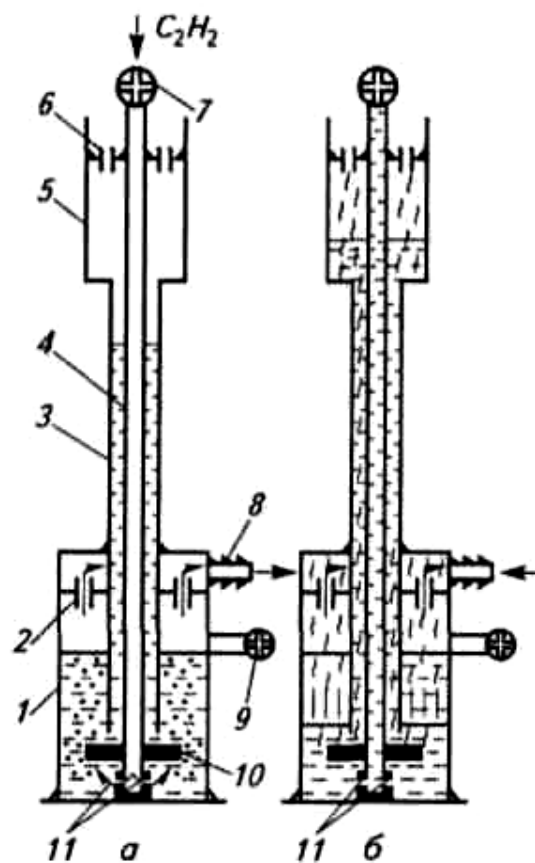


Рисунок 3 – Водяной затвор

Для замедления нарастания давления в генераторе часть воды из реторты 8 вытесняется ацетиленом через трубу 11 в вытеснитель 15. По мере расходования ацетилена давление снижается и вода, поднимаясь до уровня крана 4, вновь поступает в реторту 8 и возобновляется образование ацетилена. Так, в зависимости от расхода ацетилена из генератора автоматически регулируется процесс образования ацетилена.

Для предохранения генератора от проникновения в него пламени (обратный удар) применяют водяные затворы. На рисунке 3 представлены схемы жидкостного водяного затвора низкого давления. Затвор состоит из корпуса 1, водоналивной трубы 7, газоподводящей трубы 4 и воронки 5. При нормальной работе затвора (рисунок 3 а) ацетилен через кран 7 поступает по газоподводящей трубе 4, через отверстие 11 в корпус 1, заполненный водой до пробки 9, и пройдя через воду, сетку 2 и ниппель 8 проходит в шланг к

горелке или резаку. Диск 10 имеет диаметр больше чем водоналивная труба, и тем самым предохраняет выход ацетилена через нее в атмосферу.

При обратном ударе газы пламени вытесняют воду из корпуса затвора в газопроводящую трубу и водоналивную воронку. При этом пламя отсекается от проникновения в генератор и его газы, пройдя воду, водоналивную трубу и воронку, охлаждаются и выбрасываются в атмосферу (рисунок 3 б).

Кислород хранится в баллонах голубого цвета, вместимостью 40 л. под давлением 15 МПа (150 кгс/см<sup>2</sup>). При таком давлении баллон содержит 40 л. кислорода.

Для получения постоянного рабочего давления кислорода высокое давление снижают посредством редуктора (рисунок 4). При закручивании винта 7 пружина 6 давит на резиноканевую мембрану 5, штифт 8, клапан 3 и пружину 2, отверстие 9 открывается и кислород из баллона поступает в камеру высокого давления 1, переходит через клапан 3 в камеру низкого давления 4 и затем проходит в горелку. Создавая в камере 4 определенную величину давления (зависящую от степени закручивания винта 7 и сжатия пружины 6) кислород давит на мембрану 5 и преодолевая усилия пружины 6 поднимает штифт 8. Клапан 3 закрывается.

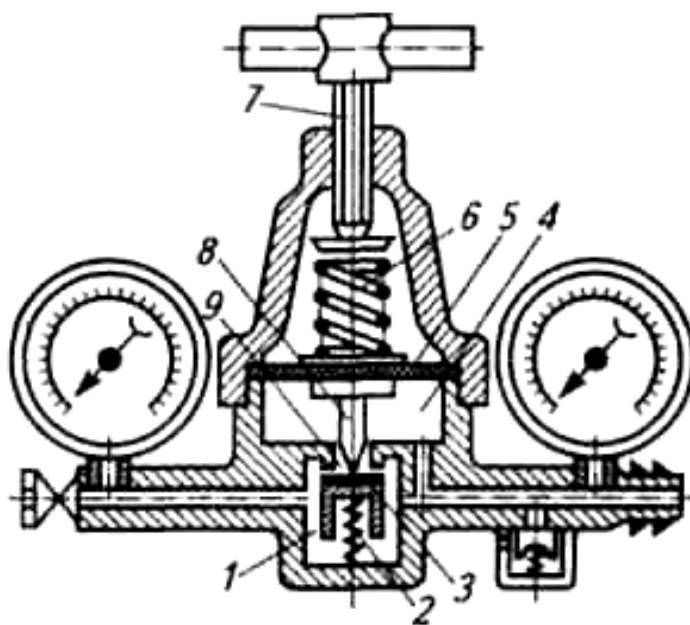


Рисунок 4 – Редуктор в сборе

С увеличением расхода кислорода давление в камере низкого давления снижается и мембрана под действием пружины 6 приоткрывает больше клапан 3, кислород поступает в камеру в большем количестве и рабочее давление восстанавливается, с уменьшением расхода кислорода работа редуктора происходит в обратном порядке.

Сжигание газа происходит в сварочных горелках. Наиболее распространены инжекторные горелки (рисунок 5), работающие на ацетилене низкого давления. Кислород под давлением через вентиль 1 по каналу 2 поступает в инжектор 5. При выходе кислорода из инжектора с большей скоростью в кольцевом зазоре инжектора создается разрежение и ацетилен, поступающий через вентиль 7 от баллона или генератора, под меньшим давлением подсасывается через каналы 6 в смесительную камеру, где с кислородом образует горючую смесь. Горючая смесь проходит через наконечник 3 в мундштук 4 и при выходе из него загорается. Во избежание горения смеси внутри наконечника (обратный удар) скорость истечения газовой смеси должна быть больше скорости ее горения (распространения пламени).

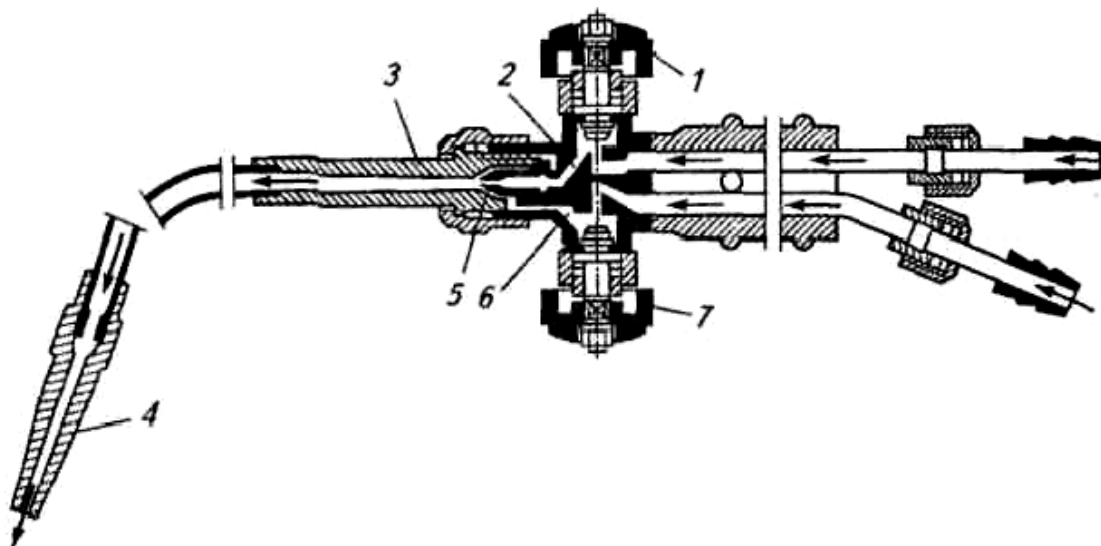


Рисунок 5 – Инжекторная горелка

Скорость истечения зависит от отверстия мундштука, а скорость горения от состава смеси (соотношения  $O_2$  и  $C_2H_2$ ).

В таблице 1 приведены основные параметры наиболее часто используемых горелок.

Таблица 1 - Параметры горелок «Москва», «Звезда», ГС-3

	Номер наконечника						
	1	2	3	4	5	6	7
Толщина свариваемой низкоуглеродистой стали, мм	0,5-1,5	1,0-2,5	2,5-4	4-7	7-11	10-18	17-30
Расход кислорода, л/ч	50-125	120-240	230-430	400-700	630-1100	1030-1750	1700-2800
Расход ацетилена, л/ч	55-135	130-260	250-440	430-750	740-1200	1150-1950	1900-3100
Давление на входе в горелку кислорода, кПа (кгс/см <sup>2</sup> )	100-900 (1-4)	150-400 (1,5-4)	200-400 (2-4)	200-400 (2-4)	200-400 (2-4)	200-400 (2-4)	200-400 (2-4)
Давление на входе в горелку ацетилена, кПа (кгс/см <sup>2</sup> )	Не ниже 1 (0,01)						10 (0,1)

**Шланги** служат для подвода газа к горелке или резаку. Они должны обладать достаточной прочностью, быть гибкими и не стеснять движений сварщика. Изготавливают их из вулканизированной резины с одной или двумя прокладками из льняной или бумажной ткани.

В зависимости от назначения шланги изготавливают трех типов:

- для ацетилена и пропана на рабочее давление не более 6 кгс/см<sup>2</sup>;
- для жидкого топлива (бензин, керосин) на рабочее давление не более 6 кгс/см<sup>2</sup> (изготавливают из бензостойкой резины);
- для кислорода на рабочее давление не более 15 кгс/см<sup>2</sup>.

Все шланги должны иметь цветной наружный слой; для кислорода - синий, ацетилена - красный, жидкого топлива - желтый. Чтобы сварщик мог свободно работать, длина каждого шланга берется от 8-20 м.

### **Порядок выполнения работы.**

1. Ознакомиться с техникой безопасности при газовой сварке.



2. Изучить оборудование, приборы и приспособления поста газовой кислородно-ацетиленовой сварки.

3. Приобрести практические навыки по газовой сварке стыкового соединения пластин из стали марки Ст.3, зажигания горелки и наложения сварного шва.

4. Для определения влияния мощности пламени на качество шва при сварке стали различной толщины необходимо:

а) определить мощность пламени, номер наконечника и диаметр присадочной проволоки для свариваемых пластин толщиной 3 мм;

б) очистить металлической щеткой пластины из стали марки Ст.3 толщиной 1,3 и 6 мм и собрать под прихватку;

в) попарно прихватить и сварить пластины толщиной 1,3, 6 мм в один проход левым способом;

г) визуально оценить качество швов, полученных на пластинах различной толщины, и измерить ширину шва;

д) сломать по шву сваренные пластины, измерить высоту усиления и глубину провара шва;

е) визуально оценить по ширине шва и излома его качества.

#### **Содержание отчета.**

В отчет необходимо включить схему газосварочного поста; водяного затвора, газового редуктора, инжекторной горелки; расчет мощности пламени в зависимости от толщины свариваемых пластин.

#### ***Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №2***

1. Что называется газовой сваркой?
2. Какое оборудование используется для газовой сварки?
3. Какие генераторы используются для газовой сварки?
4. Какие типы горелок используются при газовой сварке? В чем состоит отличие горелки от резака?

5. Какие горючие газы используются при газосварочных работах? Дать пояснение.

6. Чем отличаются кислородные и ацетиленовые баллоны?

7. Каким требованиям должны отвечать шланги, используемые при газосварочных работах, и в какой цвет они должны быть окрашены?

### ***Лабораторная работа 3***

#### **Изучение оборудования литейного производства**

**Цели работы:** изучить оборудование, литейную оснастку, составляющие литниковой системы, свойства формовочной и стержневой смеси; научиться по чертежу готовой детали разрабатывать чертёж отливки, модели, стержневого ящика и формы в сборе.

#### **Теоретические сведения.**

##### *1. Основные положения*

Сущность литейного производства заключается в получении отливок – литых металлических изделий путём заливки расплавленного металла в специальную литейную форму, в которой он, остывая, затвердевает и сохраняет её очертания.

##### *1.1. Литейная технологическая оснастка*

Для изготовления литейной формы применяют большое число различных приспособлений, которые называют литейной оснасткой. В её состав входят модели, подмодельные плиты, стержневые ящики, опоки и др.

**Модели** – приспособления, при помощи которых в формовочной смеси получают отпечатки полости, соответствующие наружной конфигурации отливки. Отверстия и полости внутри отливки, а также иные сложные

контуры образуют при помощи стержней, устанавливаемых в формы при их сборке.

Размеры модели делают больше, чем соответствующие размеры отливки, на величину линейной усадки сплава. Если отливки подвергаются механической обработке, то в соответствующих размерах модели учитывают размер припусков – слоя металла, удаляемого при механической обработке. Он зависит от размеров отливки и вида сплава. Припуск на верхние поверхности отливки должен быть больше, чем на нижние и боковые поверхности т.к. наверху скапливаются шлаки, частички формовочной смеси и газовые включения.

Отверстия небольших размеров, полученные литьем, трудно очистить от спёкшейся внутри стержневой смеси, которая отрицательно влияет на стойкость режущего инструмента при последующей механической обработке. Поэтому литьём следует выполнять отверстия, диаметр которых превышает 25 – 30 мм.

Чтобы легче удалить модель из формы, поверхности её расположенные параллельно направлению движения при извлечении из формы, выполняют с формовочными уклонами, зависящими от высоты отливки. Без уклонов при извлечении модели может быть разрушение формы и осыпание формовочной смеси.

Для получения в форме отпечатков знаковых частей стержней, которыми стержень крепится в форме, модель имеет знаки – выступающие части. Сопряжение стенок в отливках должны быть плавными, без острых углов. Скругление внутренних углов называется галтелью, наружных – закруглением.

Модели делают из древесины, металлических сплавов и пластмасс. Деревянные модели изготавливают из плотной хорошо просушенной

древесины (сосна, ясень, бук и др.). Для предотвращения коробления модель делают не из целого куска древесины, а склеивают из отдельных брусочков так, чтобы направление волокон было различным. Преимущество деревянных моделей – дешевизна, простота изготовления, небольшая масса; основной недостаток – недолговечность.

Металлические модели имеют значительно большую долговечность, высокую точность и чистую рабочую поверхность. Такие модели чаще всего делают из алюминиевых сплавов, которые имеют малую плотность, не окисляются, хорошо обрабатываются резанием.

Модели из пластмасс устойчивы к действию влаги, не подвергаются короблению, имеют небольшую массу. Перспективным является применение моделей из вспененного полистирола, газифицирующегося при заливке металла и их не надо вынимать из формы перед заливкой.

**Стержневые ящики** служат для изготовления стержней и должны обеспечивать равномерное уплотнение смеси и быстрое извлечение стержня. Как и модели, они имеют уклоны; при назначении размеров ящика учитывают усадку сплава и припуск на обработку. Стержневые ящики делают из тех же материалов, что и модели, а по конструкции разъёмными.

**Опоки** – прочные металлические рамы различной формы предназначены для изготовления литейных полуформ из формовочных смесей. Их изготавливают из серого чугуна, стали, алюминиевых сплавов и могут быть литыми, сварными или сборными из отдельных литых частей. Стенки опоки часто делают с отверстиями для уменьшения их массы, удаления газов из формы и для лучшего скрепления формовочной смеси с опокой. Соединяют опоки штырями и центрирующими отверстиями в приливах. Для скрепления опок применяют скобы или другие приспособления.

## 1.2 Формовочные и стержневые смеси

В литейном производстве наиболее распространено получение отливок в разовых формах, изготовленных из песчано-глинистых и других смесей. Разовая форма пригодна для получения только одной отливки. При выемке (выбивке) готовой детали форму разрушают.

Формовочные и стержневые смеси должны обладать определенными механическими, технологическими и теплофизическими свойствами, основными из которых являются: прочность, поверхностная прочность, пластичность, податливость, непригораемость, газопроницаемость и др.

**Прочность** – способность смеси обеспечивать сохранность формы (стержня) без разрушения при её изготовлении и использовании. Формы не должны разрушаться от толчков при сборке и транспортировке, выдерживать давление заливаемого металла.

**Поверхностная прочность (осыпаемость)** – сопротивление истирающему воздействию струи металла. Если она недостаточна, то происходит отделение частиц формовочной смеси, которые попадают в отливку.

**Пластичность** – способность смеси воспринимать очертания модели (стержневого ящика) и сохранять полученную форму.

**Податливость** – способность смеси сокращаться в объёме под действием усадки металла. При недостаточной податливости в отливке возникают напряжения, которые могут привести к образованию трещин.

**Непригораемость** – способность смеси выдерживать высокую температуру заливаемого сплава без оплавления и химического с ним взаимодействия. Плёнки пригара ухудшают качество поверхности и

затрудняют последующую обработку. При оплавлении смеси резко снижается её газопроницаемость.

**Газопроницаемость** – способность смеси пропускать газы через стенки формы вследствие пористости. В расплавленном металле всегда содержатся растворённые газы, выделяющиеся при его охлаждении и затвердевании. Большое количество водяных паров и газов выделяется также из самих формовочных материалов при их нагревании. При недостаточной газопроницаемости в теле отливки могут образоваться газовые пузыри – раковины.

Для приготовления формовочных и стержневых смесей используют как природные, так и искусственные материалы. Песок – основной исходный материал смесей. Наиболее часто применяют кварцевый песок, в основном состоящий из кремнезема, обладающего высокой прочностью, твёрдостью, огнеупорностью  $t_{пл} = 1713 \text{ }^\circ\text{C}$ . Мелкозернистые пески используют для мелкого литья, что обеспечивает получение гладкой поверхности отливок. Для крупных отливок применяют крупнозернистые пески, обеспечивающие более высокую газопроницаемость формовочной смеси.

Реже для формовочных смесей применяют цирконовый песок  $t_{пл} = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ , хромит (хромистый железняк)  $t_{пл} = 1850 \text{ }^\circ\text{C}$  и некоторые другие материалы. Они превосходят кварцевый песок по термохимической устойчивости, теплопроводности, но они более дороги; их используют в особо ответственных случаях, например, для получения крупных стальных отливок с чистой поверхностью.

**Глина** – второй основной исходный материал в формовочных смесях. Она является связующим веществом, обеспечивающим их прочность и пластичность. На практике наиболее широко используют каолиновые или

бентонитовые глины. В присутствии влаги на поверхности глинистых частиц образуются гидратные оболочки из молекул воды, которые обеспечивают сцепление частиц и вместе с тем лёгкое скольжение между ними. Чем больше глина удерживает на поверхности воду, тем выше её связующая способность, а также и пластичность формовочной смеси. При нагревании (сушке) по мере удаления влаги прочность смеси возрастает.

Кроме глины в качестве связующих веществ в формовочные, а особенно стержневые смеси, вводят жидкое стекло, синтетические смолы, декстрин, сульфитно-спиртовую барду и др. Их вводят в состав смеси в количестве 1,5 – 3 %, но они значительно сокращают продолжительность затвердевания.

Для улучшения свойств песчано-глинистых смесей в них вводят добавки. В качестве противопригарных материалов для стального литья используют пылевидный кварц (маршалит), хромистый железняк; для чугунного и цветного литья каменноугольную пыль, мазут. С целью увеличения податливости и газопроницаемости литейных форм в смеси добавляют древесные опилки.

По характеру использования формовочные смеси подразделяются на облицовочные, наполнительные и единые, а по состоянию литейной формы при её изготовлении и перед заливкой на сырые и сухие.

Состав формовочной смеси выбирается в зависимости от литейного сплава с учётом его температуры плавления и усадки, а также массы, размеров и конфигурации отливки.

Для предотвращения пригара и улучшения чистоты поверхности отливок формы и стержни покрывают тонким слоем противопригарных материалов. Для сырых форм применяют припылы.

В формах для чугунных отливок используют порошкообразную смесь оксида магния, древесного угля и бентонита, порошкообразный графит. В формах для стальных отливок применяют порошкообразную смесь оксида магния и огнеупорной глины, пылевидный кварц, циркон и другие материалы. Для сухих форм применяют противопригарные краски, водные суспензии этих материалов с добавками связующих.

### 1.3 Литниковые системы

Литейную форму заливают металлом через литниковую систему, под которой понимают совокупность каналов и резервуаров, по которым расплав поступает из ковша в полость формы. Литниковая система должна обеспечивать непрерывное поступление металла в форму, питание отливки для компенсации усадки, предотвращать разрушение формы, попадание шлака и воздуха со струёй расплава.

Основными элементами литниковой системы являются литниковая чаша, стояк, шлакоуловитель, питатели (рисунок 1). Чаша уменьшает размывающее действие струи расплава, задерживает всплывающий шлак. Для лучшего задержания шлаковых включений в литниковые чаши или другие элементы литниковой системы иногда устанавливают фильтры: керамические сетки, либо фильтры из специальной стеклоткани.



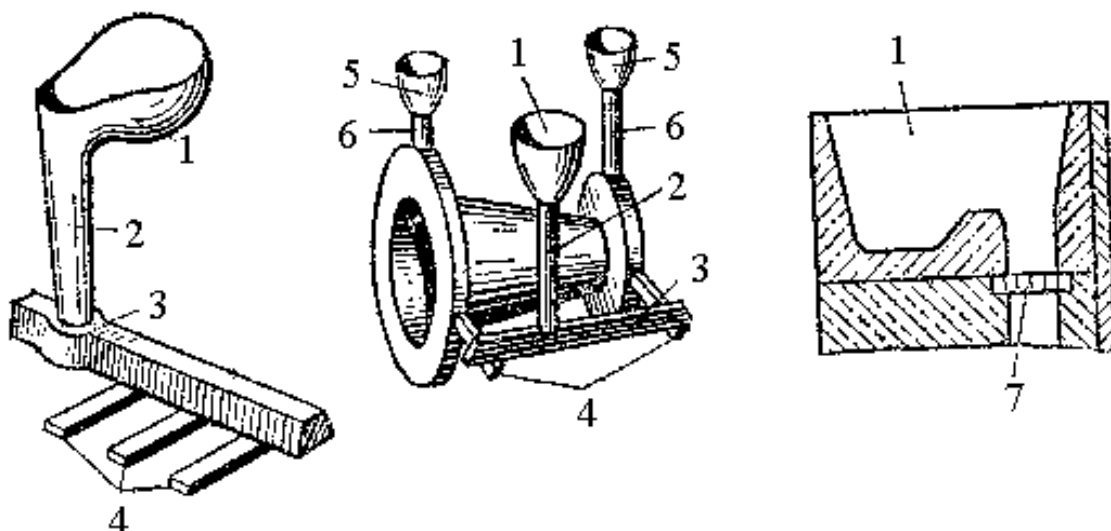


Рисунок 1 - Элементы литниковой системы: 1 – литниковая чаша; 2 – стояк; 3 – шлакоуловитель; 4 – питатели; 5,6 – чаша и стояк выпоров (прибылей); 7 – фильтр из специальной стеклоткани

Стояк представляет собой вертикальный конический, обычно суживающийся к низу канал круглого сечения, по которому металл из литниковой чаши или воронки попадает в шлакоуловитель.

Шлакоуловитель служит для задержания попавших в металл шлака и других включений и представляет собой горизонтальный канал обычно трапецевидного сечения, располагающийся в верхней полуформе.

Питатели представляют собой каналы прямоугольного или трапецевидного сечения, которые примыкают к нижней части шлакоуловителя и предназначены для подвода металла непосредственно в полость формы. Их располагают в нижней полуформе на некотором расстоянии от стояка и концов шлакоуловителя, так как в противном случае в них, а следовательно, и в полость формы может попасть шлак. Для лучшего

задержания шлака в литниковой системе выдерживается следующее соотношение размера сечения стояка, шлакоуловителя и питателей  $F_{ст} > F_{шл} > F_{пит}$ .

Над самым высоким местом полости формы, на стороне, противоположной месту подвода в неё металла, делают выпоры – каналы для выхода из формы воздуха и газов и всплывающих неметаллических включений. Они содействуют нормальной усадке застывающего сплава и позволяют контролировать полноту заполнения формы металлом.

При изготовлении отливок из стали у наиболее массивных частей делают прибыли – наполненные жидким металлом полости, предназначенные для предупреждения образования в отливках усадочных раковин и рыхлот. Они должны всё время пополнять затвердевающую отливку жидким металлом и сами затвердевать последними.

В зависимости от формы, размера отливки, состава и свойств литейного сплава применяются верхняя, нижняя (сифонная) и ярусная литниковые системы. Верхняя система наиболее проста, её применяют для мелких деталей небольшой высоты. С увеличением высоты происходит размывание формы струёй металла, разбрызгивание и окисление его, увеличивается количество неметаллических включений в теле отливки.

Нижнюю систему применяют для средних и толстостенных отливок значительной высоты. Она обеспечивает спокойное заполнение формы металлом, но она более сложна.

Ярусная система обеспечивает последовательное питание отливки снизу вверх, и её применяют для крупных отливок. Недостатки ярусной

системы – сложность в изготовлении и значительный расход металла на литники.

## *2. Порядок выполнения работы*

Основой для разработки технологического процесса изготовления отливки является чертёж детали. На чертеж детали в соответствии с ГОСТ 3.1125 – 88 наносят технологические указания, необходимые для изготовления модельного комплекта, формы и стержня, и получают чертёж отливки с модельно – литейными указаниями.

На рисунке 2 в качестве примера приведены эскизы стальной (а) и чугунной (б) деталей. Поверхности деталей, подвергающиеся механической обработке, условно обозначаются знаком  $\surd$ . Остальные поверхности механической обработке не подлежат, на что указывает знак  $\surd(\surd)$  в правом углу эскиза.

При разработке эскиза отливки с литейно-модельными указаниями на эскиз детали условно наносят (рисунок 3):

1. Плоскость разъёма модели и формы (1), их показывают отрезком, над которым указывается буквенное обозначение разъёма РМ. Направление разъёма показывается сплошной основной линией, ограниченной стрелками и перпендикулярной линии разъёма. Положение отливки в форме при заливке обозначается буквами *В* (верх) и *Н* (низ). Буквы проставляются у стрелок, показывающих направление разъёма.

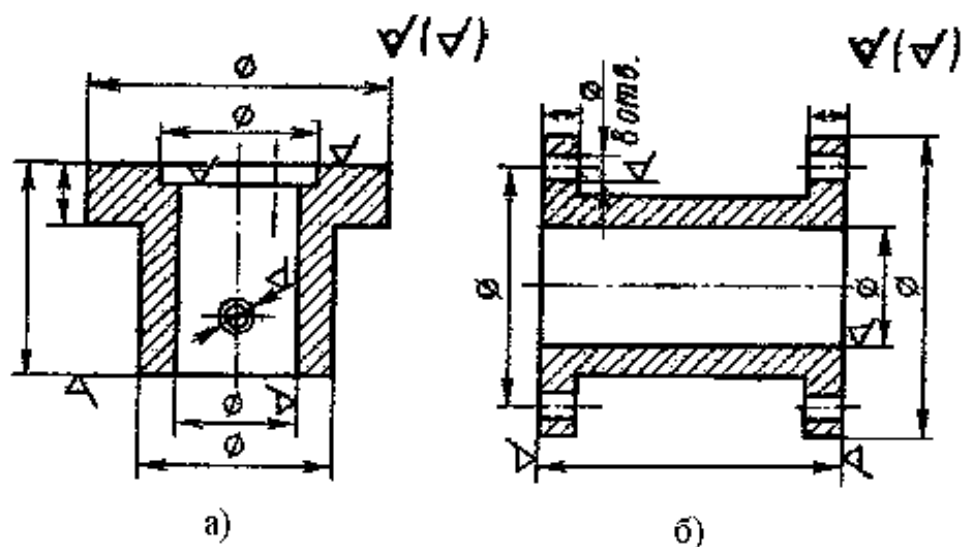


Рисунок 2 - Эскизы деталей: а) стальной; б) чугунной

При выборе плоскости разъёма наиболее ответственные поверхности отливки целесообразно располагать в нижней части формы или вертикально, так как в верхней части отливки скапливаются дефекты – газовые раковины и шлаковые включения. Плоскость разъёма выбирают с учётом удобства формовки и извлечения модели из формы. Кроме того желательно, чтобы отливка или, по крайней мере, её базовые поверхности для механической обработки были расположены в одной полуформе.

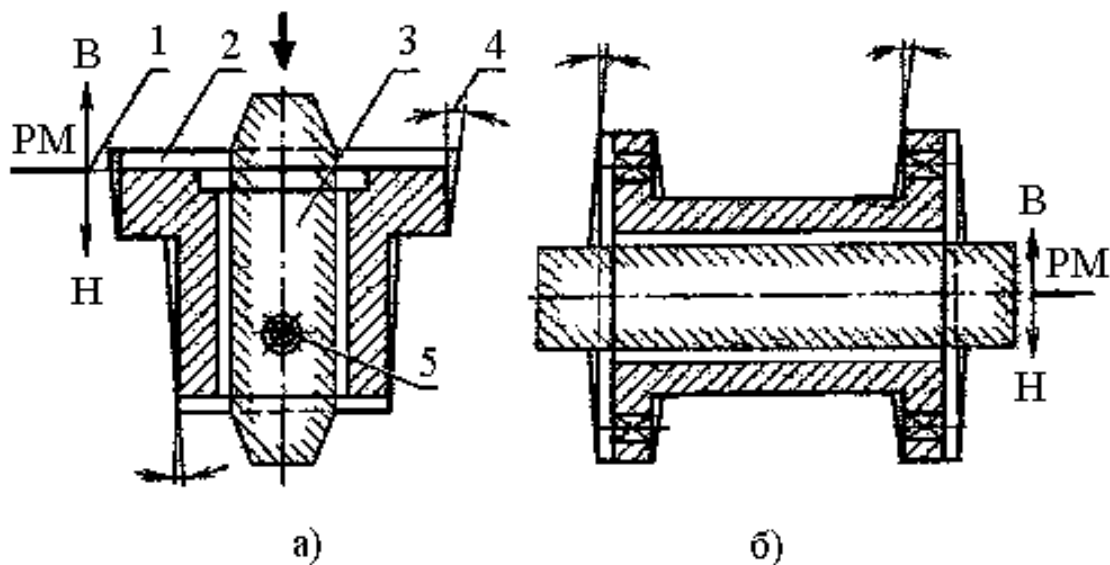


Рисунок 3 - Эскизы отливок: а) стальной; б) чугунной где: 1 – разъем модели; 2 – припуск на механическую обработку; 3 – стержень; 4 – формовочные уклоны; 5 – необрабатываемые отверстия

2. Припуски на механическую обработку (2), их обозначают сплошными тонкими линиями у поверхностей, где указан знак обработки  $\nabla$  (допускается выполнять линию припуска красным карандашом). Величины припусков определены ГОСТ 26645 – 85 и при единичном производстве выбираются по III классу точности в зависимости от способа литья, материала отливки, положения обрабатываемой поверхности при заливке (верх, низ, бок), наибольшего габаритного и номинального размера отливки (табл. 1, 2). Под номинальным размером отливки подразумевается расстояние между двумя противоположными обрабатываемыми поверхностями или расстояние от установочной базовой поверхности до обрабатываемой.

Таблица 1 - Припуски на механическую обработку отливок из серого чугуна по III классу точности в мм (ГОСТ 26645 – 85)

Наибольший габаритный размер детали в мм	Положение поверхности при заливке	Номинальный размер в мм				
		До 50	51–120	121 – 260	261 – 500	501 – 800
До 120	Верх-низ, бок	3,5-2,5	4,5-3,5			
121 – 260	Верх-низ, бок	4,0-3,0	5,0-4,0	5,5-4,5		
261 – 500	Верх-низ, бок	4,5-3,5	6,0-4,5	7,0-5,0	7,0-6,0	
501 – 800	Верх-низ, бок	5,0-4,0	7,0-5,0	7,0-5,0	8,0-6,0	9,0-7,0

Таблица 2 - Припуски на механическую обработку фасонных отливок из стали по III классу точности в мм (ГОСТ 26645-85)

Наибольший габаритный размер детали в мм	Положение поверхности при заливке	Номинальный размер в мм				
		До 120	121–260	261– 500	501– 800	801– 1250
До 120	Верх-низ, бок	5-4				
121 – 260	Верх-низ, бок	5-4	6-5			
261 – 500	Верх-низ, бок	6-5	8-6	9-6		
501 – 800	Верх-низ, бок	7-5	8-6	10-7	11-7	
801 - 1250	Верх-низ, бок	9-6	10-7	11-8	12-8	13-9

3. Отверстия, впадины, выемки, не выполняемые при литье, зачёркивают сплошными тонкими линиями (5), которые допускается выполнять красным карандашом.

4. Контуры стержня со стержневыми знаками (3) изображаются сплошной тонкой линией, которую допускается выполнять синим цветом. Стержни в разрезе штрихуются только у контура. Размеры знаков стержней и зазоры между знаками стержней и модели принимаются по ГОСТ 3606 – 80.

5. Формовочные уклоны (4) на вертикальных стенках обозначаются тонкими линиями и выбираются в зависимости от высоты отливки от плоскости разъёма (табл. 3).

Таблица 3 - Формовочные уклоны на отливках по ГОСТ 3212 – 80

Высота отливки от плоскости разъёма	Величина уклона		Высота отливки от плоскости разъёма	Величина уклона		
	мм	Град.		мм	Град.	мм
До 20		3°	1,0	201 – 300	0° 30 <sup>I</sup>	2,5
21 – 50		1° 30 <sup>I</sup>	1,3	301 – 800	0° 30 <sup>I</sup>	4,5
51 – 100		1°	1,5	801 – 2000	0° 20 <sup>I</sup>	9,0
101 – 200		0° 45 <sup>I</sup>	2,0	св. 2000	0° 15 <sup>I</sup>	11,0

Помимо этих обозначений указывается процент усадки сплава, из которого изготавливают отливку, наносятся литниковая система, прибыли, выпоры, которые на рассматриваемом эскизе для простоты не указаны.

На рис. 3,б приведён эскиз чугунной отливки с модельно – литейными указаниями. Для этой отливки используется горизонтальный стержень, имеющий цилиндрические стержневые знаки, в отличие от вертикального стержня, у которого стержневые знаки конусные.

6. По эскизам отливок выполняются эскизы моделей (рисунок 4). Модели имеют стержневые знаки (они закрашены чёрным цветом), формовочные уклоны для вертикального стержня и радиусы закруглений  $r$  в местах перехода стенок. Размеры моделей выполняют с учётом размеров детали, припусков на механическую обработку, формовочных уклонов и усадки сплава, которую выбирают по таблице 4.

7. Для изготовления стержней служат стержневые ящики – разъёмные, либо неразъёмные. На рисунке 5 приведены эскизы стержневых ящиков для вертикального (а) и горизонтального (б) стержня.

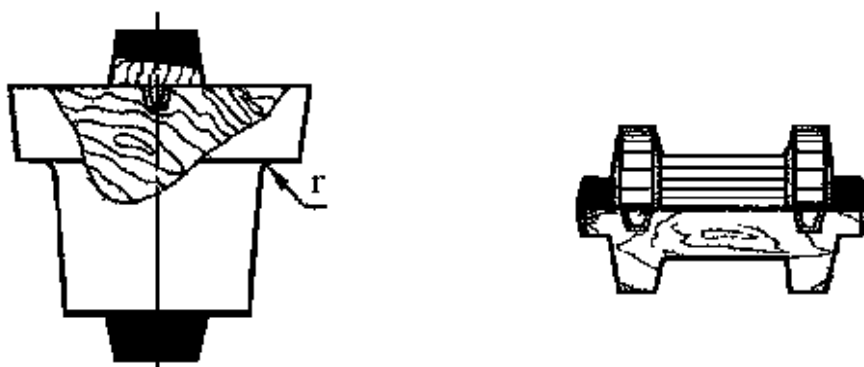


Рисунок 4 - Эскизы моделей

Таблица 4 - Линейная усадка литейных сплавов

№ п/п	Литейный сплав	Линейная усадка, %
1	<b>Чугун серый</b> мелкие отливки (не более 100 кг) средние отливки (100 – 500 кг) крупные отливки (более 500 кг)	1 – 1,25 0,75 – 1,00 0,5 – 0,75
2	<b>Чугун ковкий</b>	1,5 – 1,75
3	<b>Сталь углеродистая</b> мелкие отливки (не более 100 кг) средние отливки (100 – 500 кг) крупные отливки (более 500 кг)	1,8 – 2,2 1,6 – 2,0 1,4 – 1,8
4	<b>Бронзы</b>	1,0 – 1,8
5	<b>Латуни</b>	1,5 – 2,0
6	<b>Алюминиевые сплавы</b>	1,0 – 1,25



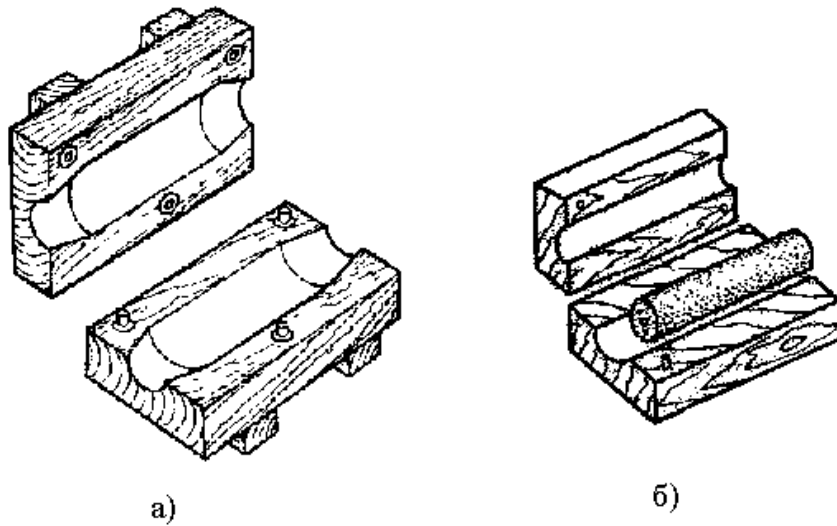


Рисунок 5 - Эскизы стержневых ящиков: а – для вертикального стержня; б – для горизонтального стержня

8. Эскизы собранных литейных форм для чугуновой (а) и стальной (б) отливок даны на рисунке 6. В форме для чугуновой литья имеются шлакоуловитель и выпоры, а в форме для стального литья шлакоуловитель отсутствует, а для компенсации большой усадки стали и предупреждения усадочных раковин предусмотрены прибыли.

9. На рисунке 7 приведены эскизы готовых чугуновой (а) и стальной (б) отливок с литниковой системой

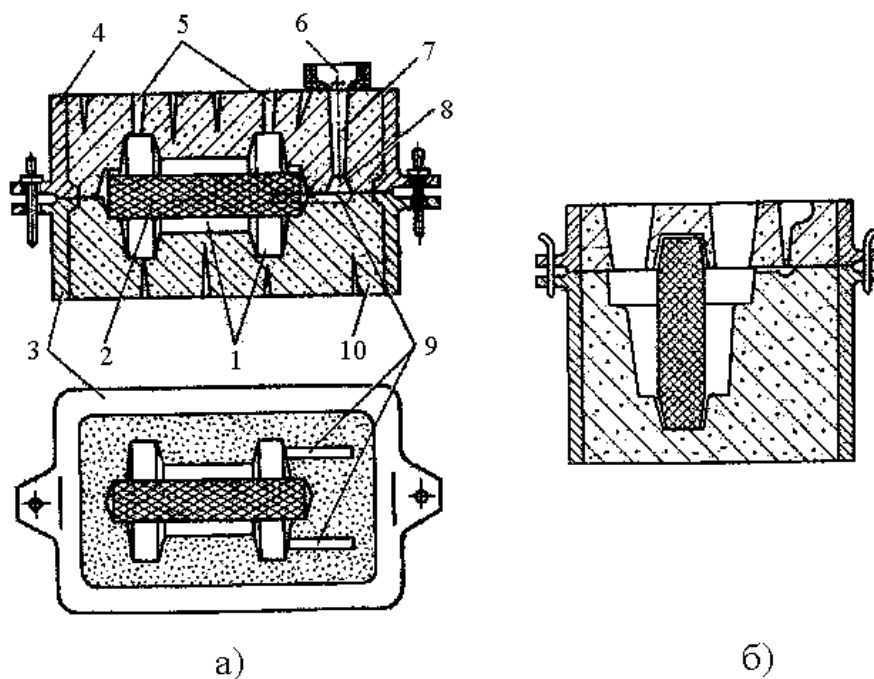


Рисунок 6 - Эскизы собранных литейных форм: 1 – полость формы; 2 – стержень; 3 – нижняя опока; 4 – верхняя опока; 5 – выпор; 6 – чаша; 7 – стояк; 8 – шлакоуловитель; 9 – питатели; 10 – формовочная смесь

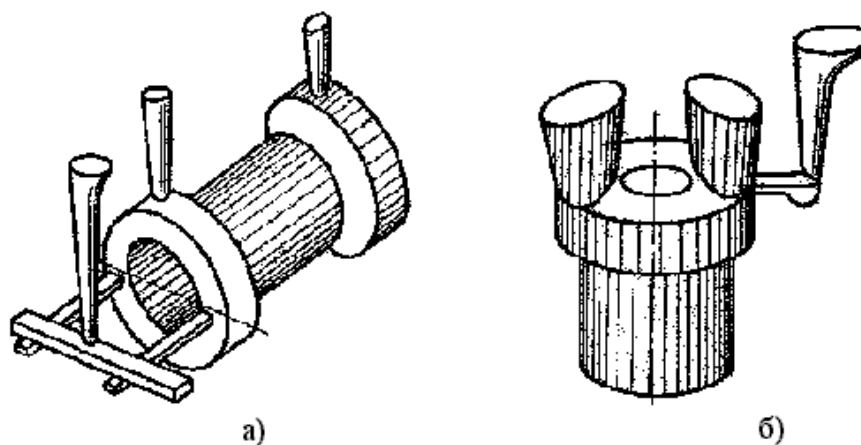


Рисунок 7 - Эскизы готовых отливок с литниковой системой: а – отливка из чугуна; б – отливка из стали

### 3. Изготовление литейной формы

Ручную формовку в опоках по разъёмной модели для изготовления отливки в разовой песчано-глинистой форме осуществляют в следующей последовательности:

1. Изготовление нижней полуформы. Нижнюю половину модели, не имеющую центрирующих шипов, ставят плоскостью разъёма на подмодельную доску и устанавливают опоку. Поверхность модели и доски посыпают разделительным составом для уменьшения прилипания смеси к оснастке (сухой кварцевый песок, порошок талька или графита). На модель наносят слой облицовочной смеси толщиной 20 – 30 мм, уплотняют её руками вокруг всей модели. Затем заполняют остальной объём опоки наполнительной смесью и уплотняют её трамбовкой, сначала у стенок опоки, а затем в средней части. Излишек смеси срезают линейкой. В формовочной смеси на расстоянии 40 – 50 мм друг от друга и на 10 – 15 мм от модели душником накалывают отверстия для выхода газов. Заформованную опоку покрывают второй подмодельной доской и переворачивают на 180°.

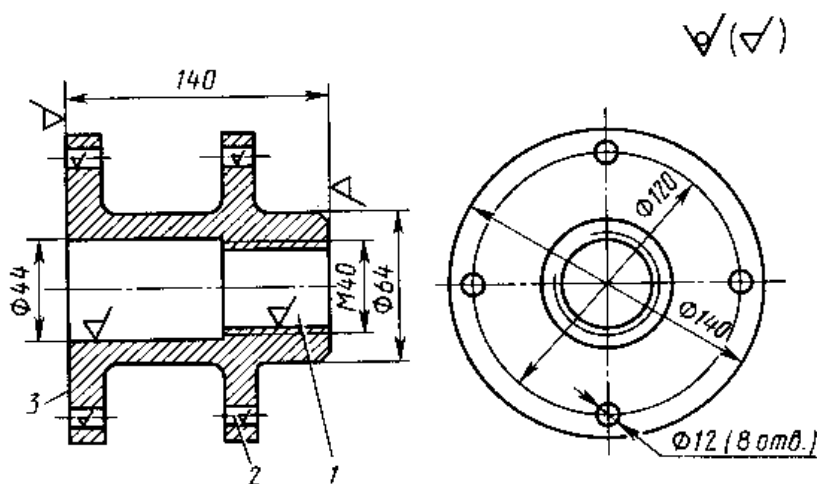
2. Изготовление верхней полуформы. На нижнюю половину модели по центрирующим шипам устанавливают верхнюю половину модели, модели шлакоуловителя, стояка и выпоров. Поверхность разъёма формы посыпают тонким слоем сухого кварцевого песка, для того чтобы формовочная смесь в верхней опоке не прилипла к смеси в нижней опоке. Верхнюю опоку устанавливают по центрирующим штырям на нижнюю. Наполняют её формовочными смесями так же, как и нижнюю. После уплотнения смеси вокруг стояка гладилкой прорезают литниковую чашу.

3. Извлечение моделей. Модели стояка и выпоров раскачивают и удаляют из верхней полуформы. Верхнюю опоку снимают и поворачивают на 180° разъёмом вверх. В плоскости разъёма нижней полуформы гладилкой прорезают питатели. Из полуформ после лёгкого раскачивания удаляют половины моделей и модель шлакоуловителя. Устраняют возможные

дефекты формы, возникшие при извлечении моделей, обдувают обе полуформы сухим сжатым воздухом для удаления возможного засора. Поверхность полуформ припыливают молотым древесным углём или графитом.

4. Сборка литейной формы. В нижнюю полуформу, если требуется, устанавливают стержень и накрывают её верхней полуформой. Полуформы фиксируют штырями или скобами и на верхнюю полуформу устанавливают груз, для предотвращения ухода жидкого металла через разъем формы во время заливки. Производится заливка металла в форму до тех пор пока он, поднимаясь снизу, не заполнит до верха выпоры.

Приложение.



Фланец Чугун СЧ 10

### Порядок выполнения работы.

Для заданного чертежа детали (прил.) выполнить следующее:

1) выбрать плоскость разъёма модели и формы с указанием положения отливки в форме В (верх) и Н (низ);

- 2) выполнить эскиз отливки с обозначением размеров припусков, уклонов, усадки металла и стержней;
- 3) выполнить эскиз модели с указанием габаритных размеров;
- 4) начертить эскиз стержневого ящика без указания размеров;
- 5) привести эскиз собранной литейной формы в разрезе с указанием её элементов;
- 6) дать краткое описание последовательных операций по изготовлению литейной формы и отливки.

### **Содержание отчёта.**

В отчет необходимо включить эскиз детали, эскиз отливки, эскиз модели, эскиз стержневого ящика, эскиз собранной литейной формы, краткое описание последовательности изготовления литейной формы.

### ***Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №3***

1. Что входит в комплект для литья в земляную форму?
2. В чем состоят отличия модели для литья от полученной отливки?
3. Как получают внутренние полости в отливках?
4. Какими свойствами обладают формовочные смеси?
5. Что такое литниковая система, и из каких элементов она состоит?

## ***Лабораторная работа 4***

### **Изучение процессов обработки металлов давлением**

**Цели работы:** закрепить знания, полученные на теоретических занятиях по обработке металлов давлением. Разработать технологический

процесс получения поковки горячей объемной штамповкой на кривошипном горячештамповочном прессе в открытом штампе.

### **Теоретические сведения.**

Процесс обработки металлов давлением (ОМД) заключается в придании материалу требуемой формы, размеров и физико-механических свойств без нарушения его сплошности путем пластической деформации. В зависимости от полноты восстановления исходной формы и размеров тела после прекращения воздействия внешних сил различают упругую и пластическую деформацию, которые в процессе ОМД сопутствуют друг другу.

Изменение формы и размеров твердого тела в результате действия внешних сил оценивается степенью деформации. Наибольшая допустимая степень деформации зависит от пластичности обрабатываемого материала и его сопротивления деформированию. В свою очередь, они определяются химическим составом сплава, температурой обработки, скоростью деформирования и схемой нагружения.

Так, пластичность повышается, а сопротивление деформированию понижается в следующих случаях:

1. С понижением содержания углерода и легирующих элементов в стали.
2. С повышением температуры обработки.
3. С понижением скорости деформирования (изменением степени деформации в единицу времени). Однако при очень больших скоростях (например, при электромагнитной и взрывной штамповке) для многих металлов допустима чрезвычайно большая степень деформации, при которой не происходит разрушения.

4. При применении схемы нагружения создающей всестороннее неравномерное сжатие. Поэтому, например, при прессовании, объемной штамповке металл проявляет большую способность к пластическому деформированию, чем при волочении.

Следовательно, пластичность и технологические возможности ОМД следует рассматривать не как неизменное свойство какого-либо материала, а как его состояние, зависящее от конкретных условий обработки. Возможно создание комплекса условий (мелкозернистая структура металла, соответствующие температура и скорость деформации), при которых ряд металлов переходит в состояние сверхпластичности.

Пластическая деформация вызывает коренное изменение структуры и свойств металла; при этом зерна дробятся и вытягиваются в направлении пластического течения металла, создавая волокнистое строение. В результате холодной пластической деформации в 1,5 – 2 раза увеличивается твердость и прочность при одновременном снижении пластичности, изменяется электропроводность и магнитная проницаемость. Упрочнение металла в результате холодной пластической деформации называется *наклепом* или *нагартовкой*.

Наклеп переводит металл в неустойчивое структурное состояние, что связано с искажением кристаллической решетки. При нагреве холоднодеформированного и деформации предварительно нагретого металла в нем происходят разупрочняющие процессы, называемые *возвратом* и *рекристаллизацией*.

Возврат для чистых металлов проявляется при температуре выше  $0,3 T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  – температура плавления. Увеличение амплитуды тепловых колебаний атомов искаженной кристаллической решетки позволяет им

вернуться в положение устойчивого равновесия. При этом несколько увеличивается пластичность, а волокнистая структура не меняется.

Рекристаллизация происходит при увеличении температуры до  $0,4 T_{пл}$  для чистых металлов. При этом подвижность атомов достаточна для их перегруппировок, приводящих к возникновению и росту новых равноосных зёрен с неискаженной кристаллической структурой взамен деформированных. Наклеп полностью снимается, а волокнистая структура превращается в равноосную. ОМД проводимая выше температуры рекристаллизации называется **горячей**, ниже – **холодной**.

Волокнистое строение деформированного металла приводит к анизотропии его свойств (прочность и ударная вязкость вдоль его волокон выше, чем поперек). Поэтому течение металла при обработке давлением следует направлять так, чтобы волокна совпадали с направлением наибольших напряжений в детали при ее эксплуатации.

ОМД существенно влияет на свойства материалов. Она позволяет улучшить качество литого металла, т.к. литая дендритная структура преобразуется в относительно мелкое зерно. При горячей деформации ликвидируются пустоты и микротрещины внутри слитка, уменьшается его ликвация (неоднородность химического состава) вследствие значительных перемещений слоев металла.

При горячей деформации пластичность металла выше, а сопротивление деформированию ниже, чем при холодной, поэтому она сопровождается меньшими энергетическими затратами. Вследствие этого холодную деформацию применяют только в том случае, если горячая деформация неприемлема.



Нагрев металла при ОМД влияет на качество и стоимость продукции. Основные требования к нагреву: необходим равномерный прогрев заготовки по сечению и длине до соответствующей температуры за минимальное время с наименьшей потерей металла в окалину и экономным расходом топлива. Неправильный нагрев вызывает различные дефекты: трещины, обезуглероживание, повышенное окисление, перегрев и пережог.

При медленном нагреве снижается производительность, увеличивается окисление и обезуглероживание поверхности заготовки. При перегреве (нагрев выше оптимального интервала ОМД) происходит рост зерна, что снижает механические свойства. Он исправляется нормальным отжигом путем нагрева до оптимальной температуры, выдержки и последующего медленного охлаждения вместе с печью. При пережоге, т.е. при нагреве до температуры близкой к температуре плавления, происходит оплавление границ зерен и появление трещин, что является неисправимым браком.

Каждый металл и сплав имеют свой определенный температурный интервал горячей обработки давлением, который выбирается по таблицам в зависимости от марки сплава. Так, например, для углеродистых сталей температуру начала горячего деформирования выбирают по диаграмме состояния железо-цементит на 100 – 200 °С ниже температуры плавления стали заданного химического состава, а температуру конца деформирования принимают на 50 – 100 °С выше температуры рекристаллизации.

Заготовки и слитки перед обработкой давлением нагревают в горнах или печах. Горны отличаются от нагревательных печей небольшими размерами, отапливаются каменным углем, коксом или мазутом, металл нагревается в них при непосредственном контакте с топливом. Их используют для нагрева мелких заготовок при ручной ковке.

Печи для нагрева заготовок подразделяются на пламенные и электрические, а по распределению температуры – на камерные и методические. В камерных печах – печах периодического нагрева – температура одинакова по всему рабочему пространству. Методические печи с постоянно повышающейся температурой рабочего пространства от места загрузки заготовок к месту их выгрузки являются печами непрерывного действия.

### Порядок выполнения работы.

Проектирование технологического процесса горячей объёмной штамповки заключается в разработке чертежа (эскиза) поковки, выполняемого на основании чертежа (эскиза) готовой детали (рисунок 1, 2) и расчёте основных параметров штамповки, которые заносятся в (таблицу 1).

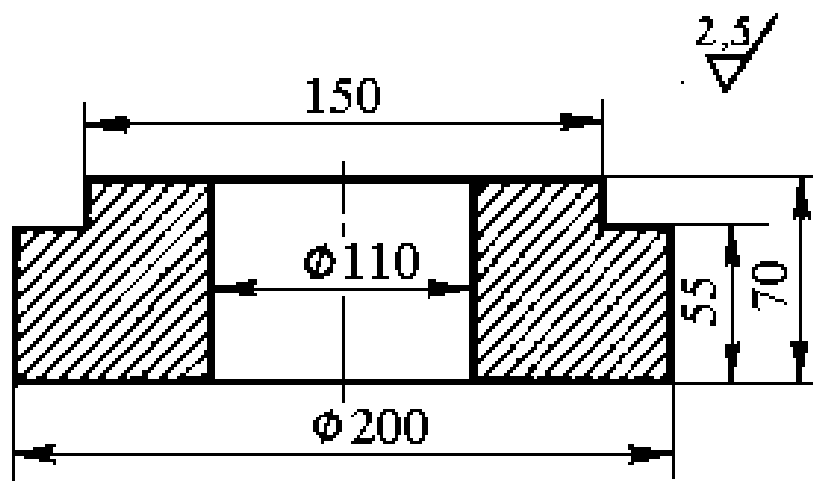


Рисунок 1 - Эскиз детали

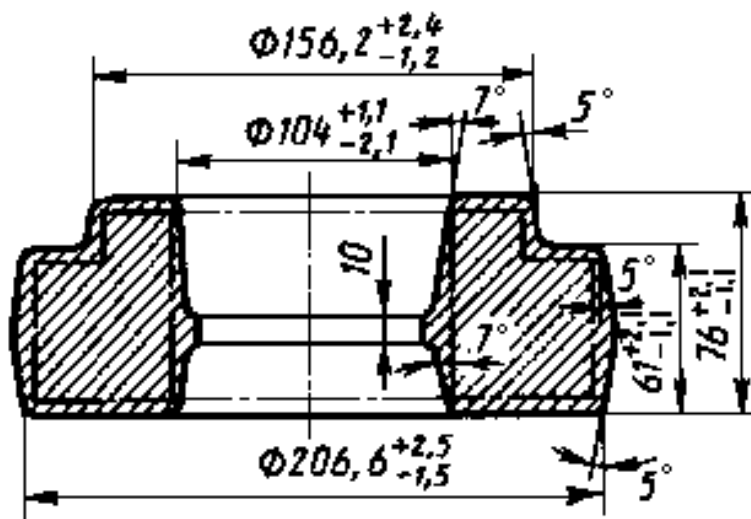


Рисунок 2 - Эскиз поковки

Перед разработкой эскиза поковки предварительно определяется масса заданной детали по формуле:

$$G_{\text{д}} = V \cdot \rho$$

где  $G_{\text{д}}$  – масса детали, кг

$\rho$  – плотность металла (для стали  $\rho = 7,8 \text{ г / см}^3$ ).  $V$  – объем детали,  $\text{см}^3$ .

Таблица 1 - Результаты расчетов

Наименование параметра	Численное значение
Способ производства (массовое, серийное, единичное)	
Масса детали $G_{\text{д}}$ , кг	
Масса поковки $G_{\text{п}}$ , кг	

Масса исходной заготовки $G_3$ , кг	
Коэффициент использования металла $K$ , %	
Температурный интервал нагрева заготовки, $^{\circ}\text{C}$	
Время нагрева заготовки в печи $T$ , ч	
Усилие деформирования $P_d$ , кг	
Усилие прессы на обрезку облоя $P_o$ , кг	

При составлении эскиза поковки габаритный контур готовой детали показывают тонкими линиями. Контур поковки вычерчивают сплошными линиями. Цифры над размерной линией обозначают номинальные размеры поковки и допустимые предельные отклонения.

Разработка эскиза поковки осуществляется в следующей последовательности:

1. Выбирается плоскость разъёма штампа. Она должна обеспечивать возможность свободного извлечения поковки из штампа, препятствовать возможному сдвигу одной части штампа относительно другой, плоскость разъёма должна пересекать вертикальные поверхности поковки.

2. На поверхности поковки, подлежащих механической обработке (обозначенные знаком  $\nabla$ ), назначают припуски. Их выбирают по таблицам из ГОСТов в зависимости от габаритных размеров и массы поковок и от требований к поковкам (табл. 2).

3. По тем же таблицам назначают допуски – допустимые отклонения размеров поковок из-за возможной их недоштамповки по высоте, сдвига штампов, их износа.

4. Штамповкой не всегда можно получить сложную конфигурацию поковки. Поэтому для упрощения формы назначают напуски,

представляющие собой часть объёма поковки, добавляемую для облегчения её изготовления. К напускам также относят штамповочные уклоны, внутренние радиусы закруглений, перемычки отверстий.

5. В штампах с одной плоскостью разреза нельзя получить сквозное отверстие в поковках. Поэтому в них делают наметку отверстия сверху и снизу, а между ними остается перемычка, толщина которой  $S = 0,1 d_{\text{отв}}$  поковки. Отверстия диаметром менее 30 мм в поковках не делают, их получают сверлением.

6. На боковые поверхности поковки (перпендикулярные плоскости разреза штампа), для облегчения извлечения её из штампа, назначаются штамповочные уклоны. Различают наружные  $\alpha$  и внутренние  $\beta$  уклоны. Внутренние уклоны на  $2^\circ - 3^\circ$  больше наружных, т.к. при охлаждении поковки её внутренние поверхности прижимаются к штампу, а наружные отходят от стенок штампа, уменьшая вероятность застревания поковки в штампе (таблица 3, рисунок 3).

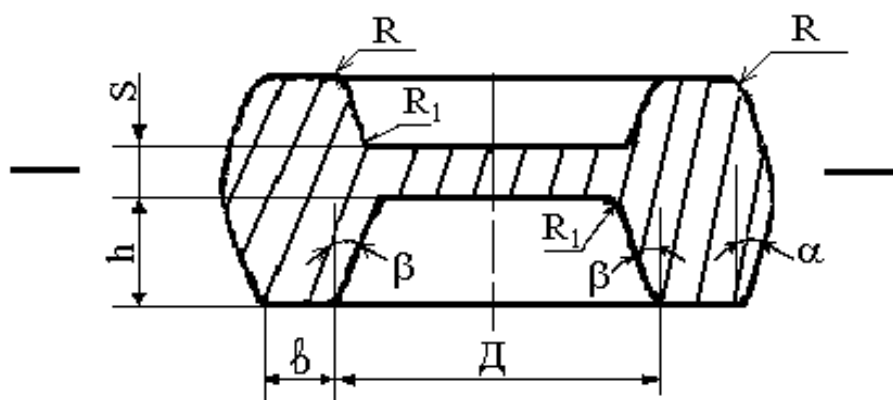


Рисунок 3 - Наружные  $R$  и внутренние  $R_1$  радиусы закругления поковок, плоская перемычка под прошивку, наружные  $\alpha$  и внутренние  $\beta$  штамповочные уклоны

Таблица 3 - Штамповочные уклоны

Штамповочное оборудование	Допустимые параметры		
	h / b	Внешний угол, $\alpha^\circ$	Внутренний угол, $\beta^\circ$
Гидравлические и механические прессы	до 2	3	5
	2 – 5	5	7
	5 – 7	7	10

7. На пересекающиеся поверхности поковки назначаются наружные  $R$  и внутренние  $R_1$  радиусы закруглений (рисунок 3), которые необходимы для лучшего заполнения полости штампа металлом, предохранения его от преждевременного изнашивания и поломок, а также для получения качественных поковок. Величина радиусов закруглений регламентируется ГОСТ 7505 – 74 .

Практически достаточно, если наружные радиусы будут на 0,5 – 1 мм больше величины припуска на механическую обработку данной поковки, а внутренние радиусы закруглений в 2 – 3 раза больше наружных. Для облегчения изготовления штампа радиусы следует для каждой поковки унифицировать, т.е. выбрать одно значение радиусов наружных и одно значение радиусов внутренних из следующего ряда чисел 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12,5.

8. Эскиз поковки составляется на основе эскиза детали с учётом припусков на механическую обработку, допусков на размеры и технологических напусков (штамповочных уклонов, перемычек в отверстиях, внутренних радиусов закруглений и др.).

9. Расчёт объёма и массы поковки следует выполнять по эскизу поковки, разбивая весь объём на элементы, представляющие собой правильные геометрические тела.

10. Определение массы исходной заготовки осуществляется по формуле:

$$G_3 = G_{\text{п}} + G_y + G_o,$$

где  $G_3$  – масса исходной заготовки, кг;

$G_{\text{п}}$  – масса поковки, кг;

$G_y$  – масса металла идущего на угар при нагреве заготовки, кг (угар при нагреве в пламенных печах принимают равными 3 % от массы поковки);

$G_o$  – масса облоя, кг (принимается равной 10 – 15 % от массы поковки).

11. Исходя из массы детали и заготовки определяется коэффициент использования металла в процентах по формуле:

$$K = \frac{G_{\text{д}}}{G_3} \cdot 100 \cdot \%$$

12. Температурный интервал горячей штамповки определяется по таблице 4.

Таблица 4 - Температурные интервалы горячей объёмной штамповки

Марка стали	Предел прочности, $\sigma_B$ , кг / мм <sup>2</sup>	Температура, °С			Рекомендуемый интервал, °С
		Начало	Конец		
			не выше	не ниже	
10	33	1280	800	720	1250 – 750
15	38	1250	850	760	1220 – 800
30	50	1280	830	720	1250 – 750
35	54	1280	830	720	1250 – 750
45	61	1260	850	760	1220 – 800
70	105	1220	850	770	1180 – 800
9Х	78	1150	850	800	1110 – 825
20Х	80	1250	870	800	1200 – 800
40Х	100	1200	870	800	1180 – 830
50ХН	82	1200	870	800	1180 – 830
18ХГТ	100	1250	850	800	1220 – 830
12ХН3А	95	1200	870	760	1180- 800

13. Время выдержки заготовки в печи производится по формуле Н.Н.Доброхотова

$$T = K \cdot \alpha \cdot D \cdot \sqrt{D} ,$$

где T – общее время нагрева, включая выдержку, ч;

K – коэффициент учитывающий степень легирования стали (принимается равным 10 для углеродистой стали и 20 – для легированной);



$\alpha$  – коэффициент, зависящий от способа укладки заготовок в печи: для штучных заготовок круглого сечения, нагреваемых со всех сторон (единичное производство)  $\alpha = 1$ , а для плотноуложенных (массовое или серийное производство)  $\alpha = 2$ ;

$D$  – диаметр заготовки (размер стороны), м.

14. Необходимое усилие деформирования определяется по формуле

$$P_d = z \cdot m \cdot k \cdot F,$$

где  $P_d$  – усилие деформирования, кг;  $z$  – коэффициент, учитывающий условия деформирования (табл. 5);  $m$  – коэффициент, учитывающий объём заготовки (табл. 5);  $k$  – удельное давление деформирования (для конструкционных сталей принимается равным  $6000 \text{ кг / см}^2$ );  $F$  – площадь проекции штампуемой поковки на плоскость разъёма штампа (без учёта облоя),  $\text{см}^2$ .

Таблица 5 - Поправочные коэффициенты

Условия деформирования	$Z$	Объём заготовки, $\text{см}^3$	$m$
Штамповка заготовок простой конфигурации	1,5	до 25	1
		25 – 100	1 – 0,9
Штамповка заготовок сложной конфигурации	1,8	100 – 1000	0,9 – 0,8
		1000 – 5000	0,8 – 0,7

15. Усилие прессы для обрезки облоя определяется по формуле

$$P_o = n \sigma_{cp} F_{cp},$$

где  $P_0$  – усилие прессы, кг;  $n$  – коэффициент, учитывающий притупление режущих кромок ( $n = 1,6 - 1,8$ );  $\sigma_{ср}$  – предел прочности материала поковки на срез, кг / мм<sup>2</sup>,  $\sigma_{ср} = 0,8 \sigma_{в}$ ,

где  $\sigma_{в}$  – предел прочности материала поковки, кг / мм<sup>2</sup> (таблица 4);  $F_{ср}$  – площадь среза, мм<sup>2</sup>, подсчитывается как:

$$F_{ср} = Z h,$$

где  $Z$  – периметр обрезаемого слоя, мм;  $h = 3 - 4$  мм – толщина обля.

16. Штамповка может быть осуществлена в открытых и закрытых штампах (рисунок 4).

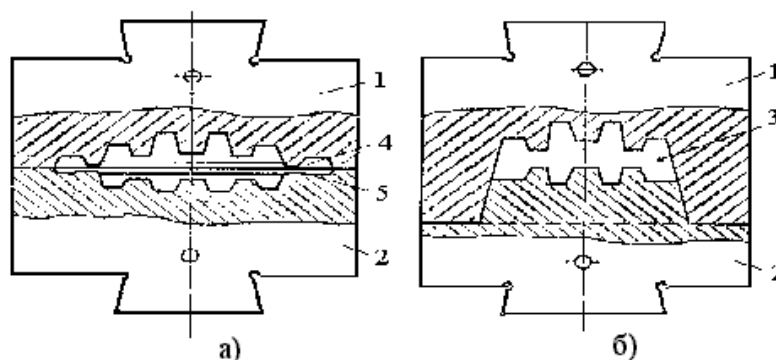


Рисунок 4 - Эскизы открытого (а) и закрытого (б) штампа: 1 – верхняя половина штампа; 2 – нижняя половина штампа; 3 – конфигурация поковки; 4 – магазин; 5 – мостик

**Открытыми** называют штампы, у которых вдоль всего внешнего контура штамповочного ручья сделана специальная облойная канавка, в которую на заключительной стадии штамповки вытесняется избыток металла, и состоящая из узкого зазора – «мостика» и расширенной части – «магазина». Так как облойную канавку делают очень узкой, то течение в облой металла затруднено и возможно только при значительном давлении металла, находящегося в полости штампа. По мере затекания металла в

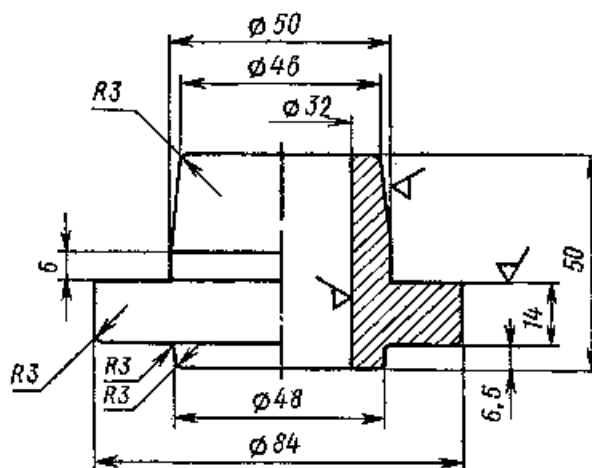
облойную канавку давление нарастает и заставляет металл плотно заполнять все, даже очень небольшие и неудобные для заполнения элементы формы ручья штампа, обеспечивая хорошее формообразование поковки.

**Закрытыми** или **безоблойными** называют штампы, в которых металл деформируется в замкнутом пространстве. В отличие от открытых штампов, имеющих поверхность разъёма в виде плоскости, закрытые штампы имеют разъём по сложной поверхности с направляющими, обеспечивающими точное соударение половин штампа в конце штамповки. При безоблойной штамповке расход металла уменьшается на 20 %, кроме того, исключаются затраты на обрезку облоя. Однако закрытые штампы для деталей сложной формы конструктивно трудновыполнимы, дороги и быстро выходят из строя. Кроме того, при безоблойной штамповке необходимы точное соблюдение размеров заготовки и установка её по центру ручья штампа, иначе возможен брак – односторонние торцовые заусенцы и незаполнение полости штампа.

### Содержание отчета.

В отчет необходимо включить эскиз детали; эскиз поковки; эскиз штампа; расчёт основных параметров горячей объёмной штамповки (таблица 1).

### Приложение



## Ступица Сталь 15. Производство массовое

### ***Вопросы для самопроверки к лабораторной работе №4***

1. Что называется обработкой металлов давлением?
2. Какие процессы обработки металлов давлением применяются в машиностроении?
3. Какое оборудование используется при машинной ковке?
4. Что такое наклеп?
5. Что такое рекристаллизация?
6. Как определяется температура рекристаллизации?

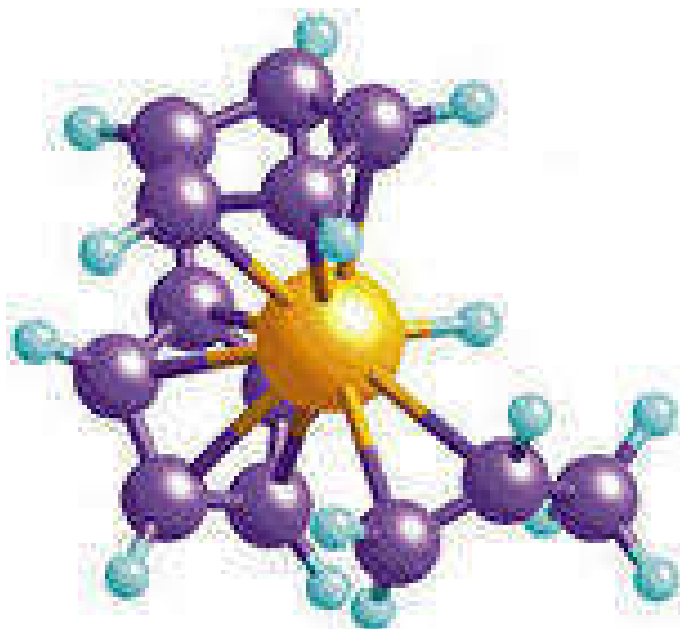
*Министерство сельского хозяйства РФ*  
*Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия*  
*им. П.А Столыпина*

**Кафедра «Материаловедение и технология машиностроения»**

*Морозов А.В.*

## **УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

**«НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. ТЕХНОЛОГИЯ  
НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»**



*Ульяновск 2013*

УДК 620.22 – 621.7

Морозов А.В.

Учебное пособие  
«Неметаллические материалы. Технология неметаллических  
конструкционных материалов»  
Ульяновск, ГСХА им. П.А. Столыпина, - 2013 год, 49 с.

В работе рассмотрены основные неметаллические материалы, их строение, свойства и область применения в сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве. Также изложены основные технологические процессы применяемые при производстве изделий из неметаллических конструкционных материалов.

**Рецензент:** к.т.н., доцент кафедры «Техническая механика»  
Федотов Г.Д.

Печатается по решению методической комиссии инженерного факультета УГСХА.

Протокол № 1 от 10 сентября 2013 г. методической комиссии инженерного факультета Ульяновской ГСХА им. П.А Столыпина.

© Морозов А.В.  
© Ульяновская ГСХА, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Еще во второй половине XX в. в нашей стране уделялось большое внимание применению неметаллических материалов в различных отраслях промышленности и народного хозяйства в целом. Было налажено и постоянно наращивалось производство самых различных неметаллических материалов: синтетических смол и пластмасс, синтетических каучуков, заменяющих натуральный каучук, высококачественных полимеров с заданными техническими характеристиками, включая армированные и наполненные пластмассы.

Пластические массы и другие неметаллические материалы обладают рядом превосходных физико-химических, механических и технологических свойств, что обусловило их широкое распространение в различных отраслях промышленности - машиностроении, электротехнике, электронике и др. Как конструкционный материал пластические массы все более вытесняют дорогостоящие металлы. Применение пластических масс дает возможность постоянно совершенствовать конструкции. Применение полимеров в конструкциях машин и оборудования позволяет снизить их массу, улучшить надежность и долговечность работы, повысить производительность. Для производства пластмасс требуется в 2 - 3 раза меньше капитальных вложений, чем для производства цветных металлов. Исходными материалами для получения пластических масс служат дешевые продукты переработки каменного угля, нефти и природного газа. Пластмассы подвергают армированию для улучшения механических свойств. Для изготовления различных деталей, работающих в механизмах трения (скольжения) с небольшими нагрузками и скоростями, применяются такие неметаллические материалы, как антифрикционные полимерные материалы. Эти материалы обладают небольшим коэффициентом трения, высокой износостойкостью, химической стойкостью, могут работать без смазки. Однако низкая теплопроводность, значительный (в десятки раз больше, чем у металлов) коэффициент термического расширения, небольшая твердость и высокая податливость ограничивают возможности их широкого использования. Более эффективно они применяются в комбинации с другими материалами, металлами и пластмассами.

Кроме того, в качестве фрикционных неметаллических материалов применяются тормозные тканые асбестовые ленты и фрикционные асбестовые накладки - формованные, прессованные, тканые, картонно-бакелитовые и спирально-навивные, которые могут эксплуатироваться во всех климатических зонах. Фрикционные асбестовые накладки применяются для узлов трения автомобилей, самолетов, тракторов, металлорежущих и текстильных станков, подъемно-транспортного оборудования и тепловозов. Ресурс таких неметаллических накладок, работающих в узлах трения, достаточно высок. Например, для автомобилей с дизельными двигателями он составляет 320000 км, легковых автомобилей - 125000 км, грузовых автомобилей - 75 000 км. Тормозные тканые асбестовые ленты применяются в качестве накладок в тормозных и фрикционных узлах машин и механизмов с поверхностной температурой трения до 300 °С.

Неметаллические материалы нашли свое широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства.

# НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

## 1. Полимеры: строение, полимеризация и поликонденсация, свойства

Полимеры существенно отличаются от металлов и сплавов: их молекулы вытянуты в длинные цепочки, в результате чего полимеры имеют высокую молекулярную массу.

Своеобразие свойств полимеров обусловлено структурой их макромолекул. По форме макромолекул полимеры делятся на *линейные* (цеповидные), *разветвленные*, *плоские*, *ленточные* (лестничные), *пространственные или сетчатые*.

*Линейные макромолекулы* полимера представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки (рисунок 1). Гибкие макромолекулы с высокой прочностью вдоль цепи и слабыми межмолекулярными связями обеспечивают эластичность материала, способность его размягчаться при нагревании, а при охлаждении вновь затвердевать. Многие такие полимеры растворяются в растворителях. На физико-механические и химические свойства линейного полимера влияет плотность упаковки молекул в единице объема. При плотной упаковке возникает более сильное межмолекулярное притяжение, что приводит к повышению плотности, прочности, температуры размягчения и уменьшению растворимости.

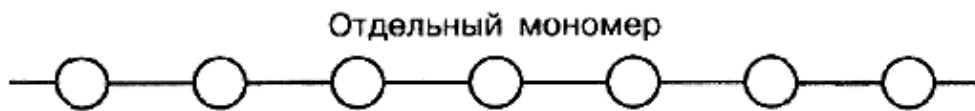


Рисунок 1 - Линейная полимерная цепочка

Линейные полимеры являются наиболее подходящими для получения волокон и пленок (например, полиэтилен, полиамиды и др.).

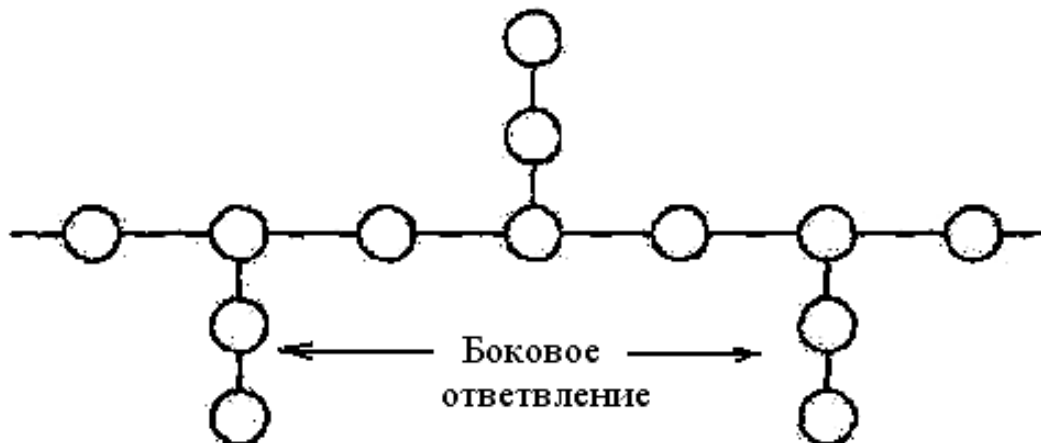


Рисунок 2 - Разветвленная линейная полимерная цепочка



**Разветвленные макромолекулы** полимера, являясь также линейными, отличаются наличием боковых ответвлений (рисунок 2). Эти ответвления препятствуют сближению макромолекул, их плотной упаковке. Подобная форма макромолекул предопределяет пониженное межмолекулярное взаимодействие и, следовательно, меньшую прочность и повышенную плавкость и растворимость (полиизобутилен). К разветвленным относятся и при витые полимеры, в которых состав основной цепи и редко расположенных боковых ответвлений неодинаков.

**Пространственные** или **сетчатые** полимеры образуются при соединении макромолекул между собой в поперечном направлении прочными химическими связями непосредственно или через химические элементы или радикалы (рисунок 3). В результате такого соединения макромолекул образуется сетчатая структура с различной плотностью сетки.

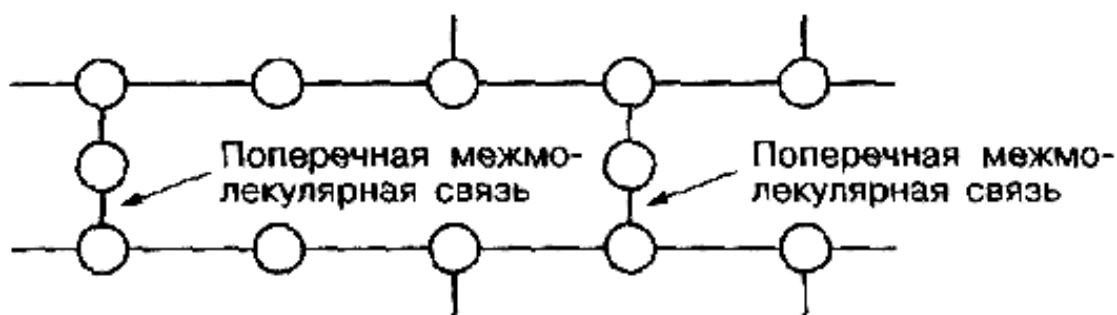


Рисунок 3 - Сетчатые полимеры

**Редкосетчатые** (сетчатые) полимеры теряют способность растворяться и плавиться, они обладают упругостью (например, мягкие резины). **Густосетчатые** (пространственные) полимеры отличаются твердостью, повышенной теплостойкостью, нерастворимостью. Иногда образование пространственной структуры сопровождается даже возникновением хрупкости (смола в стадии резин). Пространственные полимеры лежат в основе конструкционных неметаллических материалов. К сетчатым полимерам относятся также пластинчатые полимеры, которые имеют плоскостное двумерное строение. Примером такого полимера является графит.

К полимерам поликонденсационного типа относятся фенолформальдегидные смолы, полиэфиры, полиуретаны, эпоксидные смолы. К высокомолекулярным соединениям полимеризационного типа относятся поливинилхлорид, полиэтилен, полистирол, полипропилен. Высокополимерные и высокомолекулярные соединения являются основой органической природы - животных и растительных клеток, состоящих из белка.

Для изготовления многих изделий широко применяют как полимерные материалы, в основе которых лежит природное сырье, так и искусственные - синтетические и полимерные материалы.

Широкое применение в различных отраслях промышленности и хозяйства в целом нашли такие полимеры, как фенолформальдегидные жидкие и твердые смолы.

***Фенолформальдегидные жидкие смолы резольного типа*** - продукт поликонденсации фенола и формальдегида в присутствии катализатора с добавкой модифицирующих и стабилизирующих веществ или без них - поставляются в виде однородной прозрачной жидкости от красновато-коричневого до темно-вишневого цвета со средней плотностью 1,2 г/см<sup>3</sup>. Применяется при производстве теплозвукоизоляционных изделий, фанеры, древесностружечных и древесноволокнистых плит, абразивных инструментов на гибкой основе, стеклопластиков, асботехнических и асбофрикционных изделий, углепласта для шахтных крепей и др. Марки смол: СФЖ-303, СФЖ-305 и т. д.

***Твердые фенолформальдегидные смолы новолачного и резольного типов*** - продукты поликонденсации фенолов (или их фракций) и формальдегида в присутствии катализатора с добавкой модифицирующих веществ или без них. Выпускаются в виде порошка, чешуек и крошки. Применяются для получения резиновых смесей, прессовочных масс, слоистых пластиков, лаковых токопроводящих суспензий, антикоррозионных лакокрасочных материалов и клеев, в качестве связующих для абразивных изделий и оболочковых форм, при изготовлении поропласта, при производстве масляных лаков для лакокрасочной и пищевой промышленности. Выпускаются следующие марки смол: СФ-010А, СФ-010, СФ-010М (модифицированная), СФ-014 и т. д.

## **2. Пластмассы: термопластичные, термореактивные, газонаполненные**

**Пластмассы** - пластические массы - это материалы, полученные на основе высокомолекулярного органического соединения - полимера, выполняющего роль связующего и определяющего основные технические свойства материала.

Весьма существенную роль целесообразного применения пластмасс в качестве машиностроительных материалов, помимо чисто технических соображений, играют экономические. Экономичность применения пластмасс при изготовлении и восстановлении деталей автомобиля выражается в снижении себестоимости их производства. Так, при использовании многих ответственных металлических деталей требуется, как правило, три вида обработки (литье, термообработка и механическая обработка) с большим числом технологических операций (до 30...50), в то время как для пластмассовых деталей достаточен только один вид обработки - формование деталей методом пластического деформирования. Экономическая целесообразность применения пластмасс связана со снижением затрат на исходные материалы ввиду широкомасштабных и недефицитных ресурсов для их производства (нефти, природного и

промышленного газа, целлюлозы и др.), а также массы одноименных изделий, способствующих снижению материалоемкости, так как, в среднем, плотность пластмасс примерно в два раза ниже плотности такого, например, металла, как алюминий.

Детали из пластмасс не только в 4...9 раз дешевле одноименных деталей из цветных металлов, но, в отдельных случаях, в 2...6 раз дешевле деталей из черных металлов. Масштабы применения пластмасс при изготовлении и ремонте автомобилей непрерывно увеличиваются и, в ближайшее время, могут достичь 10 % и более общей массы автомобилей, а их номенклатура может превысить 1000 единиц. Большие возможности дальнейшего роста потребления пластмасс в автомобилестроении дает применение полимерных обивочных теплоизоляционных материалов, топливных баков и, что особенно важно, серийное производство пластмассовых кузовов.

**Термопластичные пластмассы** (обратимые полимеры) при повторном нагревании размягчаются и поддаются формированию, а при охлаждении снова застывают, сохраняя прежние свойства, поэтому их можно неоднократно перерабатывать.

**Термореактивные пластмассы** относятся к необратимым полимерам, которые при нагревании, вследствие протекания необратимых химических реакций, превращаются в твердые неплавкие вещества.

Классификация полимерных материалов, наиболее часто применяемых при производстве и ремонте автомобилей, представлена на рисунке 4.

Рассмотрим кратко представленные на схеме пластмассы и укажем область их применения.

**Полиамиды** - группа пластмасс с известными названиями: капрон, нейлон и др. В составе макромолекул полимера присутствует алкидная группа (-NH-CO-), а также метиленовые группы (-CH<sub>2</sub>-), повторяющиеся от 2 до 10 раз. Общая формула полиамидов имеет вид:



Полиамиды при обычных температурах представляют собой твердые и эластичные материалы, а при температуре 160...240°C переходят в жидкое состояние, они обладают высокими прочностными и антифрикционными свойствами, химостойкими к нефтепродуктам; в нагретом состоянии легко заполняют форму и затвердевают без пор и трещин. Из полиамидов, например, из капрона (поликапролактама) изготавливают большое число автомобильных деталей: втулки педалей и рессор, корпуса сальников, шестерни привода спидометра и др.

**Этролы** - этилцеллюлозные полимеры обладающие достаточно высокой прочностью в твердом и хорошо формирующиеся в нагретом состоянии. Растворяются в активных растворителях (ацетоне и спирте), не

подвержены действию нефтепродуктов. Из этролов изготавливают рулевые колеса, рукоятки управления, щитки приборов и др. детали.

*Фторопласты* - аморфно-кристаллические полимеры. Аморфная фаза придает этим полимерам эластичность. Фторопласты обладают высокой химической стойкостью. Так, фторопласт - 4 может длительно эксплуатироваться при температуре 250°C, стоек к действию растворителей, кислот и щелочей, является самым химически стойким из всех известных материалов: пластмасс, металлов, стекол и т.п. Из фторопластов (4, 4Д, 4М и др.) изготавливают уплотнительные прокладки (рисунок 5), мембраны бензиновых насосов, различного рода втулки, вентили, а также антифрикционные детали.

Помимо приведенных на схеме пластмасс, для изготовления отдельных деталей автомобиля применяются и другие, например, *акрилопласты* - для изготовления плафонов и стекол габаритных фонарей; *винилпласты* - для изготовления банок аккумуляторных батарей.

Среди пластмасс на основе термореактивных смол, именуемых на вышеприведенной схеме реактопластами, наибольшее распространение получили фенопласты, основой которых являются фенолоформальдегидные смолы.

*Фенопласты* обладают высокими механическими и диэлектрическими свойствами, стойки к нефтепродуктам и классифицируются по наполнителю.

При изготовлении деталей автомобиля из фенопластов наиболее часто применяют, так называемые слоистые пластики - *асботекстолит*, *текстолит* и *стеклотекстолит*.

*Асботекстолит* получают горячим прессованием асбестовой ткани, пропитанной фенолоформальдегидной смолой. Асботекстолит обладает высокой теплостойкостью и хорошими фрикционными качествами. Он используется для изготовления тормозных накладок и накладок дисков сцепления.

*Текстолит* имеет в качестве наполнителя хлопчатобумажную ткань. Среди слоистых пластиков текстолит обладает наибольшей способностью поглощать вибрационные нагрузки, имеет высокие диэлектрические и прочностные свойства. Поэтому из текстолита, помимо деталей приборов электрооборудования, изготавливают шестерни и упорные шайбы распределительного вала.

В *стеклотекстолитах* в качестве наполнителя применяют стеклоткани. Демпфирующая способность стеклопластиков выше, чем у текстолитов. Длительно стеклопластики могут работать при температуре 200...400°C, а кратковременно, в течение нескольких десятков секунд, выдерживают температуру в несколько десятков тысяч градусов, что и определяет их применение в качестве теплоизоляционных материалов.

Помимо тканей, в качестве наполнителей используются и волокна этих тканей. Такие материалы относят к пластмассам с волокнистыми наполнителями, которые считаются более дешевыми по сравнению с

тканевыми наполнителями. Наибольшее применение из пластмасс с волокнистыми наполнителями находят стекловолокниты, которые применяются в качестве тепло- и звукоизоляционных обивочных материалов, а также могут быть использованы для изготовления крупногабаритных изделий сравнительно простых форм, например, кузовов автомобилей.

Также в качестве наполнителя может применяться бумага или картон - *гетинаксы*.

Особую группу пластмасс составляют пластмассы с порошковыми наполнителями, к которым относятся композиции на основе эпоксидных смол, широко применяемые при восстановлении повреждений крупногабаритных корпусов деталей автомобиля. Эпоксидная композиция включает эпоксидную смолу, в которую добавляют пластификатор (дибутилфталат) для облегчения нанесения композиции на восстанавливаемую деталь. В качестве наполнителей используют мелкодисперсные материалы (порошки). Применение того или иного наполнителя зависит от материала восстанавливаемой детали. Так, при восстановлении блоков цилиндров, изготовленных из серых чугунов или литейных алюминиевых сплавов, применяют порошки соответствующих материалов. Непосредственно перед восстановлением детали добавляют отвердитель (полиэтиленполиамин). Необратимое отверждение эпоксидной композиции происходит в течение 48 часов. Эпоксидные композиции используемые, например, для заделки трещин водяной рубашки блоков цилиндров взамен сварки, дают существенную экономию дорогостоящих сварочных материалов. Отремонтированные таким способом детали надежно работают при температуре не превышающей 100... 120°C.

***Газонаполненные пластмассы - пенополиуретаны*** - сверхлегкий конструкционный материал. Исходными для их получения являются простые и сложные полиэферы, изцианаты, катализаторы и эмульгаторы. Эластичные пенополиуретаны (ППУ) имеют закрытые, несообщающиеся газонаполненные ячейки (пенопласты) и сообщающиеся ячейки (поропласты). Часто применяется общий термин - «пенопласты». Эластичный поропласт содержит 70% воздушных сообщающихся пор. Он имеет плотность 25 - 29 кг/м<sup>3</sup>, хорошо противостоит гниению, веществам, применяемым при химической чистке изделий, его предел прочности при растяжении - 0,07-0,11 МПа.

Эластичный пенополиуретан применяется в производстве мягкой мебели, сидений автомобилей, тракторов и других изделий. Жесткий пенополиуретан применяется для изготовления корпусов кресел, декоративных элементов, в качестве тепло- и звукоизоляционных материалов. Широкое распространение в последние годы получили наполненные пенопласты (ППУ).

Литейные свойства, применительно к термопластам, хорошие. Ковкость (деформируемость) - понятие, применимое лишь в части горячего прессования, когда пластмасса находится в жидкотекучем (полужидком)

состоянии. Свариваемость - для пластмасс этот термин не применим ввиду малой температуры плавления. Неразъемные же соединения пластмасс осуществляются склеиванием. Обрабатываемость резанием - весьма удовлетворительная из-за низкой теплопроводности пластмасс, что приводит к значительной концентрации тепла в зоне резания.

### **Компоненты, входящие в состав пластмасс**

В любую пластмассу входит полимер, представляющий собой сложную молекулу, состоящую из простых молекул-мономеров, от количества и расположения которых зависят свойства данной пластмассы. Помимо мономеров в пластмассы входят наполнители, пластификаторы, стабилизаторы, красящие пигменты и др. компоненты.

**Наполнители** применяют для улучшения физико-механических свойств пластмасс и повышения их экономичности. Различают неорганические и органические наполнители.

*Органические наполнители* - это материалы на основе целлюлозы. Они снижают хрупкость пластмасс, увеличивают гигроскопичность, уменьшают термостойкость. В качестве органических наполнителей используют древесную муку, хлопок, бумагу, древесный шпон, хлопчатобумажные ткани и др.

*Неорганические наполнители* - это наполнители на основе различных минералов (асбест, графит, стекловолокно, стеклоткань, слюда, кварц и др.).

Для приготовления пластмасс применяют порошкообразные, волокнистые и слоистые наполнители.

**Пластификаторы** необходимы для повышения пластичности изделий и облегчения горячей штамповки. В качестве пластификаторов применяют различные органические вещества: стеарин, касторовое масло, дибутилфтолат и др.

**Стабилизаторы** - вещества, которые предотвращают разложение полимерных материалов во время их переработки и эксплуатации под действием атмосферы, повышенных температур и других факторов. Для этой цели используют ароматические амины, фенолы, сернистые соединения и др.

**Красители** добавляют для окрашивания пластмасс. Для этой цели применяют минеральные красители (мумиё, охру, литопон и др.) и органические (нигрозин, родамин и др.).

Для облегчения выемки изделий из форм после прессования в пластмассы в качестве добавок вводят легкоплавкие, воскоподобные, высокотекучие смазочные вещества (стеарин, олеиновую кислоту, трансформаторное масло и др.).

## Область применения пластмасс при производстве и ремонте автотранспортных средств

К ранее указанным *положительным свойствам* пластмасс относятся также высокие диэлектрические и антикоррозионные свойства, низкая теплопроводность.

К *отрицательным свойствам* следует отнести в большинстве случаев сравнительно низкие, по сравнению с металлами, показатели прочности и низкий диапазон рабочих температур. Большинство пластмасс удовлетворительно работают при температурах не превышающих +160°C. К отрицательным свойствам относится также склонность пластмасс к старению. Под старением полимерных материалов понимаются необратимые изменения важнейших технических характеристик, происходящие в результате сложных химических и физических процессов, развивающихся в материале при эксплуатации и хранении. Причинами старения являются: свет, теплота, влага и др. немеханические факторы. Для замедления процессов старения в полимерные материалы добавляют различные стабилизаторы, например, фенолы.

Пластмассы квалифицируются по назначению (конструкционные, электротехнические, звуко-теплоизоляционные и др.); по прочности (низко-, средне- и высокопрочные). К низкопрочным относится, например, полиэтилен, к среднепрочным - капрон (капролактамы), к высокопрочным - пластмассы с различного рода наполнителями (текстолит, асбо- и стекловолокниты и др.). Достаточно распространенной классификацией, применительно к конструкционным пластмассам, является их классификация по характеру связующего вещества, от которого зависит поведение материала при нагревании и последующем остывании. В зависимости от указанного фактора пластмассы подразделяются на термопластичные (термопласты) и термореактивные (реактопласты).



Рисунок 4 - Пластмассы, применяемые при производстве и ремонте автомобилей

### 3. Эластомеры

Термин «эластомеры» был введен взамен названия «синтетические каучуки», а также «натуральный каучук» (*от индейского «каа-о-чу» - дерево, которое плачет*). **Эластомерами** называют полимеры, обладающие в широком температурном интервале высокой эластичностью - способностью подвергаться значительным (от нескольких сотен до 1000% и более) обратимым деформациям при сравнительно небольших действующих нагрузках. Первым эластичным материалом такого рода был натуральный каучук, который и в настоящее время не потерял своего значения в производстве эластомеров, в том числе и для медицинских изделий, благодаря своей нетоксичности. Каучук получают из латекса (млечный сок бразильской гевеи), состоящего более чем наполовину из воды, в которой растворено 34 - 37% каучука, 2 - 2,7% белка, 1,65 - 3,4% смолы, 1,5 - 4,92% сахара. На плантациях, где готовят натуральный каучук как промышленное сырье, латекс коагулируют с помощью органических кислот, прокатывают в рифленые листы и коптят в камерах с дымом при температуре +50 °С. Составные вещества дыма играют роль антисептиков и стабилизаторов окисления каучука. Такие листы толщиной 2,5 - 3 мм с вафельным рисунком поверхности называют «смокетшит». Они служат наиболее употребительной формой сырого плантационного каучука. Данные элементного анализа очищенного каучука соответствуют эмпирической формуле  $C_5H_8$  (изопрен).

**Синтетические каучуки** (эластомеры) получают путем полимеризации из мономеров с участием катализаторов (ускорителей процесса). Первый советский синтетический каучук был получен С. Д.



Лебедевым из технического спирта. В настоящее время выпускают несколько видов синтетических каучуков (эластомеров), в том числе изопреновый, мало отличающийся от натурального. Для изделий медицинского назначения применяется салоксановый (силиконовый) каучук, основная полимерная цепь которого состоит из атомов кремния и кислорода. Он термостоек и физиологически инертен. Сырьем для изготовления синтетических каучуков служат нефть, природный газ, каменный уголь.

#### 4. Резины. Наполнители, пластификаторы и другие вулканизирующие агенты резины

Превращение каучука или «сырой» каучуковой смеси в эластичную резину (материал с необходимыми эксплуатационными свойствами) осуществляют путем *вулканизации*. Вулканизация, подобно термообработке металлов и сплавов, приводит к изменению структуры каучука. При вулканизации осуществляется соединение («сшивание») молекул эластомера химическими связями в пространственную трехмерную сетку, в результате чего получают материал, обладающий необходимыми эластическими и прочностными свойствами (прочность, упругость, твердость, сопротивление разрыву и т. д.). В большинстве случаев процесс вулканизации состоит в химическом взаимодействии каучука с серой. Количество вводимой серы составляет для обычной резины 5 - 7%, а для твердой резины - эбонита - около 30 - 35%.

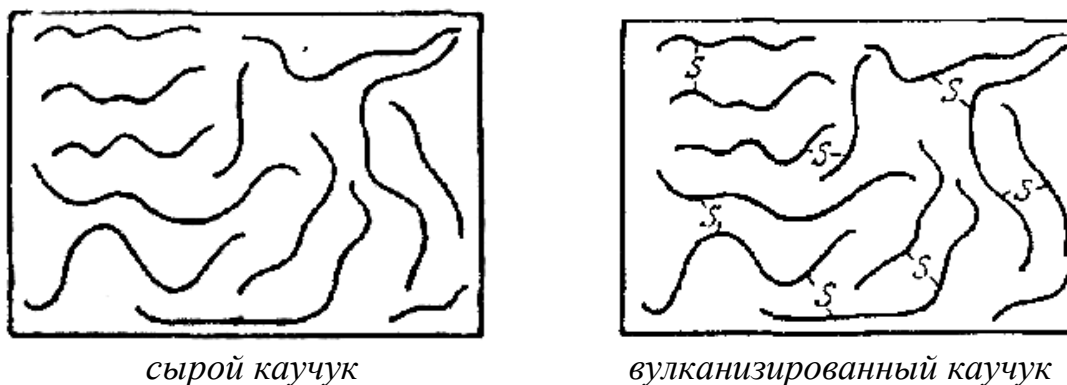


Рисунок 5 - Схема соединения молекул каучука при вулканизации

Сера присоединяется к каучуку по месту двойных связей, образуя подобие мостиков, соединяющих между собой цепеобразные линейные молекулы каучука. В результате образуются еще большие трехмерные молекулы разветвленной формы, характерные для резины (рисунок 4). Также в качестве вулканизирующих веществ применяют *теллур и селен*.

В современном производстве, помимо вулканизаторов, широко применяют органические ускорители, присутствие которых снижает количество серы (до 2 % вместо 10 %) и температуру вулканизации.

Существуют ультраускорители, благодаря которым вулканизация вместо температуры в +130 - 150 °С протекает при комнатной температуре.

**Наполнители.** В производстве резин и резинотехнических изделий применяются порошкообразные и тканевые наполнители. Основные функции наполнителей:

- 1) изменение физико-механических свойств резин и придание им специальных свойств (например, электропроводности, химической стойкости и др.);
- 2) облегчение обработки резиновых смесей;
- 3) снижение стоимости изделий.

Наполнители, улучшающие механические свойства резин, называются *активными*, или *усиливающими*. Наполнители, вводимые для снижения стоимости резинотехнических изделий и не оказывающие существенного влияния на свойства резин, называются *неактивными*, или *инертными*.

В качестве активных наполнителей используют углеродистую сажу, диоксид кремния («белая сажа»), силикаты металлов, некоторые органические продукты (синтетические полимеры, лигнин) и др. Например, введение сажи в синтетические каучуки СКВ, СКС, СКН увеличивает их временное сопротивление.

К инертным наполнителям относятся в основном различные неорганические продукты природного происхождения: мел, каолин, тальк, регенерат резины и др.

Прочность резиновых смесей зависит от дисперсности и удельной поверхности наполнителя. Активные сажи имеют дисперсность 0,05...0,15 мкм и удельную поверхность более 65 м<sup>2</sup>/г. Высокодисперсные сажи придают вулканизатам высокую прочность на разрыв и раздир, высокую износостойкость.

«*Белую сажу*» в качестве наполнителя применяют при получении светлых и цветных резин в пропорции 7/10. Она повышает механические свойства каучуков, их тепло- и огнестойкость. Для теплостойких резин используют в качестве наполнителей также фторид и силикат кальция.

В производстве прорезиненных тканевых изделий, таких как шины, транспортные ленты, приводные ремни, рукава и т.д., в качестве наполнителей используют корд, бельтинг и разнообразные рукавные ткани.

**Пластификаторы (мягчители)** вводят в каучук для облегчения совмещения его с остальными компонентами резиновой смеси, заполнения ею форм в процессе формования изделий, повышения адгезии каучука к тканям и пластичности. Наряду со своей основной функцией ряд смягчителей придает резинам специфические свойства: высокую морозостойкость, эластичность, низкую горючесть, газонепроницаемость, пониженную окисляемость. Содержание пластификаторов в резиновых смесях составляет от 8 до 30% от общей массы. Пластификаторы должны быть совместимы с каучуками, стойки при температурах переработки и вулканизации, быть нетоксичными. В качестве пластификаторов используются парафины,

жирные кислоты, битумы, дибутилфталат, растительные масла, различные синтетические продукты.

Для увеличения долговечности резинотехнических изделий вводятся противостарители, т.е. органические вещества, повышающие стойкость резин к воздействию кислорода воздуха и теплоты, возникающей в результате гистерезисных потерь при деформировании резин. В качестве таковых используются различные фенолы, первичные ароматические амины, ароматические диамины. Кроме антиоксидантов в резины вводят антирады, одоранты, красители и другие специальные добавки.

Резины подразделяются на формовые и неформовые, к неформовым относится большая группа так называемых сырых резин. Сырые резины выпускаются под номерами (10, 11, 14 и т.д.) в виде пластин с разной толщиной, покрытых тальком (для предохранения от слипания), или в виде рулонов с тканевой прокладкой (из миткаля), которая также предохраняет резину от слипания.

**Неформовая сырая резина** получается путем вулканизации из резиновых смесей, изготавливаемых на основе синтетических каучуков или натурального. Основным вулканизирующим веществом является сера, но еще применяют селен и теллур. В зависимости от марок сырая резина используется для получения различных формовых изделий с определенными свойствами. Например, из сырой резины получают техническую листовую резину нескольких типов: кислотощелочестойкую, теплостойкую, морозостойкую, пищевую и т. д. Морозостойкая резина сохраняет свои свойства при температуре до  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Техническую листовую резину толщиной 3 - 4 мм применяют для изготовления уплотнительных прокладок во фланцевых соединениях трубопроводов, транспортирующих холодную воду, а резину с тканевой прокладкой (из синтетической ткани) - и при транспортировании горячей воды температурой до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Из сырых резин получают различные резиновые изделия - муфты, кольца, клапаны, различные прокладки и т. д., применяя следующие методы формования: прессование, экструзию и литье под давлением. Процесс прессования резиновых изделий проходит в вулканизационных гидравлических прессах под давлением 100 - 300 атм. и при температуре  $+140 - 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При производстве автомобильных сидений применяется пенорезина, представляющая собой материал на основе синтетического или натурального каучука. Для изготовления пенорезины используют латексную смесь, которую выдерживают 18 - 21 ч, вспенивают и вулканизируют с последующей сушкой. Пенорезину выпускают в виде листов или формованных элементов мебели. По показателям эластичности, упругости, остаточной деформации пенорезина является идеальным материалом для мягкой мебели. Пенорезина самовентилируется и охлаждается за счет прохождения воздуха через сообщающиеся поры. Для снижения веса мебельных элементов из пенорезины их делают с пустотами, но чтобы при

этом сохранялась способность выдерживать значительные нагрузки, объем пустот не должен превышать 40% объема всего элемента.

К резинам, предназначенным для изготовления отдельных групп изделий, предъявляют дополнительные требования, обеспечивающие выполнение изделиями их функционального назначения и надежность в работе. В настоящее время промышленность выпускает резину листовую трех марок: тепломорозокислощелочестойкую (ТМКЩ); ограниченномаслобензостойкую (ОМБ); повышенномаслобензостойкую (ПМБ), которые в свою очередь подразделяются по твердости применяемой резины: мягкая (М) для работы при температурах от -45 °С до +90 °С; средней твердости (С) - при температурах от -60 °С до +80 °С, повышенной твердости (П) - при температурах от -60 °С до +80 °С.

## **5. Древесные материалы**

Древесные материалы широко применяют в сельскохозяйственном и автотракторном машиностроении. Древесина обладает достаточно высокой прочностью, хорошей упругостью, легко обрабатывается резанием, хорошо склеивается.

Механические свойства древесины зависят от влажности и направления волокон. Влажность древесины определяют как отношение разности масс до полного высушивания и после него к массе древесины до высушивания в процентах. Для сравнения свойств древесины установлена стандартная влажность, равная 15 %.

Древесные материалы широко применяют в промышленности в виде пиленых материалов круглого леса, слоистых материалов, Прессованной древесины (ДП), стружки, опилок, древесной муки и др.

Для сельскохозяйственного и автотракторного машиностроения древесина поступает в виде пиломатериалов. Пиломатериалы бывают обрезные, когда обработаны все четыре боковые стороны, и необрезные, когда не обработаны боковые кромки.

По соотношению размеров поперечного сечения различают доски, бруски и брусья. Доски - это древесный материал, у которого ширина больше двойной толщины. У брусков ширина не превышает двойной толщины, а брусья имеют одинаковую ширину и толщину - 100 мм и более.

По толщине доски и бруски разделяют на тонкие (толщиной до 32 мм) и толстые (более 40 мм).

В зависимости от наличия дефектов древесины пиломатериалы хвойных пород (ель, сосна, пихта) подразделяют на доски и бруски пяти сортов, брусья - четырех сортов.

Лучшие сорта пиломатериалов (отборный и первый сорта) применяют для поперечных балок и бортов кузовов грузовых автомобилей, в сельскохозяйственных машинах и технике. Пиломатериалы низших сортов используют для изготовления мелких заготовок и тары.

Пиломатериалы, нарезанные по определенным габаритным размерам, называют заготовками. Промышленные деревообрабатывающие предприятия поставляют заготовки цельными и клееными, пилеными (черновыми) и калиброванными (строганными). Влажность заготовок не должна превышать 15 %.

Древесные искусственные материалы выпускают в виде фанеры, лигнофоля и др.

**Древесно-слоистые пластики (ДСП)** изготавливают из листов лущеного шпона, пропитанных терморезактивной смолой и подвергнутых прессованию на гидравлических прессах под давлением 10...30 МПа и нагреву в процессе прессования до 140...160°C.

Для производства клееной фанеры изготавливают лущеный шпон трех сортов из древесины дуба, бука, березы, ясеня, ольхи и др. Лущеный шпон толщиной 0,55... 1,5 мм получают на специальных станках лущением предварительно распаренной древесины (кряжа). Ширина лущеного шпона 150... 1900 мм. Влажность лущеного шпона 6...10 %.

Клееную фанеру из лущеного шпона изготавливают из трех (и более) слоев со взаимно перпендикулярным расположением волокон в смежных слоях. В зависимости от водостойкости для склейки фанеры применяют фенолоформальдегидный клей (для повышенной водостойкости) или карбамидный клей (для средней водостойкости). Листы фанеры выпускают от минимальных размеров (1200 × 725 мм) до максимальных (2440 × 1525 мм).

Для декоративных целей фанеру оклеивают строганным шпоном, изготовленным из ценных пород древесины (ореха, вяза, груши, яблони и др.).

Древесно-волокнистые, стружечные и опилочные плиты применяют в качестве теплоизоляционных и звукоизоляционных материалов. Их изготавливают из отходов лесопильной и деревообрабатывающей промышленности.

### **Применение древесины в сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве**

Древесные материалы широко применяют в сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве благодаря своим свойствам (малая плотность, удовлетворительная прочность, низкий коэффициент трения, стойкость против абразивного изнашивания, хорошая адгезия поверхности с лакокрасочными материалами, простота изготовления изделий и др.)

Качественные пиломатериалы из хвойных пород используют для изготовления кузовов грузовых автомобилей, прицепов, различных элементов и деталей сельскохозяйственных машин. Для изготовления и ремонта сельскохозяйственных машин и техники широко применяют

древесно-слоистые материалы (фанеру, лигнофоль и др.) и прессованную древесину. Высокой прочностью и устойчивостью против ударных нагрузок обладает армированная фанера, состоящая из листов шпона и металлических листов или из листов шпона и металлической сетки, клеиваемой между листами шпона. Армированная фанера хорошо гнется, штампуются, обрабатывается резанием, склеивается.

*Древесно-слоистые пластики* используют в качестве конструкционного, электроизоляционного и антифрикционного материала для изготовления подшипников, зубчатых колес и других деталей сельскохозяйственных машин и техники. Износостойкость подшипников из ДСП в 4...6 раз больше износостойкости подшипников из бронзы. Износ стальных валов при применении таких подшипников значительно снижается.

## 6. Стекло: неорганическое и органическое

В различных отраслях промышленности, строительстве и других отраслях хозяйства применяются стекла неорганические и органические. **Неорганическое стекло** подразделяется на техническое, строительное и бытовое. В свою очередь строительное стекло делится на конструкционное, отделочное, звуко- и теплоизоляционное. **По качеству поверхности** стекло бывает полированное и неполированное, цветное и бесцветное. **По способу упрочнения** - обычное, отожженное, закаленное и упрочненное химическим или другим способом. По профилю выпускают стекло плоское, волнистое, гнутое и профильное.

**Стекло неорганическое** нашло широкое применение в строительстве: для остекления световых проемов в стенах, фонарей (в крышах различных зданий).

Неорганическое стекло получают при остывании расплава, содержащего чистый кварцевый песок (кремнезем), сульфат натрия и известняк.

Стеклообразующий каркас стекла представляет собой неправильную пространственную сетку, образованную кремнекислородными тетраэдрами  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ . На рисунке 6 показана такая сетка кварцевого и натрийсиликатного стекла.

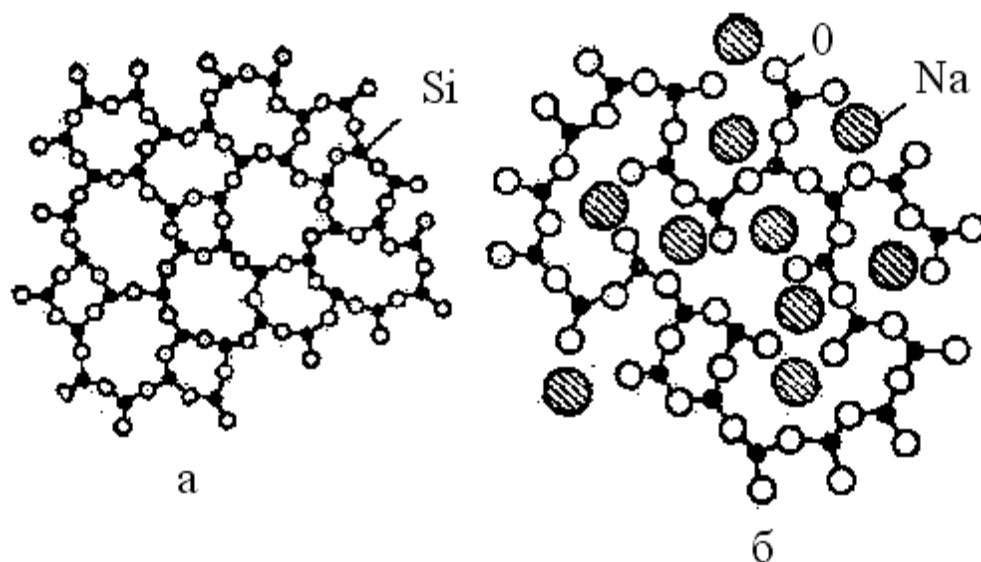


Рисунок 6 - Структура неорганического стекла: а - кварцевого; б - натрийсиликатного

Наибольшее применение для остекления оконных и дверных блоков, перегородок получило стекло оконное листовое 1 и 2 сортов. Плотность этого стекла 2000 - 2600 кг/м<sup>3</sup>, светопропускание - 84 - 87%, теплопроводность низкая. Промышленность выпускает также стекло листовое узорчатое 1 и 2 сортов, бесцветное и цветное с рельефным узором; стекло листовое термически полированное, стекло цветное листовое (красного, синего, зеленого, желтого цветов), гладкое, цветное и бесцветное; с гладкой, рифленой или узорчатой поверхностью; неармированное и армированное стальной сеткой (выпускается 3 типов: швеллерное профильное; коробчатое профильное - с одним или двумя швами; ребристое профильное); стекло листовое, армированное металлической сеткой, - бесцветное и цветное, гладкое и рифленое, узорчатое.

**Органическое стекло** - продукт ненасыщенных полиэфирных смол, прозрачный полимер. Подразделяется на техническое, конструкционное, листовое, светотехническое и часовое. Техническое органическое стекло - пластифицированный и непластифицированный полимер (сополимер) метилового эфира метакриловой кислоты, широко применяемый в различных отраслях промышленности и хозяйства вообще. Стандартом предусмотрены три марки стекла: ТОСП - стекло техническое органическое пластифицированное; ТОСН - стекло техническое органическое непластифицированное; ТОСС - стекло техническое органическое сополимерное.

**Физико-механические свойства технического органического стекла:** температура размягчения (в зависимости от толщины) - 92 - 130 °С, ударная вязкость - 6 - 9 кДж/м<sup>2</sup> (6 - 9 кгс - плотность при 20 °С), прозрачность (при толщине до 30 мм) - 85 - 88 %, усадка перегрева при 40° С в течение 1 ч - 3,5 - 4%, разрушающее напряжение при

растяжении - 60 - 80 МПа (600 - 800 кгс/см<sup>2</sup>), относительное удлинение при разрыве - 2 - 2,5%.

Конструкционное органическое стекло выпускается трех марок: СОЛ - стекло органическое пластифицированное; СТ-1 - стекло органическое непластифицированное и 2 - 55 - стекло сополимерное. Эти марки органического стекла применяются в качестве конструкционного материала в приборо- и агрегатостроении.

## 7. Ситаллы, металлические стекла

**Ситаллы (стеклокерамика)** - стеклокерамические материалы на основе стекла, отличающиеся от последнего кристаллической структурой, подобной керамической, но с более мелкими (от долей до 1 - 2 мкм) кристаллами и более плотной их упаковкой, исключаящую какую - либо пористость материала. Ситаллы изготовляют путем плавления стекольной шихты специальных составов с добавкой кристаллизации, охлаждения расплава до пластичного состояния и формования из него изделий методами стекольной технологии (прессованием, выдуванием, вытягиванием). Отформованные изделия подвергают специальной термической обработке для образования мелкокристаллической плотной структуры, характерной для ситаллов. Ситаллы по химическому составу подразделяют на следующие группы: СТЛ - сподуменовые; СТМ - кордиеритовые; СТБ - борнобариевые и борносвинцовые, высококремнистые, фотоситаллы. Ситаллы марки СТЛ имеют в своем составе литий, марки СТМ - магний. Ситаллы могут быть прозрачные, непрозрачные, белые, кремовые и цветные. **По свойствам** ситаллы делятся на: химически стойкие, износостойкие, оптические, электроизоляционные и теплостойкие. Химически стойкие и износостойкие ситаллы применяют для изготовления дымоходов, плунжеров, деталей химических насосов, реакторов и химической аппаратуры, где необходимы высокая теплостойкость и газожидкостная непроницаемость. При изготовлении синтетических волокон износостойкие ситаллы используют для нитепроводов и некоторых других деталей текстильных машин; кроме того, из них изготовляют приборы для измерения длин и углов различных изделий. Оптические ситаллы с ТКЛР (тепловая стойкость), близким к нулю, применяются прежде всего для изготовления астрономических зеркал и лазеров.

**Электроизоляционные ситаллы** благодаря своим электрическим свойствам, особенно при высоких температурах, используются для изготовления радиотехнических и электронных приборов и установок, различных приспособлений, работающих в условиях переменной температуры и влажности, а также изоляторов, работающих в режиме высокого напряжения. Теплостойкие ситаллы с ТКЛР, близким к нулю, применяются в качестве конструкционных материалов для устройств,



работающих при переменных тепловых нагрузках, а также в производстве теплообменников.

**Металлические стекла** имеют такую же структуру, как у ситаллов, только покрытие металлическое. К основному составу при выработке таких стекол добавляются определенные соединения металлов (которые зависят от назначения и области применения металлических стекол), из которых при заданной температуре в специальной атмосфере (среде плавки) на поверхности стекломассы выделяется металлическое покрытие. Металлические стекла находят применение прежде всего в электротехнике.

Металлические стекла изготавливают и методом горячего напыления на стеклокристаллический материал (например, нанесение слоя алюминия толщиной 0,5 - 1 мм). Такое покрытие выдерживает быстрое изменение температуры, несмотря на значительное различие в ТЛКР алюминия и стеклокристаллического материала.

## 8. Герметики

**Герметики (герметизирующие составы)** применяются практически повсеместно – в машиностроении, строительстве, при различных ремонтных работах. Герметики представляют собой полимерные композиции в виде паст, замазок или жидкостей, которые после нанесения на поверхность сразу или спустя некоторое время густеют в результате вулканизации полимерной основы.

Для приготовления герметиков применяют жидкие синтетические каучуки и специальные добавки. Промышленностью выпускаются герметики разных видов: строительные фасадные, шовно-тиоколовые и акрилатные, строительные каучукосиликоновые, акриловые. В стекольных работах для герметизации стыков в основном применяют тиоколовые герметики 7 - 30М и УТ-31, которые вулканизируются при температуре от +18 °С до +30 °С. В системе ЖКХ широко применяется силиконовый герметик КЛТ-30 для уплотнения резьбовых соединений, работающих в интервале температур от -60 °С до +200 °С.

В последние годы в Россию завозится множество марок герметиков, производимых зарубежными фирмами: DAP, KVADRO, KIMTEC, KRASS.

По сравнению с другими аналогичными материалами герметики обладают влагостойкостью, газонепроницаемостью, долговечностью. Герметики на основе полиизобутилена используются для уплотнения наружных швов между элементами сборных крупнопанельных зданий. Герметики, так же как и резины, относятся к группе эластомеров.

Наиболее широко применяются тиоколовые герметики, для которых характерна универсальность. Промышленность России выпускает следующие марки тиоколовых герметиков:

1) У-30М. Поставляют комплектно в составе пасты - герметика черного цвета У-30, вулканизатора № 9 и ускорителя вулканизации -

дифенилгуанидина, смешиваемых непосредственно перед употреблением в соотношении 100 : 7 : 0,35 массовых частей. Предназначен для герметизации металлических (кроме латунных, медных, серебряных) и других соединений, работающих в среде разбавленных кислот и щелочей, жидкого топлива и на воздухе во всех климатических условиях при температурах от -60 °С до +130 °С;

2) УТ-31 — светло-серая паста У-31, вулканизатор № 9 и ускоритель вулканизации, применяется для герметизации металлических (кроме латунных, медных, серебряных) и других соединений, работающих на воздухе и в среде жидких топлив при температурах от -60 °С до +130 °С и до + 150 °С - кратковременно на воздухе; 3) 51-УТ-36А (с адгезивом) и 51-УТ-36Б (без адгезива) -темно-серая замазкообразная паста У-36, эпоксидная смола Э - 40 (для 51-УТ-36Б) и двухромовый натр в качестве вулканизатора; применяются в приборостроении. Для герметизации различных соединений, швов, работающих при температурах от +200 °С до +300 °С, предназначены теплостойкие силоксановые герметики, изготавливаемые на основе жидких силоксановых каучуков. Марки силоксановых герметиков следующие: эластосил 11-01, силпен ВПТ-2Л, КЛ-4, КЛТ-30, КЛСЕ, ВГО-2, КЛВАЕ и др. Выпускаются также теплоплавостойкие герметики, изготавливаемые на основе фторсодержащих каучуков, следующих марок: ВГФ-1, ВГФ-2, 51-Г-1 и др.

## **9. Лакокрасочные материалы. Состав и обозначение**

Лакокрасочные материалы представляют собой композиции, состоящие из пленкообразующего вещества, растворителей, наполнителей, пигментов и других компонентов, которые после нанесения и сушки образуют на поверхности изделия твердое покрытие.

Основные функции лакокрасочных покрытий: защита металлических поверхностей от коррозии, а некоторых неметаллических материалов (древесины, пластмасс и др.) от увлажнения и гниения, придание им декоративного вида и специальных свойств (электроизоляционных, светоотражательных, тепло-излучательных и др.).

По составу лакокрасочные материалы подразделяются на лаки, эмали, грунты и шпатлевки.

*Лаками* называются растворы природных или синтетических пленкообразующих веществ в органических растворителях. Кроме пленкообразующего вещества, они могут содержать пластификаторы, стабилизаторы и другие функциональные добавки. После нанесения тонкого слоя на поверхность и высыхания лаки образуют прозрачные покрытия. *Эмали* представляют собой суспензии пленкообразующего вещества с пигментами, наполнителями и функциональными добавками. После нанесения на поверхность и высыхания эмали образуют непрозрачные покрытия.

*Грунты* являются основой, которую наносят на окрашиваемую поверхность с целью защиты ее от коррозии, создания хорошей сцепляемости с подложкой и последующими слоями лакокрасочного покрытия. Грунт содержит пленкообразующее вещество и 70...80% пигментов, которые определяют его антикоррозионные свойства. Различают грунты:

1) *пассивирующие*, обладающие свойствами поддерживать поверхность металла под слоем грунта в пассивном состоянии за счет образования прочных оксидных пленок, для чего в его состав вводят в качестве наполнителей хроматы цинка, калия, бария и других элементов;

2) *протекторные*, осуществляющие катодную защиту металла за счет металлических пигментов с меньшим химическим потенциалом по отношению к потенциалу защищаемого материала (цинковая пыль для стали);

3) *изолирующие*, с инертными наполнителями, защищающими поверхность металла за счет плотной пленки, обладающей малой влагонепроницаемостью (битумные грунты, сурик, цинковые белила);

4) *фосфатирующие*, создающие на поверхности металла фосфатную пленку, которая улучшает адгезию и противокоррозионные свойства покрытия.

*Шпатлевки* представляют собой композиции пастообразной консистенции, состоящие из пленкообразующего вещества, наполнителей и пигментов, причем последние составляют до 200% по отношению к массе пленкообразующего. Шпатлевки применяются для выравнивания окрашиваемых поверхностей и исправления мелких дефектов. Толщина наносимого слоя в большинстве случаев не должна превышать 0,4 мм. Для шпатлевок на основе полиуретановых и эпоксидных смол толщина слоя может быть до 1,0 мм. При необходимости устранения более глубоких дефектов нужно наносить несколько слоев шпатлевки, каждый последующий после полного высыхания предыдущего. Основой лакокрасочных материалов являются *пленкообразующие вещества*, способные образовывать тонкие прочные монолитные полимерные пленки. В качестве пленкообразующих применяют различные растительные масла, смолы, эфиры целлюлозы. Для получения лака их растворяют в соответствующих растворителях – летучих органических жидкостях, близких им по полярности. Так, полярные пленкообразователи, содержащие -ОН группы, например фенолоформальдегидные смолы, растворяют в полярных растворителях - спиртах.

*Неполярные и слабополярные пленкообразующие* (высыхающие масла, битумы) растворяют в неполярных и слабополярных растворителях: бензине, скипидаре, уайтспирите и т.д. Растворителями служат органические жидкости, которые не вызывают химических превращений пленкообразующего и испаряются в процессе пленкообразования. В зависимости от температуры кипения различают низко – (ниже 100°C), средне - (100...150°C) и высококипящие (до 250°C) растворители. Многие

лакокрасочные материалы содержат смеси нескольких растворителей.

*Пигменты* придают эмалям цвет и укрывистость, т.е. способность перекрывать цвет подложки.

*Наполнители* вводят в состав эмалей для улучшения их малярно-технических свойств, повышения прочности, влаго-, свето-, термостойкости и др., а также с целью экономии пигментов. В качестве наполнителей используются неорганические тонкодисперсные порошки – мел, тальк, синтетические продукты. *Пластификаторы* улучшают технологические свойства лакокрасочного материала, расширяя область его высокоэластического состояния. Довольно часто для этих целей используют дибутилфталат (ДБФ).

*Сиккативы* ускоряют высыхание лаков и эмалей, приготовленных на основе растительных масел. Они представляют собой линолеаты, резинаты, нафтенаты кобальта, марганца, свинца, реже цинка, кальция и других элементов. *Стабилизаторы* замедляют окисление, деструкцию и другие процессы, ухудшающие физико-механические свойства покрытий. В зависимости от пленкообразующего вещества лакокрасочные материалы подразделяются на *смоляные*, *эфироцеллюлозные* (нитроцеллюлозные и этилцеллюлозные), *маслосодержащие* (битумно-масляные), *канифольные* и др. Маркируют лакокрасочные материалы знаками пяти групп. Первая группа знаков определяет вид лакокрасочного материала (пишется обычным словом) «лак», «эмаль», «грунт», «шпатлевка». Вторая группа характеризует пленкообразующее вещество (основу лакокрасочного материала) и обозначается обычно двумя буквами: КТ - канифольное, БТ - битумно-масляное, ГФ - глифталевое, ПФ - пентафтальное, ФА - фенольно-алкидное, КЧ - каучуковое, АК, АС - полиакриловое, ВА - поливинилацетатное, МА - масляное, НЦ - нитро-целлюлозное, ХВ, ХС - перхлорвиниловое и др. Третья группа определяет категорию, к которой относится лакокрасочный материал по его преимущественному назначению, и обозначается цифрой: 1 - атмосферостойкий; 2 - стойкий внутри помещения; 3 - радиационностойкий; 4 - водостойкий; 5 - специальный (для кож, резин, светостойкий и т.д.); 6 - маслобензостойкий, 7 - стойкий к химическим средам; 8 - термостойкий; 9 - электроизоляционный; 0 - грунтовка; 00 - шпатлевка.

Четвертая группа определяет порядковый номер, присвоенный данному составу эмали, пятая группа - цвет, например черный. По условиям эксплуатации лакокрасочные покрытия подразделяются на стойкие внутри помещения (П) при температуре  $25\pm 10^{\circ}\text{C}$  и влажности  $65\pm 15\%$ ; атмосферостойкие (А) при температурах от  $-60$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ , влажности до  $95\%$  при  $25^{\circ}\text{C}$ , допускается морской туман и загрязнение промышленными газами; химически стойкие в агрессивных парах и газах (Х); стойкие к воздействию кислот (ХК) и щелочей (ХЩ); водостойкие (В); стойкие в морской воде (ВМ); термостойкие (Т350), внизу указана допускаемая температура эксплуатации,  $^{\circ}\text{C}$ ; маслостойкие (М); бензостойкие (Б); электроизоляционные (Э). Условия эксплуатации указываются после

обозначения типа лакокрасочного материала, например эмаль ПФ-28 черная ПХК. Так как основные свойства лакокрасочных материалов и покрытий определяются пленкообразующими веществами, далее рассматривается классификация по этому признаку.

### **Маслосодержащие лакокрасочные материалы**

Пленкообразующими веществами являются растительные масла, чаще всего совмещенные со смолами и битумами. Растительные масла по химическому составу представляют собой сложные эфиры глицерина и предельных и непредельных жирных кислот – глицериды. По способности высыхать растительные масла делят на три группы.

1. *Высыхающие* (льняное, тунговое) – содержат 75...85% непредельных жирных кислот. При  $20\pm 2^\circ\text{C}$  высыхают за 6...7 суток.

2. *Полувысыхающие* (подсолнечное, ореховое) – сохнут медленно. Непредельных кислот в них 55...75%.

3. *Невысыхающие* масла (касторовое, оливковое) – не сохнут в нормальных условиях. Содержание непредельных кислот составляет до 10%.

Высыхание происходит за счет присоединения кислорода воздуха по месту двойных связей, т.е. такие масла относятся к термореактивным пленкообразователям. Для ускорения сушки применяют нагрев до  $100^\circ\text{C}$  и катализаторы (сиккативы) в виде оксидов поливалентных металлов (свинца, марганца, кальция). Время отверждения снижается с 7 суток до 24 часов.

*Масляные* лакокрасочные покрытия не размягчаются при нагревании, не растворяются в воде, стойки к воздействию трансформаторного масла даже при нагревании, однако набухают в воде и при длительном их взаимодействии. Для пропитки тканей, лакобумаг и обмоток трансформаторов используют в чистом виде смесь масел с битумами и смолами. *Битумы* представляют собой смесь углеводородов различной консистенции. В лакокрасочной промышленности применяются в основном тугоплавкие битумы с температурой плавления  $125...150^\circ\text{C}$ .

*Масляно-битумные* (МА) покрытия относятся к покрытиям горячей сушки. Пленки их обладают высокой влагостойкостью к действию кислот, но они не маслостойки. Теплостойкость покрытий составляет до  $130^\circ\text{C}$ , электрическая прочность  $E_{\text{пр}} = 65 \text{ кВ/мм}$ . Применяются для электроизоляции, пропитки обмоток электрических машин, трансформаторов, катушек, лакотканей, защитных покрытий.

*Масляно-глифталевые* (ГФ) (в лакокрасочной промышленности их называют глифталевыми) покрытия более теплостойки (до  $155^\circ\text{C}$ ), эластичны, стойки к тепловому старению и имеют более высокую адгезию, чем масляные. Сушка покрытий производится при температуре  $100...150^\circ\text{C}$ . Их применяют для пропитки обмоток электрических машин, трансформаторов, склейки слюды малогабаритных статоров и якорей, для защитных покрытий приборов и машин, работающих в помещении, в

атмосферных условиях в умеренном поясе и в тропиках.

*Масляно-пентафталевые* (ПФ) покрытия имеют высокие электроизоляционные свойства, по механическим свойствам и скорости сушки превосходят глифталевые.

*Водоэмульсионные лаки* (аквалиты) представляют собой эмульсию из диспергированных в воде масляных и других лакокрасочных композиций. Преимущество их перед другими лакокрасочными материалами – исключение из состава огнеопасных и токсичных растворителей. Сушка ведется при повышенных температурах. Эти лаки применяются для окраски автомобилей, пропитки обмоток электрических машин и трансформаторов.

### **Смоляные лаки и эмали**

*Полихлорвиниловые смолы* (ПХВ) являются полярными, поэтому электроизоляционные свойства их невысоки. Они негорючи, стойки к действию кислот и щелочей, хлору, аммиаку, однако имеют низкую адгезию к металлам, невысокую теплостойкость (до 80°C) и плохую растворимость. Для повышения адгезии и улучшения растворимости ПХВ хлорируют. Смолы с содержанием хлора до 65...60% называются *перхлорвиниловыми* (в ПХВ хлора 56%). Время высыхания слоя лакокрасочного материала на их основе составляет 2...3 ч при 18°C. Возможно нанесение их путем распыления. К недостаткам перхлорвиниловых покрытий можно отнести изменение цвета под влиянием атмосферы и большой удельный расход лакокрасочного материала. Применяют эти смолы для покраски приборов, работающих в условиях агрессивных сред и тропиков. В авиации широко используют лаки КС-77, КС-76, эмали ХВ-1100, ХВ-110, ХС-710 для окраски алюминиевых и магниевых сплавов. *Кремнийорганические лаки* длительно сохраняют свои свойства при температурах до 200 °С, наполненные диоксидом титана, оксидом сурьмы – до 260°C, а с оксидом алюминия (пудрой) - до 550°C; химически инертны, обладают очень высокой водомаслостойкостью, бензостойки, а также стойки к действию растворов солей, озона, плесени, обладают хорошими диэлектрическими свойствами. К их недостаткам можно отнести низкую адгезию, необходимость сушки при повышенных температурах, а также невысокую прочность. Для улучшения адгезии кремнийорганические лаки модифицируют полиэфирами. Кремнийорганические лаки нашли широкое применение в качестве электроизоляционных материалов для изделий с повышенной температурой эксплуатации. Например, лак КО-08 сохраняет диэлектрические свойства до температуры 350°C. Допускаемая температура 400°C для лака КО-814. До 500°C выдерживают покрытия на основе лаков КО-88 и КО-813. *Органосиликатный лакокрасочный материал* ВН-30ДТС представляет собой суспензию измельченных силикатов и оксидов металлов в толуольном растворе кремнийорганических полимеров. Высыхают покрытия за 24 ч при 15...35°C. Температура эксплуатации от -60 до +300°C. Применяют эти

материалы для окраски металлических и неметаллических поверхностей, опор контактных сетей и линий электропередач, электрофильтров, защиты деталей радиоаппаратуры от атмосферной коррозии. Срок службы – не менее 12 лет.

*Нитроцеллюлозные лаки и эмали* получили широкое применение благодаря быстрому высыханию, что способствует созданию поточных методов окрашивания массовых изделий с образованием пленки с хорошими диэлектрическими свойствами, высокими твердостью, бензо- и маслостойкостью и удовлетворительной атмосферостойкостью. Недостатками покрытий являются пониженная адгезия, невысокая термостойкость и легкая воспламеняемость. Для металлических поверхностей, эксплуатируемых в холодном, умеренном и тропическом климате, применяют эмали НЦ-11, для работы в атмосферных и других условиях - НЦ-132. Долговечность покрытий обычно составляет 2...3 года.

Эпоксидные лаки и эмали обладают высокой адгезией, малой пористостью, хорошей атмосферостойкостью, влаго- и термостойкостью (от -60 до +200°C). Устойчивы к действию щелочей и кислот средней концентрации.

Выпускаются обычно в виде 2-компонентных композиций:

собственно лак или эмаль и отвердитель, вводимый непосредственно перед употреблением (отвердители - полиамины, фенолы и др.). Покрытия обладают хорошими электроизоляционными свойствами. Применяются эти материалы для электроизоляции проводов, окраски металлических поверхностей приборов и электроаппаратуры, эксплуатируемых в различных климатических условиях. Для тропических условий используют эпоксидно-меламиновые эмали. *Полиуретановые лаки* отличаются хорошей адгезией к металлам, высокой атмосферостойкостью. Благодаря хорошим электроизоляционным свойствам, водо- и теплостойкости они получили широкое применение для эмалирования проводов, пропитки хлопчатобумажной и стекловолокнистой изоляции. *Полиамидные покрытия* стойки к действию тепловых ударов от -190 до +340°C, обладают длительной термостойкостью при температуре до 260°C, кратковременной - до 500°C, высокими физико-механическими свойствами, устойчивы к действию растворителей, стойки к кислотам, но разрушаются в щелочах, обладают хорошими диэлектрическими свойствами, мало изменяющимися в диапазоне температур до 300°C. Могут работать в вакууме до 10<sup>-7</sup> - 10<sup>-8</sup> Па при температурах до 370°C, негорючи.

Используют полиимидные лакокрасочные материалы для электроизоляции электродвигателей, работающих при температурах до 250°C, окраски самолетов и др.

Покрытия на основе *акриловых смол* (АК, АС) эластичны, стойки к ударным нагрузкам, обладают хорошей адгезией к металлам, сохраняют свои свойства при работе в условиях 98...100% влажности при температуре 55...60°C. При наличии эпоксидного грунта стойкость покрытия составляет

до 3-6 лет.

*Полиэфирные лакокрасочные материалы* имеют высокую твердость, хороший блеск, удовлетворительную стойкость к истиранию, но малоэластичны, нестойки к ударным нагрузкам, обладают низкой адгезией к металлам и применяются в основном для окраски древесины.

*Органодисперсные покрытия.* Органодисперсии – это двухфазные системы, состоящие из коллоидных частиц полимера – пленкообразователя (химически стойкого полимера) и жидкой среды (органической жидкости). В результате термообработки удаляются жидкие компоненты, а полимерные частицы спекаются, образуя покрытие. Широко применяются ПВХ и его сополимеры. Фторсодержащие органодисперсии (из фторлаков) отличаются тепло- и морозостойкостью (от -196 до +260°C), химической стойкостью, электроизоляционными свойствами. Покрытия гидрофобны, антиадгезионны и антифрикционны. Покрытия на основе поливинилиденфторида обладают большой химо- и атмосферостойкостью, устойчивы к истиранию, износу, эрозии под действием песка, пыли, не воспламеняются. Срок службы до 30 лет.

## 10. Травильные материалы

Химическое удаление окалина и ржавчины с поверхности металла основано преимущественно на их растворении, иногда с применением электрического тока.

Окалина с поверхности стали удаляется обычно травлением в кислотах. Чаще всего применяют серную, реже соляную кислоты. При растворении стали в кислотах образуется соль закисного железа и водород:  $Fe + H_2SO_4 = FeSO_4 + H_2$ .

Образующийся водород создает на поверхности металла небольшие пузырьки, которые своим давлением отрывают окалину от основного металла (растворение окалина в кислоте является второстепенным процессом). Для снижения потери металла и предотвращения диффузии водорода в металл (появляется водородная хрупкость) используют раствор кислоты и добавление ингибиторов, а также ограничивают время травления и температуру раствора. Для травления стали применяют 5...20 % -ную серную кислоту, в которую добавляют ингибитор S<sub>9</sub> в концентрации 8 г/л или ингибитор DBS - 1 г/л раствора. Температура раствора составляет 30...40°C, время травления 10...20 мин, предельно допустимое содержание железа в растворе - 90 г/л. После травления детали промывают в 0,5...1% -ном растворе соды.

При травлении соляной кислотой получают более чистую поверхность. Концентрация раствора составляет 10...20% соляной кислоты, 8 г ингибитора S<sub>9</sub> на 1 л раствора, процесс протекает при нормальной температуре, время травления 10...20 мин.

Травление в фосфорной кислоте имеет ряд преимуществ по сравнению



с серной и соляной кислотами: меньше опасность перетравления, отсутствует надобность в ингибиторах, поверхность после травления менее склонна к коррозии (на поверхности образуется тонкая пленка фосфатов). Температура и концентрация раствора такие же, как и при травлении в серной кислоте. Травление может осуществляться не только погружением, но и натиранием деталей (для крупных конструкций). В отличие от травления стали при травлении чугуна встречаются две трудности: остатки песка на поверхности отливок и пористость чугуна. Единственной кислотой, способной растворять кремнистые соли и песок, является плавиковая кислота. Применяют раствор, содержащий 10% соляной кислоты и не более 10% плавиковой. После травления применяют нейтрализующую промывку в 1%-ном растворе соды в течение 5 мин. Для травления высоколегированных сталей применяют водный раствор, содержащий 13% соляной, 4% серной и 9% азотной кислот, рабочая температура до 85°C. Зачастую серную кислоту заменяют фосфорной или плавиковой кислотами (до 10%). Для травления меди и ее сплавов используют следующие составы на 1 л воды: 160 г концентрированной серной кислоты, 50 г хромпика, температура до 80°C; 100 г концентрированной серной кислоты и 100 г сернокислого железа, температура 50...80°C. При опаливании (детали погружают на короткое время в крепкий раствор смеси кислот) применяют следующие растворы: 3 л концентрированной азотной кислоты, 1 л воды, 110 г поваренной соли; для заключительного чистового опаливания – концентрированные азотная и серная кислоты в пропорции от 1:2 до 2:1 и небольшое количество калиевого хромпика или хромовой кислоты (около 1%). Травление алюминия производится в 10...20%-ном растворе едкого натра при температуре 50...80°C на протяжении 2 мин. При травлении интенсивно выделяется водород, отделяющий с поверхности нерастворимые загрязнения. Для улучшения внешнего вида деталей и более равномерного хода травления на 100 г едкого натра добавляют 20 г поваренной соли или 20...50 г фтористого натрия. После травления для осветления поверхностей деталей применяют кратковременное погружение в концентрированную или разбавленную до 50% азотную кислоту (иногда с добавлением 25% плавиковой кислоты). Для травления алюминия также применяют растворы кислот: на 1 л воды - 65 г хромового ангидрида, 350 г серной кислоты; на 1 л воды - 175 г хромового ангидрида, 35 г серной кислоты, время травления 0,5...2 мин, температура раствора 60...70°C. Перед травлением детали обезжиривают. Сплавы алюминия, содержащие марганец, травятся в течение 2...5 мин при комнатной температуре в водном растворе 8% плавиковой и 13% азотной кислот.

Перед нанесением органических покрытий после травления алюминиевые сплавы погружают на 5...10 мин (или протирают) в раствор, содержащий 10% фосфорной кислоты, 40% бутилалкоголя, 30% изопропилалкоголя, 20% воды. После травления производят промывку и сушку деталей. Для травления магния и его сплавов используют слабые

растворы (7...10%) любых кислот, кроме плавиковой, с погружением деталей на несколько секунд, последующей промывкой и просушкой. Для травления магния наиболее подходит хромовая кислота. Для этого применяют 15% - ный раствор хромового ангидрида в дистиллированной воде при температуре 90...100°C, время погружения 1...5 мин.

Хорошую очистку стальных деталей от продуктов коррозии можно достичь в растворах травления с применением электрического тока, при этом используют в основном два способа электролитического травления: травление в щелочном цианистом электролите и анодное травление в серной кислоте. При травлении в щелочном цианистом электролите направление тока постоянно изменяют, т.е. деталь попеременно становится то анодом, то катодом. Достоинством этого метода является абсолютное удаление с поверхности стали продуктов коррозии независимо от наличия на поверхности остатков жировых загрязнений. Время травления составляет 10...60 мин. Состав электролита в г/л: 30...10 NaOH, 20...50 NaCN, 10 NaCl. Температура раствора 45°C, плотность тока 3...6 А/дм<sup>2</sup>, режим чередования 45...50 с деталь катода, 10...15 с - анода, противоположным электродом является стальная пластина. Анодное травление стальных деталей в растворе серной кислоты осуществляется непосредственно перед их защитным покрытием с целью улучшения адгезии. Время травления может составлять от нескольких секунд до 2 мин и зависит от плотности тока (до 20 А/дм<sup>2</sup>), температуры раствора, концентрации раствора (до 70%). Травление производят в ванне, футерованной свинцом, катодный электрод также свинцовый.

## **ТЕХНОЛОГИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **1. Способы получения изделий из пластмасс**

В автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении применяют много способов получения различных деталей из пластмасс. Выбор способа переработки пластмасс зависит от природы полимерного материала, требуемых показателей физико-механических, диэлектрических и других свойств деталей.

Пластмассы могут находиться в вязкотекучем, высокоэластичном и твердом состоянии, поэтому способы переработки пластмасс в изделия выбирают в зависимости от физического состояния пластмасс.

**Прямое горячее прессование** заключается в приложении внешнего давления к пресс-материалу, находящемуся в вязкотекучем состоянии в замкнутой пресс-форме. После отверждения и снятия давления готовое изделие извлекают из пресс-формы (рисунок 7).

Для получения деталей из термореактивных пластмасс требуется определенное давление при одновременном нагреве пресс-материала до вязкотекучего состояния. Отверждение пресс-материала происходит в

результате полимеризации. Для изготовления деталей из термопластичных пластмасс требуется последующее охлаждение для сохранения формы изделий.

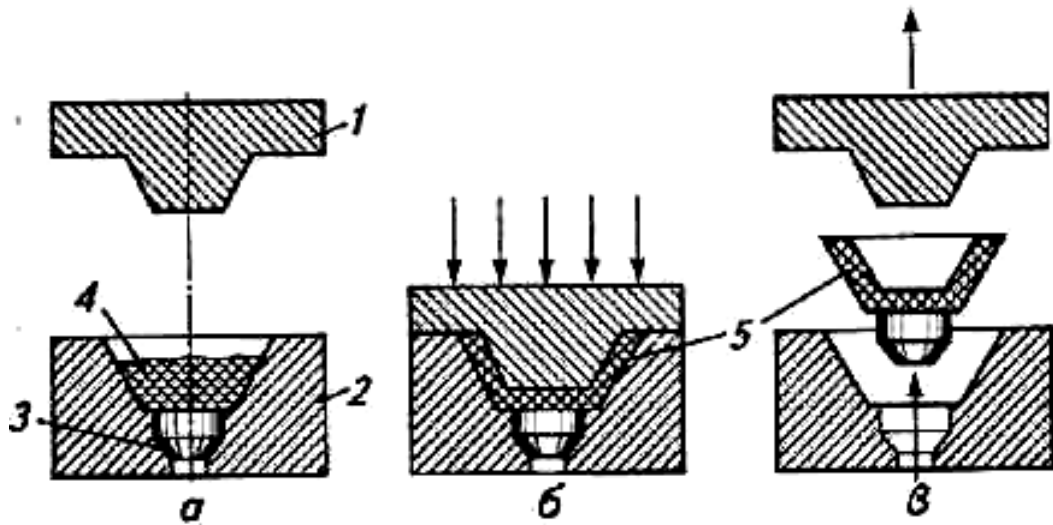


Рисунок 7 - Схема изготовления деталей из пластмасс методом горячего прессования: а - исходное положение; б - прессование; в - удаление из пресс-формы; 1 - пуансон; 2 - матрица; 3 - толкатель; 4 - пресс-материал; 5 - изделие

Пресс-материал 4 загружают в нагретую до 130...200°C пресс-форму, состоящую из пуансона 1 и матрицы 2. Под действием температуры и давления 10...15 МПа пресс-материал размягчается и заполняет полость формы. После выдержки пресс-материала в пресс-форме и его отверждения пресс-форму раскрывают и извлекают из нее изделие 5.

**Литье под давлением** применяют для получения изделий из термопластичных пластмасс в специальных литьевых машинах. Этот высокопроизводительный технологический процесс позволяет применять комплексную механизацию и автоматизацию. Цикл изготовления изделий длится 5...20 с. Для снижения давления формообразования формование изделий проводят при максимально допустимой температуре.

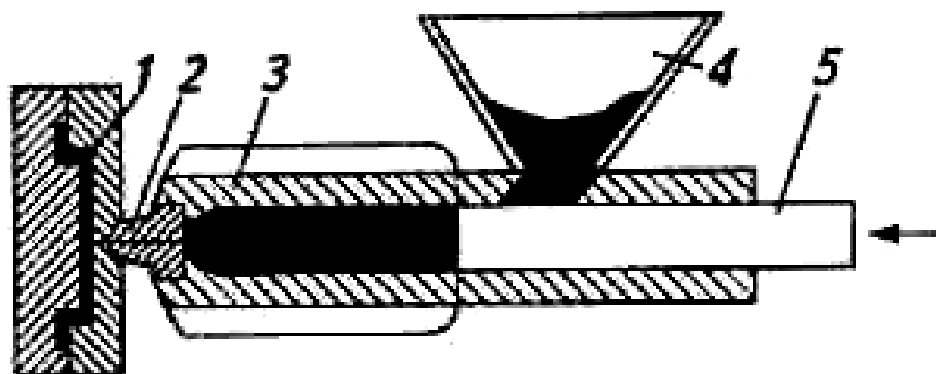


Рисунок 8 - Схема машины для литья под давлением деталей из пластмасс: 1 - пресс-форма; 2 - сопло; 3 - цилиндр; 4 - бункер; 5 - плунжер

Пластический материал в виде порошков или гранул из бункера 4 поступает в цилиндр 3 литейной машины (рисунок 8). В стенке цилиндра имеется электронагреватель, посредством которого материал нагревается до необходимой температуры. В цилиндре пластический материал переходит в полужидкое состояние и под действием плунжера 5 через сопло 2 поступает в полость пресс-формы.

После затвердевания термопласта пресс-форма разъединяется и изделие толкателями удаляется из полости пресс-формы. Литьем под давлением можно получать изделия сложной формы, с разной толщиной стенок, с ребрами жесткости, с резьбой и т. д.

**Литьевое прессование** используют для получения тонкостенных сложных изделий из пластмасс с глубокими полостями и отверстиями, повышенной точностью размеров, а также армированных деталей.

Особенность данного способа заключается в том, что полость пресс-формы отделена от загрузочной камеры 2 и пуансон 1 выдавливает размягченный термопласт через литниковый канал в полость пресс-формы (рисунок 9).

При литьевом прессовании нагреву подвергают загрузочную камеру, температура в которой должна превышать температуру пресс-формы на  $35...50^{\circ}\text{C}$ . Прессование производится под большим давлением ( $100...200$  МПа).

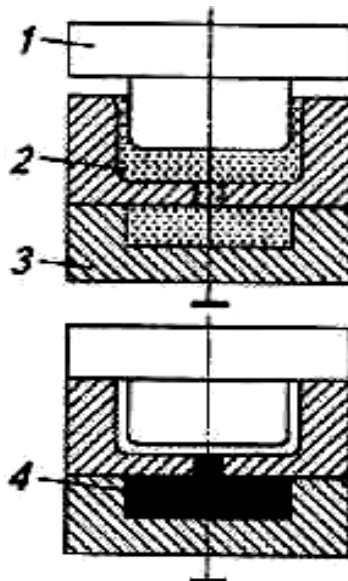


Рисунок 9 - Схема литьевого прессования деталей из пластмасс: 1 - пуансон; 2 - загрузочная камера; 3 - матрица; 4 - деталь

**Центробежное литье** применяют для производства крупногабаритных изделий, имеющих форму тел вращения (труб, втулок, зубчатых колес, шкивов и др.), из термопластичных материалов. Таким способом получают изделия из пластмасс на основе полиамидных смол и капролактанов.

Исходный материал расплавляется в специальных установках-дозаторах, установленных на машинах для центробежного литья.

Расплавленную массу заливают определенными порциями в металлическую изложницу, закрепленную в патроне или на планшайбе машины для центробежного литья. Расплавленная масса под действием центробежных сил прижимается к внутренней поверхности вращающейся изложницы и затвердевает.

Центробежные силы не только формируют заданные форму и размеры изделия, но и уплотняют его, что приводит к повышению качества изделий.

Преимущества пластических масс, обусловившие их широкое применение в автотракторном, сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве:

- малая плотность (1,1...1,8 г/см<sup>3</sup>) пластмасс по сравнению с различными металлами и сплавами, вследствие чего значительно уменьшается масса машин при изготовлении их деталей из пластмасс;

- высокая химическая стойкость в атмосфере, в среде кислот и щелочей;

- высокая удельная механическая прочность и возможность создания анизотропных композиционных материалов;

- высокие антифрикционные свойства пластмасс (текстолит, капрон, капролон и др.) позволяют успешно использовать их в Подшипниках скольжения вместо бронзы и баббита;

- фенопласты с асбестовыми наполнителями и другие специальные пластмассы широко используют в качестве фрикционных материалов в узлах трения взамен дорогостоящих чугунов и порошковых композиционных сплавов;

- высокие электроизоляционные свойства, которые позволяют применять пластмассы для различных деталей электрооборудования сельскохозяйственных машин и техники;

- высокая технологичность и низкая трудоемкость изготовления различными способами.

Из пластмасс изготавливают корпуса различных приборов, панели, рукоятки, детали зажигания автотракторного электрооборудования, платы печатных схем, электроизоляционные детали, резьбовые соединения, детали машин с повышенной водостойкостью и химической стойкостью, подшипники скольжения, тормозные колодки и диски, детали насосов, краны, трубы, зубчатые колеса и т. д.

Полимерные материалы используют в ремонтном производстве для восстановления изношенных посадочных мест подшипников качения.

Краски, лаки, эмали, различные пасты, клеи, герметики, широко используемые при изготовлении и ремонте автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин и другой техники, получают на основе различных полимерных синтетических материалов.

Различные антикоррозионные покрытия, применяемые в автотракторном, сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве, выполняют на основе полимерных материалов.

## Обработка резанием материалов на основе полимеров

Придание материалам на основе полимеров соответствующей конструкционной формы с помощью прессования, литья, штамповки и других методов формования не всегда возможно, что связано с усложнением конструкций пресс-форм и самих процессов формирования. Поэтому возникает необходимость в механической обработке (сверление отверстий, выборка пазов, образование поверхностей соприкосновения и др.). Большинство материалов на основе полимеров хорошо поддается обработке резанием и выполняется на обычном металлорежущем оборудовании. Однако скорость резания и скорость подачи, а также инструмент для их обработки должен быть несколько видоизменен в зависимости от свойств обрабатываемого материала. Следует учитывать также и температурный режим в зоне резания, так как возможны деформирование деталей, деструкция материала, выделение вредных газообразующих продуктов и пыли.

*Токарная обработка деталей из пластмасс* обычно ведется на универсальных металлорежущих станках и токарных автоматах при высоких скоростях резания, но со снятием тонкой стружки. В большинстве случаев охлаждающую жидкость не применяют, однако при обработке термопластичных материалов допустимая температура в зоне резания не должна превышать 100...120°C, а для терморезистивных - 200...300°C. Следует учитывать, что температура в зоне резания определяется не только скоростью резания, величиной подачи, глубиной резания, свойствами обрабатываемого материала, но и правильностью и качеством заточки режущего инструмента и свойствами материала режущего клина.

При токарной обработке деталей из пластмасс применяются резцы, режущий клин которых изготовлен из быстрорежущей стали (марок P9, P12, P6M3, P10K5Ф5 и др.), твердых сплавов (BK4, BK8, T15K6 и др.), минералокерамики (ЦМ332), кубического нитрита бора (эльбор) и алмазов, т.е. тех материалов, которые имеют высокую теплостойкость и теплопроводность.

*Токарные резцы* для обработки пластмасс отличаются от аналогичных для обработки металлов углами заточки. При обработке пластмасс необходимо увеличивать задний угол  $\alpha$  резца до 15...25°, так как вследствие высоких упругих свойств пластмасс увеличивается площадь контакта резца с деталью, что приводит к быстрому износу режущей кромки резца и повышенному тепловыделению. Для материалов со сливной стружкой, например, как у термопластов, оптимальный передний угол  $\gamma$  резца находится в пределах 10...20°. При обработке терморезистивных материалов с ломкой стружкой передний угол  $\alpha$  выбирают в пределах 0...5°, а вершину резца выполняют с радиусом 1,5...3,0 мм. Главный угол для проходных

резцов составляет  $45^\circ$ , а вспомогательный  $0...5^\circ$ , угол наклона режущей кромки  $\lambda = 0^\circ$ .

*Скорость резания* выбирают исходя из обрабатываемого материала и типа режущего инструмента. Для термопластов, обрабатываемых быстрорежущими резцами, скорость резания выбирается в диапазоне 600...900 м/мин, а при обработке резцами из инструментальной углеродистой стали - до 100 м/мин. Подача при черновой обработке составляет 0,3...0,6 мм/об, при чистовой 0,05...0,2 мм/об. При обработке термореактивных материалов с дисперсными наполнителями скорость резания, в зависимости от вида пластмасс, выбирается в диапазоне 100...500 м/мин. Подача до 0,3 мм/об. Слоистые пластики типа текстолита и гетинакса обрабатывают быстрорежущими резцами при скоростях резания 50...120 м/мин и твердосплавными - при скоростях 200...300 м/мин и подаче 0,1...0,3 мм/об. Пластики, наполненные стекло- и асболоволоком, углеграфитными и борными волокнами, обрабатывают твердосплавными резцами при скоростях 125...150 об/мин. Применение алмазного инструмента позволяет повысить скорость резания до 1300 м/мин при подаче 0,05 мм/об и глубине резания до 1 мм.

От *режимов обработки* зависит не только производительность процесса, но и шероховатость поверхности, на которую наибольшее влияние оказывает подача. Чем меньше подача, тем меньше высота микронеровностей. При обработке термопластов устойчиво получается шероховатость в пределах  $Ra\ 2,5...10$ , а при чистовом –  $Ra\ 0,63...1,25$  мкм. При обработке термореактивных материалов шероховатость достигается в пределах  $Ra\ 2,5...10$  мкм. Меньшей шероховатости можно достичь лишь при обработке алмазным инструментом. Его целесообразно применять для обработки оргстекла с целью получения полной прозрачности обрабатываемой поверхности.

**Фрезерование пластмасс.** Фрезерованием обрабатываются обычно кромки для последующей стыковки отдельных деталей, листов, реже для дополнительной обработки сложных контуров на уже сформированной детали.

Фрезерование пластмасс осуществляется на обычных горизонтально- или вертикально-фрезерных станках, оснащенных специальными устройствами для улавливания и отсоса стружки и пыли, а также различными зажимными приспособлениями и устройствами.

Обработка ведется цилиндрическими или коническими фрезами со специальным спиральным зубом и углом наклона главных режущих кромок к оси фрезы  $\omega = 20...25^\circ$ , торцевыми и фасонными фрезами.

*Фрезы для обработки пластмасс*, в отличие от фрез для обработки металла, должны иметь по возможности меньшее число зубьев, так как при этом увеличивается объем стружечных канавок, большие задние углы, простую форму передней поверхности. Большой угол наклона главных режущих кромок к оси фрезы выполняется с целью обеспечения плавности работы и снижения ударной нагрузки на режущие кромки зубьев.

Передний угол обычно выбирается в диапазоне 10...15°, задний - 10...25°.

При обработке термопластичных материалов угол наклона зубьев к оси фрезы выбирается равным 20...25°, при заточке допускается фаска на задней поверхности зубьев размером до 0,03 мм. Фрезерование деталей из термопластов производится при скоростях 300...900 м/мин, а реактопластов - 80...200 м/мин, глубина резания рекомендуется не более 2,5...3,0 мм. Охлаждение зоны резания производится струей воздуха, в отдельных случаях используют эмульсии. Фрезы изготавливаются из быстрорежущей стали или из твердых сплавов.

Для обработки реактопластов используют фрезы из быстрорежущей стали или с твердосплавными пластинами. Применяют обычно фрезы с углом наклона спирали 45...50°,  $\alpha = 16...25^\circ$ ,  $\gamma = 5...8^\circ$ . Использование фрезы с наклонным зубом обеспечивает плавность ее врезания в материал и уменьшает количество пыли при обработке наполненных пластмасс.

При обработке слоистых пластиков фрезерованием следует применять специальные фрезы из быстрорежущих сталей с меньшим числом зубьев, чем для металла (обычно 5), с углом наклона главной режущей кромки  $\omega = 55^\circ$ , чтобы направление вращения фрезы совпадало с направлением подачи во избежание расслаивания и сколов материала. Скорость резания выбирают в диапазоне 50...400 м/мин, подача 0,04...0,5 мм/зуб. Слоистые пластики, армированные стекло- и асболовном, углеродными волокнами, рекомендуется обрабатывать фрезами с твердосплавными пластинами при скоростях резания 125...300 м/мин и подачах 0,1...0,3 мм/зуб. При хлопчатобумажных наполнителях -  $v = 300...500$  м/мин и  $s = 0,3...0,5$  мм/зуб. На прорезных фрезах необходимо заточить режущие кромки и по торцу, что снижает трение и улучшает тепловой режим резания.

Плоскости и уступы обрабатываются торцовыми фрезами с твердосплавными пластинами со следующими углами заточки:  $\alpha = 20...25^\circ$ ;  $\gamma = 0...16^\circ$ ;  $\square = 45...90^\circ$ ;  $\lambda = 0^\circ$ . Скорость резания для термопластов составляет 200...500 м/мин, для реактопластов стеклонаполненных 40...400 м/мин, других 200...600 м/мин. Подача для термопластов выбирается в диапазоне 0,3...0,6 мм/зуб, для реактопластов стеклонаполненных 0,03...0,2 мм/зуб, содержащих другие наполнители 0,2...0,7 мм/зуб.

Для обработки фасонных поверхностей деталей применяются фасонные фрезы. При обработке слоистых материалов такими фрезами рекомендуется скорость резания не более 200 м/мин при подаче 0,03...0,08 мм/зуб.

**Сверление.** Сверление может быть как окончательной операцией, так и предварительной перед зенкерованием, развертыванием и нарезанием резьб. В качестве режущих инструментов используют перовые и спиральные сверла из быстрорежущей стали, сверла с твердосплавными пластинами, алмазные сверла, вырезные резцы.



Отверстия большого диаметра в листовом материале могут вырезаться специальным циркульным резцом (рисунок 10). Сначала сверлится малое отверстие для фиксирования хвостовика инструмента, а затем производят вырезание отверстия необходимого диаметра. При сверлении в пластмассах необходимо учитывать сужение отверстий после обработки на 1..2% вследствие высоких упругих свойств материалов. Соответственно необходимо выбирать сверло большего диаметра. Кроме того, для уменьшения трения ширину направляющей ленточки сверла необходимо делать не более 0,5 мм.

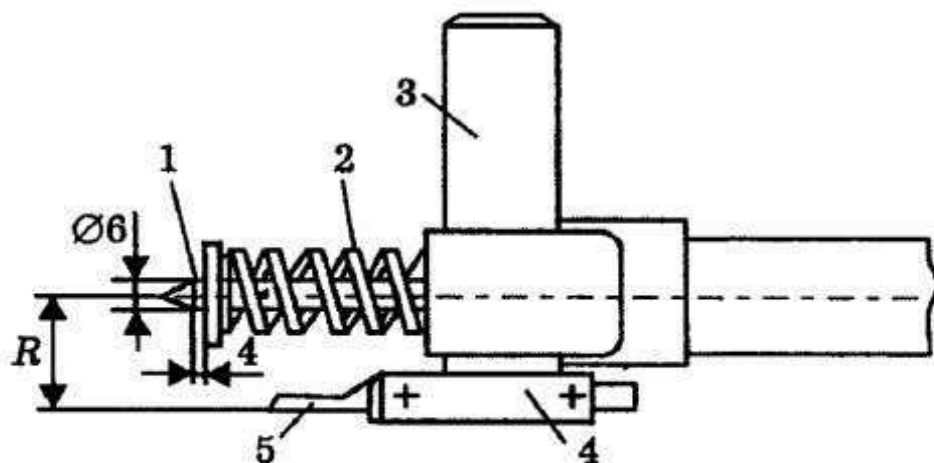


Рисунок 10 - Циркулярный резец: 1 - хвостовик; 2 - пружина; 3 - траверса; 4 - резцедержатель; 5 - резец

Во избежание выламывания или выкрашивания пластмасс на выходе сквозное сверление нужно производить на гладких прокладках из более мягкого материала, например, из древесины. При глубине сверления более 2,5 диаметров отверстия необходимо периодически извлекать сверло из отверстия для удаления стружки и охлаждения. Желательно охлаждение производить сжатым воздухом. Для лучшего удаления стружки сверло должно иметь больший угол  $\omega$  (15...17°) и широкую стружечную канавку с полированной поверхностью.

Во избежание выкрашивания материала в процессе обработки тонкостенных и полых деталей, а также листового материала из термопластичных материалов применяют сверла с углом при вершине  $2\phi = 55...60^\circ$ , а для сверления оргстекла – с двойным углом заточки  $2\phi_0 = 70^\circ$ ,  $2\phi = 130...140^\circ$  (рисунок 11).

Сверление осуществляется при скорости резания 40...50 м/мин и подаче 0,05...0,1 мм/об. Лист необходимо зажимать в тисках или между прижатыми пластинами во избежание расслоения. Подача и скорость резания выбираются в зависимости от типа пластика.

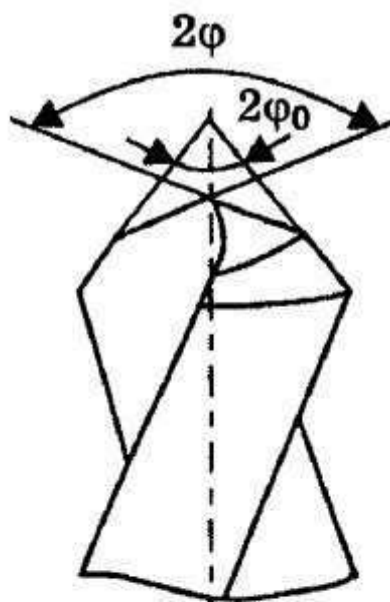


Рисунок 11 - Сверло с двойным углом заточки

Сверление термопластичных материалов может производиться сверлами как, из быстрорежущей стали, так и оснащенными твердосплавными пластинами. Сверлами из быстрорежущей стали сверлятся отверстия небольшого диаметра и в реактопластах.

Отверстия диаметром более 5 мм в стекло- и асбонаполненных пластмассах обрабатывают твердосплавными сверлами.

Скорость резания составляет 45...90 м/мин, а подача – 0,05...0,1 мм/об.

Отверстия малого диаметра в композитах с дисперсным наполнителем выполняют сверлами с углом заточки  $2\phi = 30...40^\circ$ .

Отверстия диаметром более 10 мм необходимо предварительно обработать сверлом диаметром 5...6 мм, а затем рассверлить их большими сверлами.

Для уменьшения трения и износа сверл задние углы делаются больше, чем при обработке металла. Обычно  $\alpha=10...25^\circ$ . Передний угол сверл выбирается в пределах  $0...15^\circ$ .

При сверлении отверстий в пенопластах используются спиральные сверла, пустотелые сверла-пилы или трубчатые сверла. Отверстия диаметром 10...20 мм обрабатывают спиральными сверлами из углеродистых сталей У8А, У10А. Подрезающие кромки затачивают под углом  $30^\circ$ . Задние поверхности сверла затачивают под углами  $\alpha=25^\circ$  и  $\alpha_0=60^\circ$ . Скорость резания вы бирается в диапазоне 40...250 м/мин, подача – 0,3...0,5 мм/об. Сверло необходимо периодически извлекать из отверстия для удаления стружки. Отверстия диаметром до 10 мм можно выполнять с помощью коронок, представляющих собой полый закаленный металлический стержень из стали У10А с заостренной режущей частью. Производится прошивка отверстий без вращения. Отверстия диаметром более 20 мм выполняют трубчатыми сверлами и сверлами-пилами.

**Развертывание.** При необходимости получения отверстий с более точными размерами после сверления производится развертывание посредством разверток при скоростях резания 40...90 м/мин с подачей 0,1...0,6 мм/об. Обычно под развертку оставляют припуск 0,1...0,2 мм. Достигается 6-7-й квалитеты точности обрабатываемой поверхности.

Используются цилиндрические и конические развертки с прямыми или спиральными зубьями из быстрорежущих сталей с углами заточки  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ .

**Нарезание резьбы в пластмассовых деталях.** Получение резьбы в пластмассовых деталях возможно двумя путями: без снятия и со снятием стружки. В первом случае резьба воспроизводится непосредственно при изготовлении детали в форме (однако вследствие усадки пластмасс при отвердении точность такой резьбы невысока). Этот способ применяется для деталей с малонагруженными или неответственными резьбовыми соединениями.

Резьба со снятием стружки оформляется в деталях на металлорежущих станках. Наружную резьбу выполняют резьбонарезными головками, плашками, резцами, резьбовыми гребенками, абразивными кругами, а внутреннюю – метчиками и резцами. Режущий инструмент изготавливается из быстрорежущей стали и твердых сплавов. Твердосплавные метчики применяются с двумя-тремя полированными канавками, несколько более широкими, с передним углом от  $-10^\circ$  до  $+10^\circ$ . Наружный и средний диаметры метчиков увеличивают на 0,05...0,13 мм. Распиливание пластмасс производится с помощью дисковых, ленточных и циркулярных пил, а для ряда пластмасс – термоэлектрическим методом.

Выбор конструкции режущего инструмента и режимов резания нужно производить с учетом особенностей пластмассы, ее упругих свойств, возможности оплавления в зоне резания и налипать на режущий инструмент, ее теплопроводности и т.д. При заточке зубьев фрез на задних и боковых поверхностях цилиндрические фаски не допускаются. Для обработки пластмасс нельзя использовать фрезы с большим шагом и малым числом зубьев. В контакте с материалом должны находиться одновременно минимум два зуба, что повышает качество реза и предотвращает сколы материала.

Распиловку тонкого листового материала рекомендуется производить пилами с соответствующей формой пластин из твердого сплава (рисунок 12) или из быстрорежущей стали с симметричным зубом и разводом 0,3...0,5 мм на сторону. Для распиловки термопластичных материалов толщиной до 15 мм используются фрезы и пилы из легированных сталей 9Х5ВФ, 9Х8, У8А, а также из быстрорежущих сталей диаметром 100...250 мм с числом зубьев 120...140, толщиной до 5 мм, с углами заточки  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ . Зубья пил должны быть разведены симметрично в обе стороны.

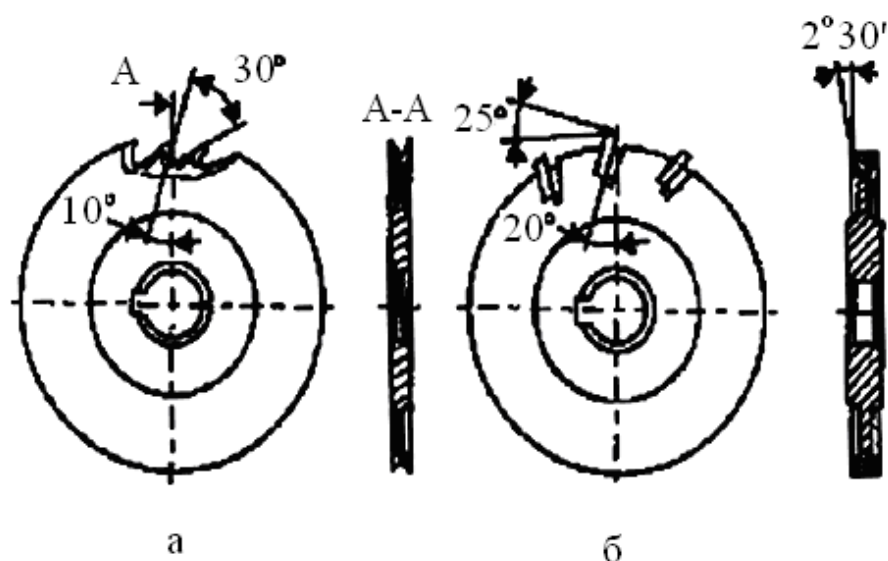


Рисунок 12 - Дисковые пилы: а – с разводом зубьев; б – со вставными зубьями

Листовой материал из реактопластов типа гетинакса и текстолита толщиной до 45 мм разрезают дисковыми фрезами из быстрорежущей стали или фрезами, оснащенными твердосплавными пластинами. При распиловке инструментом из быстрорежущей стали рекомендуется выбирать скорости резания 150...400 м/мин и подачи 0,2...0,5 мм/зуб, а твердосплавным инструментом – соответственно 600...1000 м/мин и 0,07...0,3 мм/зуб.

Разрезку стекло- и асбонаполненных реактопластов производят также корундовыми и алмазными абразивными кругами. Обработку корундовыми кругами толщиной 3...6 мм и диаметром 350 мм следует производить со скоростями резания до 50-60 м/с и подачи 0,01...0,6 м/мин – в зависимости от толщины и направления распиловки относительно армирующих волокон.

При разрезке алмазными кругами диаметром 200 мм и толщиной 1,2...2,0 мм на металлической связке высокое качество реза и высокую стойкость инструмента обеспечивают скорости резания 25...30 м/с с подачей 1,0...1,5 м/мин и охлаждение водой. Для получения деталей фасонного профиля, резки труб, стержней и других профилей применяют разрезку на ленточных станках. Используют стандартные ленточные пилы (рисунок 13) шириной 10...25 мм, толщиной 1,0...1,5 мм с 1,5...5,0 зубьями на 10 мм длины пилы. Зубья пил затачиваются под углами  $\gamma=5..8^\circ$  и  $\alpha=15..40^\circ$ . Листовой материал толщиной до 2 мм режут полотнами с мелким зубом без развода. Распиловку более толстых листов производят пилами с более крупным зубом и разводом в обе стороны на половину толщины пилы. Скорость резания выбирают в диапазоне от 300 до 600 м/мин.

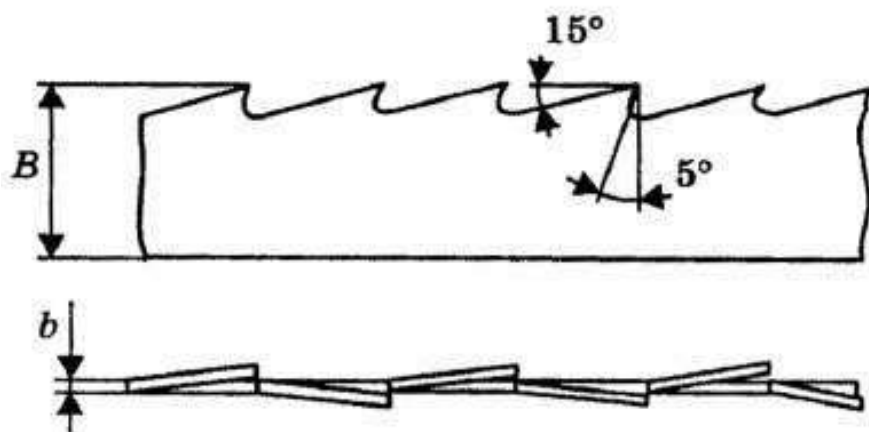


Рисунок 13 - Ленточное полотно для резки пластмасс

Тонкий листовый материал можно разрезать ручными ножницами для металла или на механических гильотинах. При этом необходимо обеспечить зазор между лезвиями не более 0,1...0,2 мм, плотно прижимать лист к столу у линии реза. Без подогрева хорошее качество реза обеспечивается на текстолитах и гетинаксах толщиной до 0,8 мм, на штамповочном гетинаксе, текстолите с плотной тканью, асботекстолите толщиной до 1,5 мм, стеклотекстолите до 3 мм. При предварительном подогреве листов до 120°C можно резать на гильотинных ножницах листы толщиной до 3,0 мм, а стеклотекстолит – до 9 мм. Листовые термопласты толщиной до 2,0...2,5 мм, за исключением полистирола и оргстекла, можно резать ножницами без подогрева. Жесткие и хрупкие материалы, например, полистирол, оргстекло, дисперснонаполненные феноло-формальдегидные и мочевиноформальдегидные композиции раскрою ножницами не подлежат.

Пенопласт можно разрезать как механическим путем на ленточных и круглопильных станках, так и термоэлектрическим методом. Круглые пилы применяют с профилем зуба в виде равностороннего или равнобедренного треугольника с мелким зубом и разводом на 0,15 мм на сторону. Ленточные пилы применяют с прямоугольным профилем, косой заточкой и разводом на 0,15 мм на сторону. Скорость подачи материала должна быть не выше 1,25 м/мин.

Термоэлектрический метод резки схематически представлен на рисунке 14. Разрезаемая заготовка помещается между двумя опорными поверхностями. Проволока из высокоомного сплава (например, нихрома) подключается к низковольтному источнику питания и, нагреваясь до температуры 400...500°C, расплавляет материал. Под тяжестью траверсы она автоматически перемещается вниз, разрезая заготовку. На специальных электролобзиках можно вырезать этим методом любые фасонные изделия.

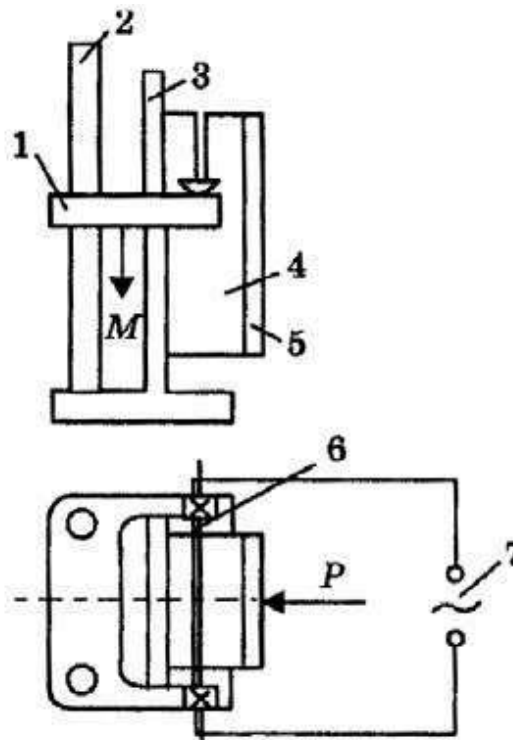


Рисунок 14 - Схема термоэлектрического метода резки пенопласта: 1 - траверса; 2 - стойка; 3 - упор; 4 - заготовка; 5 - прижим; 6 - высокоомная проволока; 7 – источник

**Шлифование и полирование пластмасс.** Шлифование пластмасс можно производить на станках, оснащенных специальными дисками, или ручным способом с помощью наждачной шкурки. Используют этот процесс в основном для снятия заусенцев с деталей, полученных прессованием, для подготовки деталей к склеиванию, а также для обработки поверхностей, подвергающихся механической обработке, если это требуется по условиям эксплуатации.

Для чернового шлифования деталей из amino- и фенопластов рекомендуется карборундовые круги твердости M1, M2, C1, CM2 с зернистостью 20...36. Режимы резания следующие: скорость 35...40 м/с, продольная подача 0,07...0,20 мм, поперечная подача 0,1...0,2 мм. Чистовую обработку производят аналогичными кругами, но зернистостью 60...80 при скорости резания 30...40 м/с, глубине 0,01...0,10 мм и поперечной подаче 0,01...0,10 мм

Текстолит обрабатывают абразивными кругами зернистостью 30...40 на мягкой связке, со скоростью резания не менее 25 м/с при глубине 0,1 мм и поперечной подаче 3...5 мм/дв.х. Термопласты шлифуют мягкими кругами, набранными из плотного полотна (муслина или сукна), смазанного пастой из тонкоизмельченной пемзы. Для исключения «прижога» материала при обработке необходимо, чтобы длительность контакта круга с изделием была не более 1,5 с, а давление не более 0,05...0,15 МПа.

Полирование деталей производят с целью устранения с их поверхностей следов предшествующих технологических операций и

поверхностных дефектов, полученных в процессе изготовления (например, матовости поверхностей), а также придания им блеска.

Полировальные круги изготавливают наборными из тканей (хлопчатобумажной, байковой, суконной). Твердые полировальные круги набираются в шайбы (диаметром 200...400 мм) и толщиной 60...100 мм, зажатые с двух сторон металлическими прокладками. Применяют их для выведения рисок, царапин и других глубоких дефектов.

Окончательное полирование производят мягкими и самоохлаждающимися дисками. Самоохлаждающиеся диски изготавливают путем набора и уплотнения пакета из хлопчатобумажных дисков диаметром 150...300 мм и 40...75 мм, чередуя каждый диск большого диаметра двумя малыми. Толщина пакета обычно составляет 100...120 мм. В качестве полировальных паст для сухого полирования используют абразивные компоненты (карборунд, корунд, оксид хрома и др.) в различных соотношениях с воскообразными веществами или маслами (парафином, церезином, пчелиным воском, машинным, веретенным и другими маслами).

«Сухое» полирование применяют для реактопластов. Для термопластов применяют «мокрое» полирование составом, состоящим из измельченной пемзы двух сортов, взятых в соотношении 0,5...1,5, замешанных на воде до густой пасты, наносимой на полировальные круги. Эти составы используют для грубой полировки. После промывки выполняют окончательное «сухое» полирование. При обработке оргстекла может применяться «огневое» полирование, заключающееся в воздействии водородно-воздушного пламени в течение нескольких секунд на предварительно обработанную поверхность.

## **2. Технологические способы производства изделий из резинотехнических материалов**

Технологические процессы переработки композиций с резиновой матрицей в детали подобны тем, которые были рассмотрены при формообразовании деталей из полимерных КМ. Специфичен лишь процесс получения листовых заготовок (каландрирование).

Подготовка резиновой смеси заключается в смешении входящих в нее компонентов. Перед смешением каучук переводят в пластичное состояние многократным пропусканием его через специальные вальцы, предварительно подогретые до температуры 40 ... 50 °С. Находясь в пластичном состоянии, каучук обладает способностью хорошо смешиваться с другими компонентами. Смешение проводят в червячных (рисунок 15) или валковых смесителях. Первым из компонентов при приготовлении смеси вводят противостаритель, последним - вулканизатор или ускоритель вулканизации.

Для изготовления профилированных резиновых деталей (труб, прутков, профилей для остекления) применяют непрерывное выдавливание (см. рисунок 15). Его осуществляют на специальных червячных машинах-автоматах. Перерабатываемый материал из бункера 1 (рисунок 15, а)

попадает в рабочий цилиндр 3, где захватывается вращающимся червяком 2. Червяк продвигает материал, перемешивает и уплотняет его. Материал проходит через нагреватель 4, выдавливается через калибровочное отверстие головки 6, а затем выходит через радиальные канавки оправки 5. Оправку применяют для получения отверстия при выдавливании труб. Непрерывным выдавливанием можно изготавливать детали различного профиля (рисунок 15, б). В частности, таким способом покрывают резиной металлическую проволоку.

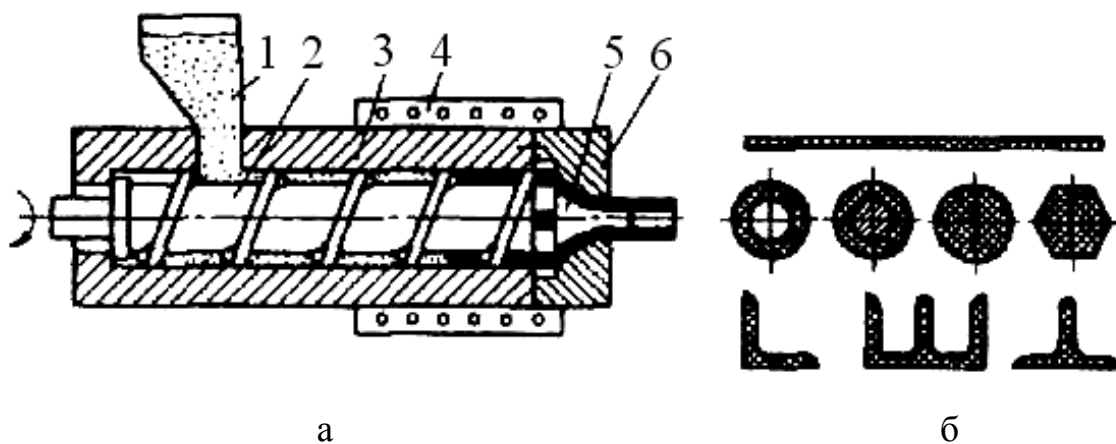


Рисунок 15 - Непрерывное выдавливание: а - схема установки; б - профили получаемых деталей

Каландрирование применяют для получения резиновых смесей в виде листов и прорезиненных лент. Операцию выполняют на многовалковых машинах - каландрах. Валки каландров снабжают системой внутреннего обогрева или охлаждения, что позволяет регулировать температурный режим. Листы резины, полученные прокаткой на каландрах, сматывают в рулоны и используют потом в качестве полуфабрикатов для других процессов формообразования деталей. Во избежание слипания резины в рулонах ее при выходе из каландра посыпают тальком или мелом.



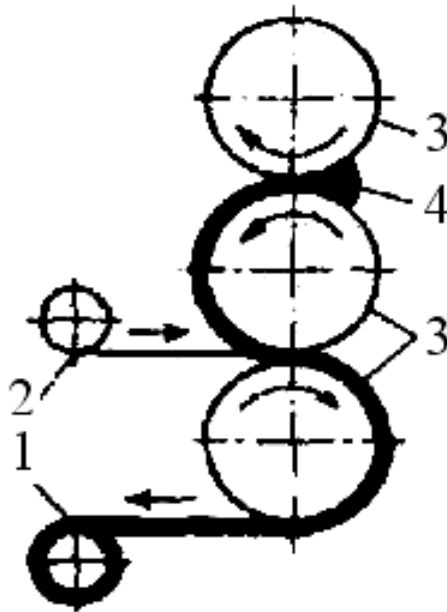


Рисунок 16 - Схема получения прорезиненных тканей

В процессе получения прорезиненной ткани в зазор между валками каландров 3 (рисунок 16) одновременно пропускают пластифицированную резиновую смесь 4 и ткань 2. Резиновая смесь поступает в зазор между верхним и средним валками, через который проходит ткань. Средний валок вращается с большей скоростью, чем нижний. Разница скоростей обеспечивает втирание резиновой смеси в ткань. Толщину резиновой пленки на ткани регулируют, изменяя зазор между валками каландра. Многослойную прорезиненную ткань получают пропусканием определенного числа листов однослойной прорезиненной ткани через валки каландра. Полученную ткань наматывают на барабан 1 и затем вулканизуют.

Формование на прессах, является одним из основных способов изготовления фасонных деталей (манжет, уплотнительных колец, клиновых ремней и т.д.). Формуют в металлических формах. Применяют горячее и холодное формование.

При горячем формовании материал закладывают в горячую пресс-форму и формуют на гидравлических прессах с обогреваемыми плитами. Температура формования 140 ... 155 °С. При формовании одновременно происходят формообразование и вулканизация деталей. Высокопрочные детали (например, клиновые ремни) после формования подвергают дополнительной вулканизации в специальных приспособлениях.

Холодным формованием на прессах изготавливают детали из эбонитовых смесей (корпуса аккумуляторных батарей, детали для химической промышленности и т.д.). После формования заготовки отправляют на вулканизацию. В состав эбонитовой смеси входят каучук и значительное количество серы (до 30 % от массы каучука). В качестве наполнителей применяют размельченные отходы эбонитового производства.

## **Особенности обработки резанием резин**

Большинство резиновых материалов легко поддается обработке резанием. Однако высокая эластичность резиновых материалов не позволяет при обычной температуре придать резиновому изделию соответствующую конфигурацию с требуемой точностью. Исключение составляют эбониты и многослойно армированные резиновые материалы. Благодаря высокой твердости эбонита он хорошо обрабатывается резанием на металлорежущих станках с применением тех же режущих инструментов, что и для обработки конструкционных сталей.

Эбонит хорошо обрабатывается точением, фрезерованием, легко сверлится, развертывается, поддается нарезанию резьбы, очень хорошо полируется и т.д., однако достаточно хрупок.

В основном требуемая форма резиновых изделий получается формовкой с последующей вулканизацией.

Однако на практике зачастую возникает необходимость обработки резины резанием. Для придания резине требуемой твердости заготовку замораживают до достаточно низкой температуры, например, помещают на некоторое время в жидкий азот. Затем осуществляют обработку резанием. Следует учитывать, что после замораживания линейные размеры полученной детали изменяются (увеличиваются) за счет значительного температурного коэффициента линейного расширения. Точность изготовления детали зависит от опыта специалиста по обработке материалов резанием. Процесс замораживания и последующего размораживания может также привести к незначительному изменению физико-механических свойств материала обработанной детали.

### **3. Обработка резанием древесных материалов**

Сопrotивление древесины резанию обусловливается ее породой и направлением резания. В зависимости от расположения волокон древесины возможно резание торцевое, продольное, поперечное и (гораздо реже) под углом. При этом сопротивление резанию вдоль направления волокон в 2 - 3 раза, а по торцу в 6 раз выше, чем при резании в поперечном направлении. Сила резания также зависит от угла резания и остроты режущей кромки. При затуплении резца возникают деформации, смятия волокон, сопровождаемые действием сил упругого восстановления, которые могут достигать уровня силы резания (для тупого резца). Шероховатость поверхности снижается с уменьшением угла резания, толщины стружки и увеличением скорости резания.

Для продольной распиловки древесины применяют пилы с подрезом спинки (рисунок 17, а), а для поперечной – пилы с профилем зуба, приведенным на рисунке 17, б и в.

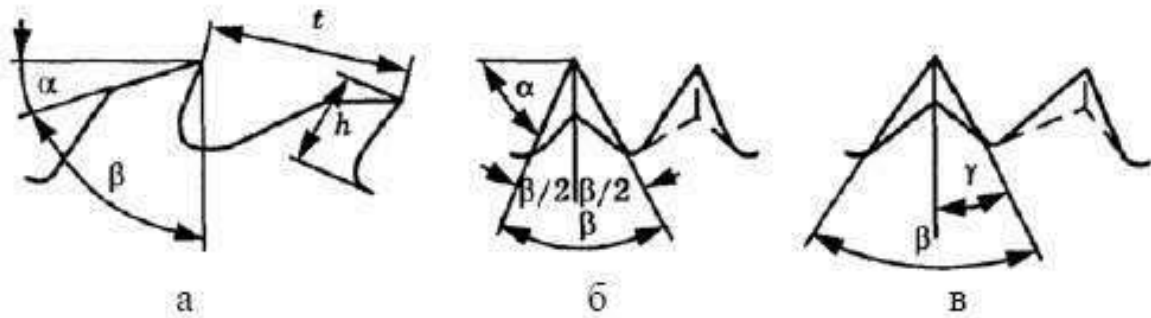


Рисунок 17 – Геометрия зубьев пил для продольной (а) и поперечной (б, в) распиловки древесины: б – с симметричным; в – с асимметричным профилем

Для распиловки хвойных пород применяют пилы, имеющие зуб с прямой спинкой ( $\alpha = 30...35^\circ$ ,  $\delta = 70...75^\circ$ ), для твердых пород – с подрезом спинки или с выпуклой спинкой ( $\alpha = 15...20^\circ$ ,  $\delta = 60...80^\circ$ ).

Для улучшения качества поверхности в месте распила и снижения мощности резания используют косую заточку пил (рисунок 18). С целью снижения сил трения между разрезаемым материалом и боковыми поверхностями зубьев пил применяют развод зубьев (отгибание их верхней части поочередно влево и вправо) на 0,15...0,80 мм на каждую сторону. Большой развод выполняется при распиловке влажной и мягкой древесины.

Однако развод пил несколько ухудшает качество пропила. Более высокое качество реза и снижение сил трения при резании достигается при распиловке дисковыми пилами с зубьями, утолщающимися к периферии, для которых отпадает необходимость в разводе.

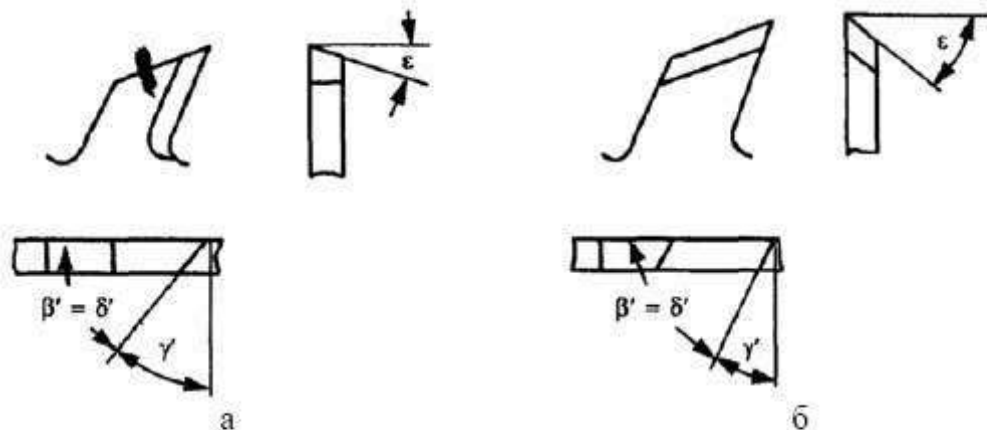


Рисунок 18 – Пример косой заточки зубьев пилы по передней (а) и задней (б) поверхностям

Для распиловки древесины используют круглые (дисковые), ленточные и лобиковые пилы. Круглые пилы представляют собой стальные диски с зубьями по контуру. Зубья могут быть изготовлены из материала диска, с напаянными пластинами из твердых сплавов или вставными (для сборных пил большого диаметра).

Ленточные пилы выполняются в виде непрерывной ленты шириной 40...50 мм с зубьями на передней кромке. Лобзиковые пилы применяются для выпиливания внутренних замкнутых контуров. Их изготавливают длиной 130...140 мм, толщиной 0,3...0,7 мм, шириной 1,5...5,0 мм с зубьями по профилю прямоугольного треугольника с углом резания  $90^\circ$ . Обработка больших плоских поверхностей производится на строгальных станках. В качестве рабочего инструмента используют строгальные ножи, устанавливаемые во вращающуюся вокруг горизонтальной оси головку (рисунок 19). Высота ножей регулируется посредством винтов 2. Крепление ножей в пазах осуществляется прижимной планкой 4 с помощью распорных винтов.

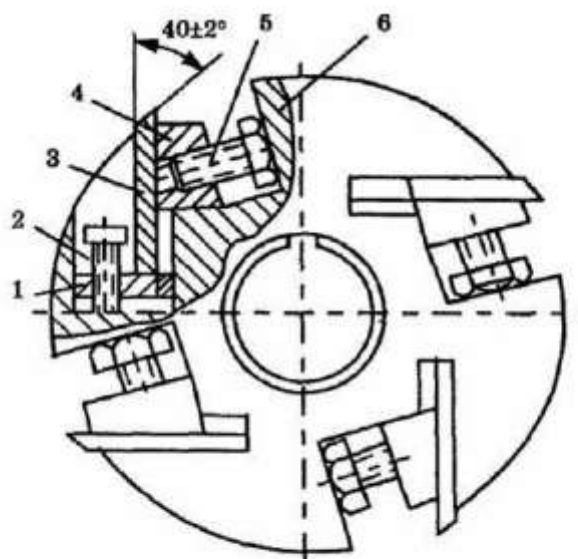


Рисунок 19 - Ножевая головка: 1 - планка; 2 - регулировочный винт; 3 - нож; 4 - прижимная планка; 5 - распорный винт; 6 - корпус головки

Заточку ножей обычно производят по задней грани, обеспечивая угол  $\beta = 45^\circ$ , применяют также двойную заточку ножей. Угол резания  $\delta$  выбирают в диапазоне  $55...80^\circ$  в зависимости от твердости породы. Чем тверже древесина, тем больше угол резания.

Фасонную обработку древесины производят на фрезерных станках. Используются как цилиндрические и фасонные фрезы, крепящиеся на цилиндрической оправке в шпинделе станка, так и концевые, крепящиеся непосредственно в шпинделе станка. Пазовые и прорезные фрезы выполняют с косой заточкой боковых поверхностей зубьев под углом  $1,5...3,0^\circ$  для создания зазора между боковой поверхностью фрезы и обрабатываемой поверхностью с целью снижения сил трения. Заточка фрез производится по передней поверхности. При обработке на копировально-фрезерных станках используют концевые двурезцовые фрезы с прямым и спиральным расположением режущих кромок, а также однорезцовые затылованные и незатылованные фрезы. У незатылованной фрезы задняя поверхность выполнена по дуге окружности из центра фрезы. Для снижения сил трения при обработке такие фрезы крепятся в патроне эксцентрично. Концевые фрезы для внутреннего фрезерования изготавливаются с дополнительными

торцевыми режущими элементами для первоначального заглубления режущего инструмента. Конструкция сверл для обработки древесины (рисунок 20) учитывает особенности ее волокнистого строения и анизотропию механических свойств. Широкое применение для сверления поперек волокон имеют центровые сверла с подрезателями. Подрезатель перерезает волокна, режущая кромка их скалывает. Для предотвращения увода сверла в сторону предусмотрен направляющий центр. Для глубокого сверления вдоль волокон применяют ложечные и спиральные сверла, для выполнения отверстий под головки болтов, винтов, шурупов используются раззенковочные сверла. Сверление древесины производят при частоте вращения 3...10 тыс. об./мин с подачей 0,1...0,3 мм/об для твердых пород и фанеры, 0,5...2,0 мм/об для мягких пород древесины.

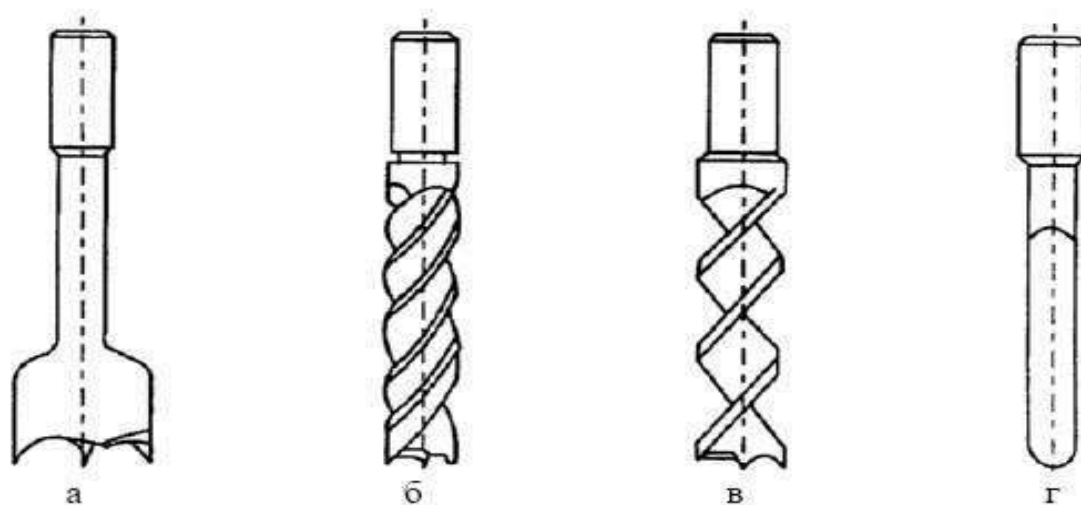


Рисунок 20 - Сверла для обработки древесины: а – центровое с подрезателями; б – спиральное с подрезателями; в – винтовое; г – ложечное

#### **4. Обработка резанием неорганических материалов**

Характерной особенностью неметаллических конструкционных материалов (пьезокерамика, вакуумная и конденсаторная керамика, керамика, стекло, ферриты, полупроводники, двуокиси кремния, талька, кварца и др.) является их низкая обрабатываемость, высокая твердость, износостойкость и склонность к разрушению при местной даже незначительной концентрации напряжений. Обработка этих материалов режущим инструментом затруднена, а абразивным – малопродуктивна.

На обработанной поверхности деталей часто возникают сколы, трещины и микротрещины, которые очень трудно вывести при последующих чистовых операциях.

Широко распространенным методом механической обработки таких материалов является обработка алмазными кругами. Алмазные круги, как и абразивные, характеризуются геометрической формой, материалом абразивного зерна, типом связки, величиной зерен, степенью твердости,

структурой, расположением зерен и т.д. Одним из основных параметров характеристики является зернистость алмазов в алмазоносном слое круга.

Обычно при шлифовании алмазными кругами выбирают следующие режимы:  $v_k = \text{м/с}$ ,  $S_{\text{пп}} = 0,9 \text{ мм/ход}$ ,  $S_{\text{пр}} = 8...12 \text{ м/мин}$ ,  $t = 0,3...0,6 \text{ мм}$ .

Шлифование проводят с охлаждением струей 2%-ного водного раствора экстрадиола в количестве 10...12 л/мин. Эти режимы являются наиболее оптимальными.

При обработке неорганических материалов алмазными кругами изменение сил резания носит пульсирующий характер. Циклическое действие сил резания и температурные факторы создают благоприятные условия для разрушения алмазных зерен и износа алмазного круга, что определяет стойкость алмазного инструмента. В зависимости от формы, а также прочностных характеристик алмазные зерна обладают различной способностью противостоять действию внешних сил; если нагрузка превышает некоторый определенный для данных конкретных зерен предел, то наступает разрушение. Температурные воздействия могут создавать благоприятные условия для появления термических трещин на поверхности зерен алмаза.

Циклическое действие силы приводит к вырыванию отдельных участков из основной массы алмазного зерна. Интенсивность износа круга по мере его эксплуатации неравномерна (вначале износ незначителен, спустя 50...80 мм износ достигает пикового значения, затем снижается в 2-3 раза и удерживается постоянным на протяжении 210...270 мин, после чего начинает интенсивно возрастать). В период стабильного износа круга по мере увеличения времени работы производительность процесса снижается, а шероховатость обработанной поверхности детали растет. Наибольшую эффективность механической обработки хрупких неорганических конструкционных материалов обеспечивает процесс шлифования с применением кругов типа АПП200 из синтетических алмазов АСР зернистостью 200/160 и 100% концентрации алмазов на поверхности круга.

Керамические материалы на основе двуокиси кремния (керсил, ниасит и др.), а также кварцевое стекло рекомендуется обрабатывать кругами на связках ТО2, МК и М1, стекла группы тяжелых флинтос – кругами МК, ТО2 и М52, а боросиликатные стекла – кругами М52 и М1.

При резании труднообрабатываемых материалов очень широко применяется ультразвук. Этот метод особенно эффективен при изготовлении отверстий и полостей сложной формы, получение которых другими методами затруднено или вообще невозможно.

При ультразвуковой обработке достигается высокое качество поверхностного слоя, что приводит к существенному повышению износостойкости и усталостной прочности твердосплавных штампов, матриц, пресс-форм, фильер и др. Зачастую ультразвуковой способ обработки совмещают с электрохимическим, при этом производительность обработки повышается в 10 раз, а износ инструмента снижается в 8-10 раз.

Метод ультразвуковой размерной обработки сводится к подаче в зону работы инструмента абразивной суспензии (зачастую под давлением) и ультразвуковых колебаний от концентратора колебаний, подключенного к ультразвуковому генератору. Для повышения производительности процесса применяют одновременное сообщение вращательных движений инструменту и заготовке.

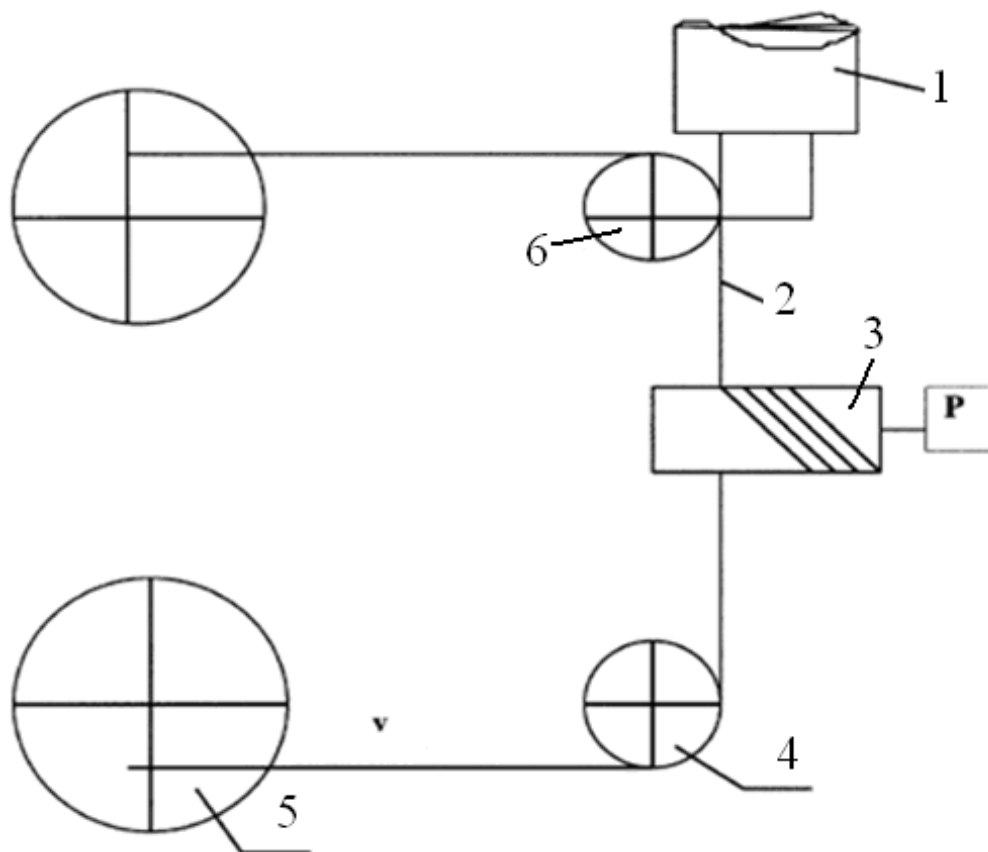


Рисунок 21 - Схема ультразвуковой обработки непрофилированным инструментом – проволокой: 1 – концентратор; 2 – инструмент – проволока; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – направляющий ролик; 5 – катушка; 6 – прижимной ролик

Для ультразвуковой обработки стекла, минералокерамики и других хрупких материалов используется способ обработки непрофилированным инструментом – тонкой проволокой. В натянутом между двух опор инструменте – проволоке 2 (рисунок 21), постоянно наматывающейся на катушку 5, возбуждаются ультразвуковые колебания от концентратора 1; обрабатываемая деталь 3 с небольшой силой  $P$  прижимается к инструменту, а в зону контакта инструмент – деталь подается абразивная суспензия. Получается своеобразный «ультразвуковой лобзик», который позволяет вести контурную вырезку, обработку узких пазов (шириной менее 0,1 мм), разрезку заготовок (при толщине обрабатываемого материала более 10 мм).

При механической обработке твердых неметаллических материалов, особенно при сверлении отверстий малого диаметра на большую глубину, применяется ультразвуковое резание с обработкой вращающимся алмазным

инструментом. Для этой цели используются специальные ультразвуковые вращающиеся головки, устанавливаемые на обычных металлорежущих станках, а также возможно применение специализированных ультразвуковых станков. Ультразвуковое сверление стекла, керамики и ситаллов алмазным инструментом на металлических связках является высокопроизводительным способом обработки глубоких отверстий (диаметром 3...10 мм и глубиной до 500 мм). Наиболее высокие режущие свойства имеют синтетические монокристалльные алмазы САМ и натуральные алмазы. Технологически характеристики алмазного сверления существенно зависят от прочностных свойств связки, увеличение прочности связки в 1,5-2 раза приводит к повышению производительности на 50...60% и снижению удельного расхода алмазов в 2 раза.

Наиболее высокие режущие свойства имеют сверла на металлических связках М5-6 и М5-10. Оптимальные режимы сверления отверстий малого диаметра: удельная сила подачи  $p=200...400 \text{ Н/см}^2$ , число оборотов  $n=1800...2400 \text{ об/мин}$ , амплитуда колебаний режущего инструмента 10...11 мкм, зернистость алмазов АМ160/125 и САМ 160/125, концентрация  $K=100...150\%$ .



## 6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Перед началом занятий студент должен получить учебно-методическую литературу (рабочую программу с заданием на контрольную работу и методическими указаниями по ее выполнению, руководство к выполнению лабораторных работ с методическими указаниями). Ознакомится с рабочей программой и подобрать необходимую учебную литературу. После прослушивания курса лекций студент выполняет лабораторные работы. Перед выполнением контрольной работы студенту рекомендуется сделать краткий конспект по разделам учебника согласно рабочей программе и при необходимости посетить консультации для отработки вопросов с преподавателем. После этого студент приступает к самостоятельному выполнению контрольной работы и в необходимых случаях консультируется с преподавателем. Перед сдачей экзамена студент должен ответить на вопросы касающиеся методики выполнения контрольной работы. На экзамене студент должен предъявить преподавателю зачетную книжку. Ответы на вопросы по билету на экзамене нужно подготовить письменно с рисунками и формулами и быть готовым к дополнительным вопросам.

### *Рекомендации по работе с литературой*

При работе с литературой рационально использовать следующую последовательность:

- основная литература (учебник «Материаловедение. Технология конструкционных материалов»);
- дополнительная литература (по отдельным технологическим процессам);
- методическая литература, разработанная на кафедре (по выполнению лабораторных и практических работ, а также домашнего задания);
- периодические издания (журнал «Металловедение и термическая обработка», «Восстановление и упрочнение» и др.)

## **Методика выполнения контрольной работы**

Контрольные работы нацелены на повышение эффективности и практической направленности обучения студентов. Выполнение контрольных работ содержит элементы исследования и способствует выработке навыков в принятии обоснованных инженерно-технических решений.

Контрольные работы проводятся для проверки степени усвоения текущего учебного материала.

Задание на контрольную работу сопровождается методическими указаниями.

В часы самостоятельной работы студенты знакомятся с заданием на контрольную работу и изучают рекомендованную учебную литературу.

Учебные вопросы контрольной работы отрабатываются студентами самостоятельно.

Контроль степени усвоения учебного материала студентами проводится методом проверки правильности выполнения индивидуальной контрольной работы.

Следует учитывать, что контрольная работа должна быть оформлена письменно на бумажном носителе. Титульный лист подписывается студентом, на нем производится регистрация работы. На титульном листе преподавателем проставляется отметка о допуске к защите и приводится рецензия контрольной работы.

Все отмеченные рецензентом ошибки должны быть исправлены, а сделанные указания выполнены.

К экзамену студент допускается только после получения зачета по контрольным работам.

## **Методика проведения аттестации по дисциплине**

При изучении дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» студентами, обучающимся по направлению

подготовки: 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», профиль подготовки «Автомобили и автомобильное хозяйство», итоговой формой контроля знаний является экзамен.

Экзамен проводится письменно по экзаменационным билетам. При подготовке студент должен записать ответы на все вопросы, содержащиеся в билете.

При аттестации студентов устанавливаются оценки:

по экзамену: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно»;

по контрольной работе: «зачтено», «не зачтено».

Рекомендуемые критерии оценок:

Оценки **«отлично»** заслуживает ответ, содержащий глубокое знание всего программного материала, включая понимание технологических процессов производство изделий, знание устройства и принципа работы применяемого технологического оборудования, а также умение грамотно оперировать терминологией и понятийным аппаратом при изложении материала. Ответ студента на каждый вопрос билета должен быть развернутым, убедительным, логически корректным в изложении, содержать достаточно четкие формулировки, подтверждаться графиками, цифрами, схемами или фактическими примерами. Такой ответ должен продемонстрировать знание материала лекций, лабораторно - практических занятий, базового учебника и дополнительной литературы. Оценка **«отлично»** выставляется при полных ответах на все основные и дополнительные вопросы.

Оценка **«хорошо»** ставится студенту за правильные ответы на вопросы билета, знание основных (узловых) теоретических положений и понятий из списка рекомендованной литературы и рассмотренных на лекциях, лабораторных и практических занятиях. При этом обязательно знать принцип маркировки и области применения конструкционных.

Оценка *«удовлетворительно»* предполагает ответ только в рамках лекционного курса, который показывает знание сущности основных теоретических положений и понятий. Как правило, такой ответ краток, приводимые формулировки являются недостаточно четкими, в графических изображениях и формулах допускаются неточности. Удовлетворительная оценка ставится за фрагментарные и поверхностные знания важнейших тем раздела и содержание лекционного курса.

Оценка *"неудовлетворительно"* предполагает, что студент не разобрался с основными вопросами раздела, не понимает сущности процессов, не знает, либо отрывочно представляет учебно-программный материал, не может ответить на простые вопросы типа «В чем сущность данного процесса?». Оценка «неудовлетворительно» ставится также студенту, читающему эти ответы экзаменатору, не отрываясь от текста, а просьба объяснить или уточнить прочитанный таким образом материал по существу остается без ответа.

Если студент явился на экзамен и отказался от ответа, то ему проставляется в ведомость «неудовлетворительно».

По окончании ответа на вопросы преподаватель объявляет студенту результаты сдачи экзамена. При удовлетворительном результате в экзаменационную ведомость и зачетную книжку вносится соответствующая оценка.

### **Методические указания к изучению разделов и тем дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов»**

#### **Материаловедение**

При изучении этого раздела необходимо четко представлять, что свойства металлов определяются их структурой (впервые это отметил Д.К. Чернов). Из большого разнообразия материалов необходимо выделить металлы как особый класс материалов - кристаллические тела. Уяснить

принципиальную разницу между кристаллическими и аморфными телами. Понять суть кристаллического строения металлов и формы кристаллических решеток. Уяснить основные свойства тел, имеющих кристаллическое строение: анизотропия, аллотропическое превращение и их практическое значение.

**Кристаллическое строение металлов.** Рассматривая кристаллическое строение металлов, необходимо обратить внимание на несовершенство строений кристаллических решеток, вызванное неправильным расположением атомов в пространстве в отдельных частях реальных кристаллов. Различные несовершенства строения решетки: дислокации, вакансии, включения чужеродных атомов примесей (точечные нарушения), а также их перемещения, скопления – в значительной мере определяют уровень прочности металла. Это влияние не однозначно, а именно: при некоторой концентрации несовершенств прочность минимальна. Уменьшая количество несовершенств, можно добиться приближения к идеальному строению кристалла и соответственно к теоретической максимальной прочности. Путем тонкой очистки металла от примесей способами химического разложения, электрошлакового переплава, зонной плавки, вакуумирования, путем сокращения числа дислокаций и вакансий удалось добиться прочности кристаллов железа до  $\sigma_B=1500$  МПа. Повышения прочности можно добиться и увеличением количества несовершенств, применяя наклеп, термическую обработку, легирование.

Знание физической сущности механических свойств материалов и сплавов и их числовых значений, а также методов их определения исключительно важно для инженера. Студентам следует понять явление усталости металлов, поскольку оно является одной из основных причин выхода из строя осей, рельсов, пружин, рам тележек и др.

Рассматривая процесс кристаллизации металлов, необходимо разобраться в физическом смысле температурных остановок (горизонтальных площадок на кривых нагрева и охлаждения) и дать

определение физической сущности этих процессов. Рассмотреть вопросы фазовых превращений, процесса кристаллизации (образования центров кристаллизации). Разобраться в причинах образования дендритной структуры, как следствия неравномерного роста кристаллов в разных направлениях, зависящих от условий охлаждения (отвода тепла).

**Сплавы.** Одним из главных этапов в понимании процесса образования сплавов, является уяснение физической сущности взаимодействия компонентов в твердом состоянии, что определяет структуру и свойства сплава. Необходимо четко представлять: твердый раствор одного компонента в другом, что определяет свойства такого взаимодействия; химическое соединение; механическую смесь.

Зная механические свойства отдельных фаз и структурных составляющих сплава, например, большую пластичность чистых металлов и повышенную хрупкость механических смесей и, особенно, химических соединений, можно предопределить поведение сплава в том или ином состоянии. Нужно уметь анализировать диаграмму состояний, пользуясь правилом фаз и правилом отрезков. При этом необходимо уметь определять процентное соотношение фаз и структурных составляющих для данного состояния сплава (температура, химический состав). Важно ответить на вопрос о разнице между эвтектическим и эвтектоидным превращениями.

Следует также четко определить условия образования неоднородности химического состава сплава (ликвации) в пределах слитка и одного кристаллита, уяснить практическое значение этого явления.

**Диаграмма состояния железо-углерод.** Изучение диаграммы состояний железо-цементит (железо-углерод) дает возможность разобраться в составе, строении и условиях образования различных фаз и структурных составляющих, в различии строения стали и чугуна. Рассмотреть линии диаграммы, критические точки и процессы, происходящие при кристаллизации железоуглеродистых сплавов с разной концентрацией углерода.

**Классификация и маркировка сталей.** Необходимо четко представлять влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей, в чем состоит вредное влияние S и P (явление ликвации), определяющих явления красноломкости и хладноломкости. В связи с этим понять классификацию сталей по качеству в зависимости от содержания вредных примесей. Знать маркировку сталей и чугунов в соответствии с ГОСТами.

Изучая маркировку сталей, необходимо помнить, что в зависимости от способа раскисления может быть получена сталь различного качества. Она соответственно обозначается: сп – спокойная, пс – полуспокойная, кп – кипящая.

Химический состав и механические свойства сталей определяют по ГОСТам, например, для углеродистых сталей обыкновенного качества – по ГОСТ 380-88, для качественных углеродистых сталей – по ГОСТ 1050-88, для углеродистых инструментальных сталей – по ГОСТ 1435-86, для высококачественных и особовысококачественных (легированных) сталей – по ГОСТ 19281-89, 14959-73, 4543-71 и др.

В ответах на вопросы, касающиеся марок сплавов, необходимо, на основании ГОСТов, указать принципы их классификации и привести необходимые примеры.

**Классификация чугунов.** При изучении процесса графитизации важно уяснить, каково влияние формы графита на механические и эксплуатационные свойства чугуна, каково влияние Si, Mn, S, P и модифицирующих элементов на процесс графитизации и форму графита.

Серые чугуны по ГОСТ 1412-85 маркируются так: СЧ 25, где СЧ – серый чугун, 25 – предел прочности  $\sigma_b$  при растяжении (250 МПа). Известно, что  $4\sigma_b = 2\sigma_{изг} = \sigma_{сж}$  т.е. чугун работает лучше при сжатии. Ковкий чугун (ГОСТ 1215-86) маркируются иначе: КЧ 45-7, где КЧ – ковкий чугун, 45 – предел прочности при растяжении  $\sigma_b$  (450 МПа), 7 – относительное удлинение  $\delta$ , в процентах. Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293-85) ВЧ 80, где 80 –  $\sigma_b$  (800 МПа).

**Механические характеристики.** При изучении этого раздела необходимо уяснить, что к механическим характеристикам относятся характеристики прочности, пластичности, ударная вязкость, твердость и др. Определяются они при различных способах приложения нагрузки (растяжении, сжатии, изгибе и др.) Величина их зависит от скорости приложения нагрузки (скорости деформирования). Необходимо уяснить влияние углерода и легирующих элементов на изменение прочностных, деформационных и физических свойств сталей. Обратит внимание, что изменение механических характеристик можно достигать не только изменяя процентное содержание углерода и других примесей, но и с помощью холодной пластической деформации. Необходимо понять связь между скоростью нагружения, температурой, пластической деформацией, механическими характеристиками и характером разрушения. Рассмотреть влияние рекристаллизационных процессов.

**Термическая обработка.** Термическая обработка – один из главных способов влияния на строение, а, следовательно, и на свойства сплавов. Вопросы термической обработки стали и чугуна можно понять, лишь зная структурные превращения, происходящие при нагреве и охлаждении железоуглеродистых сплавов с различным содержанием углерода.

Необходимо знать, какие превращения претерпевают феррит, перлит и ледебурит при нагреве и какое влияние оказывает скорость охлаждения на превращение аустенита. Вопросы охлаждения аустенита лучше разобрать, используя диаграмму изотермического распада аустенита и на ее основе уяснить, при какой скорости охлаждения образуются перлит, сорбит, тростит и мартенсит, что называется критической скоростью закалки, в чем различие между мартенситом и приведенными выше структурами.

Следует иметь в виду, что чем ниже содержание углерода в стали, тем больше критическая скорость закалки, вследствие чего низкоуглеродистые стали (менее 0,3 % С) в практических условиях не принимают закалку на мартенсит.



Нужно усвоить, что при образовании мартенсита кристаллическая решетка перестраивается из гранцентрированной в объемно-центрированную, но вследствие того, что углерод не успевает выделиться, а остается в пересыщенном твердом растворе в объемно-центрированной решетке, она искажается и приобретает тетрагональность.

Процесс образования мартенсита бездиффузионный, поскольку низкая температура процесса препятствует диффузии углерода из аустенитных зерен в процессе быстрого охлаждения. Образование мартенсита происходит между температурами начала  $M_n$  и конца  $M_k$  мартенситного превращения тем полнее, чем ниже температура в этом интервале. Интервал мартенситного превращения при увеличении содержания углерода смещается в область более низких температур. Часть аустенита, находясь между образовавшимися пластинами мартенсита в состоянии всестороннего сжатия, не превращается в мартенсит. Этот остаточный аустенит снижает твердость стали. Поэтому для уменьшения количества остаточного аустенита некоторые стали необходимо охлаждать до отрицательных температур. Такая обработка называется обработкой холодом. Иногда ее проводят дополнительно, сразу после закалки при температуре  $-80^{\circ}\text{C}$ . Необходимо разобраться в структурных превращениях, происходящих при отпуске стали, а также проследить за изменением свойств закаленной стали в результате низкого, среднего и высокого отпуска. Важно понять, почему уменьшается искаженность (тетрагональность) мартенсита, какие условия необходимы для перехода остаточного аустенита в мартенсит и для его распада на феррито-цементитную смесь.

Под улучшением стали понимают закалку на мартенсит с последующем высоким отпуском. Следует усвоить, какие стали подвергают улучшению. Необходимо ознакомиться с превращениями в структуре и изменениями свойств при термической обработке деталей из углеродистых и легированных сталей.

При рассмотрении вопросов термической обработки чугуна нужно

изучить процесс графитизирующего отжига, который применяется для получения ковкого чугуна.

Поверхностная прочность деталей может быть повышена непосредственно термической обработкой, химико-термической обработкой и методами пластической деформации поверхности. Важно уяснить, какие стали относятся к улучшаемым, а какие – к цементируемым, а, следовательно, какому способу упрочнения можно подвергнуть деталь, изготовленную из той или иной марки стали.

При изучении различных способов поверхностной закалки особое внимание нужно уделить высокочастотной закалке.

**Химико-термическая обработка.** Изучение различных видов химико-термической обработки надлежит начать с цементации в твердой, газовой и жидкой средах. После этого легче понять и другие процессы, так как принцип всех видов химико-термической обработки один и тот же: получение насыщающего вещества повышенной концентрации в поверхностном слое, толщина которого зависит от температуры и времени процесса. Необходимо уяснить назначение отдельных процессов химико-термической обработки и получаемые при этом свойства (износостойкость, усталостную прочность, коррозионную устойчивость и др.).

Рассматривая влияние легирующих элементов на структуру и свойства сталей, необходимо изучить особенности вновь появляющихся фаз: легированного феррита, легированного аустенита и специальных карбидов. Нужно иметь в виду, что принципы термической обработки для легированных сталей остаются неизменными, однако положение критических точек меняется, и соответственно меняются структуры стали в равновесном состоянии, критическая скорость закалки, глубина прокаливаемости. Изменяются необходимые температуры нагрева для различных видов термической обработки. Надо помнить, что различные легирующие элементы и разная степень легирования придают сталям различную структуру и свойства.

Необходимо ознакомиться с литыми и порошковыми твердыми сплавами, как для наплавки изнашивающихся деталей машин, так и для режущего инструмента. Особое внимание нужно обратить на красностойкость и твердость этих сплавов.

**Цветные металлы и сплавы на их основе.** Изучить материалы, применяемые в электротехнике: медь, алюминий, пластмассы, резину. Обратить внимание, что в электротехнике применяются «чистые» металлы (без примесей) медь, алюминий. Чем меньше в них примесей, тем лучше их электрические свойства.

**Медь и сплавы на ее основе.** По ГОСТ 859-78 медь маркируется М00, М0, М1, М2, М3 в зависимости от содержания вредных примесей. Уяснить, что для изменения физико-механических характеристик в медь добавляются легирующие элементы. Если основным легирующим элементом является цинк, то сплавы называют латунями (ГОСТ 15527-89 и 17711-80), которые делятся на деформируемые и литейные. Маркировка деформируемых латуней, например: Л62, где Л – латунь, содержание меди - 62 %, остальное цинк или, например, ЛЖМ<sub>ц</sub>59-1-1, где Л – латунь, содержание меди – 59%, железа (Ж) – 1%, марганца (М<sub>ц</sub>) – 1%, остальное цинк. Маркировка литейных латуней, например, ЛЦ30А3Ж5, где Л – латунь, содержание цинка (Ц) - 30 %, алюминия (А) - 3 %, железа (Ж) - 5 %), остальное медь.

Вторым основным сплавом на основе меди являются бронзы (ГОСТ 5017-87 и 613-79). Это сплавы на основе меди, где цинк не является основным легирующим элементом. Маркировка БрОЦС3-1-1, где Бр – бронза, О, Ц, С – олово, цинк, свинец, а цифры – их процентное содержание, остальное медь.

**Алюминий и сплавы на его основе.** Чистый алюминий маркируется А0, А1, А2, А5 (цифра показывает процентное содержание примесей). В зависимости от содержания легирующих элементов и состояния алюминиевые сплавы подразделяются: деформируемые не упрочняемые термической обработкой (ГОСТ 4784-74) – АМц (с марганцем), АМг2

(марганец, магний 2%) и упрочняемые термической обработкой, например, Д1, Д16 (марганец, магний, медь); высокопрочные В95 (то же и хром, цинк), ковочные АК6 (то же и кремний); литейные (ГОСТ 2685-75) – АЛ2, АЛ4 и др. (с кремнием), АЛ19 (с медью, титаном) и др. – силумины.

Дополнительная маркировка алюминиевых сплавов. ТН – закаленный, естественно состаренный и нагартованный; ТНН – закаленный, нагартованный и искусственно состаренный; ТПП – закаленный и естественно состаренный, повышенной прочности; ГК – горячекатаный (листы, плиты); А – нормальная плакировка; У – утолщенная плакировка (8 % на сторону).

Особое внимание необходимо обратить на теорию старения деформируемых алюминиевых сплавов, изучив превращения в структуре и изменения свойств, при термической обработке – закалке и последующем искусственном или естественном старении.

**Неметаллические материалы.** Среди неметаллических материалов очень важны синтетические полимерные материалы. К ним относятся различные пластмассы, пленки, волокна, резины, клеи и лакокрасочные материалы. При изучении их структуры необходимо обратить внимание на форму элементарных звеньев и расположение химических связей и звеньев молекул.

Важно четко представлять, что полимер – химическое вещество специфического строения, а полимерный материал – технический продукт, изготовленный из полимера или на его основе.

Важно уметь оценивать эксплуатационные свойства пластмасс, так как в ряде случаев они с успехом заменяют другие, в том числе металлические материалы, а часто являются и незаменимыми. Стекловолокнистый анизотропный материал (СВАМ), например, превышает по удельной прочности сталь, титан и дюралюминий; политетрафторэтилен (фторопласт, или тефлон) обладает высокими диэлектрическими свойствами, а ретинакс – высокими фрикционными свойствами и т.д.

## **Технология конструкционных материалов**

При изучении этого раздела необходимо уяснить, что технология – это метод (способ) получения конструкционного материала и дальнейшее превращение его в готовую продукцию методом литья,ковки, штамповки, сварки,ковки, обработки резанием и т.д.

Основным методом получения металлов является процесс восстановления их из руд.

**Производство чугуна.** Исходные материалы для доменной плавки. Подготовка руд к плавке. Основные физико-химические процессы получения чугуна в современных доменных печах. Продукция доменного производства. Процесс прямого (вне доменного) получения железа из руд..

**Производство стали.** Исходные материалы для плавки стали. Основные физико-химические процессы получения стали. Производство стали в основных мартеновских печах, кислородных конверторах и дуговых печах. Способы разливки стали в изложницы. Строение слитков. Непрерывная разливка стали.

Способы повышения качества стали: обработка ее синтетическими шлаками в ковше, вакуумирование жидкой стали, электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплавы. Сравнительная оценка способов повышения качества стали.

**Производство цветных металлов.** Производство меди, алюминия. Способы плавки и рафинирования цветных металлов и сплавов.

**Порошковая металлургия.** Виды и свойства металлических и металлокерамических порошковых материалов. Методы получения порошков и изготовление из них полуфабрикатов и изделий. Продукция и технико-экономические характеристики порошковой металлургии.

**Методы получения заготовок. Литье в песчаные формы.** Основными способами получения заготовок являются литье и обработка давлением (в горячем и холодном состоянии). При получении заготовок

методом литья необходимо уяснить физические способы получения отливок, влияние структуры отливок на их свойства. Рассмотреть способы изготовления отливок. Изготовление отливок, литьем в песчаные формы. Сущность способа. Формовочные и стержневые смеси, литниковая система. Сборка и заливка форм. Выбивка отливок и стержней из отливок. Очистка поверхности.

Изучить специальные способы литья. Изготовление отливок литьем в оболочковые формы, литьем по выплавляемым моделям, литьем в кокиль, литьем под давлением, центробежным литьем. Сущность способов их достоинства и недостатки.

Особенности изготовления отливок из стали, медных, алюминиевых, магниевых и тугоплавких сплавов. Плавка сплавов и подготовка их к заливке. Особенности изготовления отливок различными способами литья. Области применения отливок из стали, медных, алюминиевых и тугоплавких сплавов.

Технологичность конструкции литых деталей. Особенности конструирования литых деталей с учетом литейных свойств сплавов (жидкотекучести, усадки), уровня напряжений в отливке, направленности затвердевания отливки, технологии изготовления литейных форм (выбора размера литейных форм, конструктивных уклонов, крепления литейных стержней в литейной форме, удобства извлечения модели из литейной формы и стержней из отливки) при литье в песчаные формы и специальными способами литья из различных сплавов.

Производство и применение фасонного литья в локомотивостроении, вагоностроении, строительном и дорожном машиностроении. Характеристика чугунного, стального и не железного литья, применяемого для деталей подвижного состава строительных и дорожных машин.

Технология производства, технологические требования и контроль качества отливок, применяемых для деталей локомотивов (гильзы, поршни, колесные центры и др.), вагонов (корпуса автосцепки, поглощающие

аппараты, боковины тележки, надрессорные балки, корпуса букс и др.), строительных и дорожных машин (детали тормозных, опорных, поворотных устройств экскаваторов).

Техника безопасности и охрана окружающей среды в литейном производстве.

#### **Получение заготовок методом пластического деформирования.**

При рассмотрении технологий обработки металлов давлением необходимо рассмотреть физические основы обработки металлов давлением. Степень пластической деформации и сопротивление деформированию. Ковкость, штампуемость. Влияние химического состава, температуры, скорости деформации на пластичность металла и его сопротивление деформированию. Роль отечественных ученых в развитии теории и практики обработки давлением. Классификация видов обработки металлов давлением, области и объем их применения.

**Получение профилей.** Определение понятий профиля и сортамента. Значение экономических профилей, тенденции расширения сортамента профилей. Способы получения профилей.

**Прокатка.** Сущность процесса прокатки. Продукция прокатного производства. Разновидность листового проката, сортового проката, проката труб. Прессование. Сущность процесса, волочение, производство гнутых профилей. Сущность процессов.

Способы получения поковок.

**Ковка.** Сущность процесса ковки, исходные заготовки. Операции ковки и применяемый инструмент. Особенности деформирования металла в операциях ковки. Последовательность операций при ковке поковок типа ступенчатого вала, кольца.

**Горячая объемная штамповка.** Сущность процесса горячей объемной штамповки, применяемые заготовки. Разновидности горячей объемной штамповки. Штамповка в открытых штампах. Штамповка в закрытых штампах. Прогрессивные малоотходные способы объемной штамповки:

выдавливанием, штамповкой в разъемных матрицах, поперечно-клиновой вальцовкой, ротационным обжатием.

Основные этапы технологического процесса горячей объемной штамповки. Исходные заготовки и требования к ним. Способы получения фасонных заготовок. Многоручьевая штамповка.

**Холодная объемная штамповка.** Сущность и схемы холодного выдавливания, высадки и объемной формовки. Типы деталей, получаемых различными способами холодной объемной штамповки, требования к их конструкции. Области применения холодной объемной штамповки.

**Листовая штамповка.** Сущность листовой штамповки.

Области применения способов обработки металла давлением профилей на железнодорожном транспорте. Изготовление заготовок для деталей подвижного состава, строительных и дорожных машин методом объемной штамповки (зубчатые колеса, клапаны, валики, втулки и др.).

Вопросы техники безопасности и охраны окружающей среды при применении способов обработки давлением.

**Сварка металлов.** Одним из важных технологических приемов снижения металлоемкости готовых конструкций, снижения потерь металла и повышения производительности в машиностроении является сварка. Самый распространенный способ – электросварка – великое русское изобретение. Необходимо рассмотреть классификацию способов сварки. Электрические виды сварки.

Дуговая сварка. Сущность процесса. Электрические и тепловые свойства дуги. Статическая характеристика дуги. Источники сварочного тока, требования к источникам тока и их внешние характеристики. Источники постоянного и переменного тока.

Ручная дуговая сварка. Электроды для ручной дуговой сварки. Сварочная проволока. Назначение и состав покрытия электрода. Классификация электродов по назначению и типу покрытия. Основные металлургические процессы в сварочной ванне. Защита, раскисление и



легирование металла сварочной ванны. Особенности кристаллизации сварного шва.

Особенности сварки различных материалов и сплавов. Свариваемость сталей, цветных и тугоплавких металлов и сплавов. Причины пониженной свариваемости. Процесс образования сварочных деформаций и напряжений. Образование горячих и холодных трещин.

Особенности сварки конструкционных углеродистых и легированных сталей. Образование закалочных структур и опасность возникновения холодных трещин. Рекомендуемые способы и режимы сварки.

Автоматическая сварка под флюсом. Сущность процесса.

Сварка в защитных газах. Сущность процесса и его разновидности: сварка неплавящимся и плавящимся электродами.

Ручная полуавтоматическая и автоматическая сварка.

Газовая сварка. Сущность процесса. Газы, применяемые при сварке. Характеристики газового напыления. Область применения газовой сварки.

Электрошлаковая сварка. Сущность и схема процесса. Особенности шлаковой ванны как распределенного источника теплоты. Разновидность способа.

Термомеханический класс сварки. Электрическая контактная сварка. Сущность процесса. Способы контактной электрической сварки: стыковая сопротивлением и оплавлением, точечная, шовная и рельефная. Принципиальное устройство машин для контактной электрической сварки.

Нанесение износостойких и жаростойких покрытий со специальными свойствами. Наплавка: дуговая, электрошлаковая, токами высокой частоты, плазменная и лазерная. Дуговая металлизация. Плазменное напыление покрытий. Контактнo-дуговое упрочнение деталей.

**Пайка металлов.** Виды пайки. Легкоплавкие и тугоплавкие припои. Особенности пайки сталей, медных, никелевых, алюминиевых и магниевых сплавов.

**Формообразование поверхностей деталей резанием,**

**электрофизическими и электрохимическими методами.** При изучении этого раздела необходимо рассмотреть современные технологические методы формообразования деталей машин, классификацию технологических методов обработки заготовок. Особое внимание уделять механизму процесса резания, включающему: схему обработки, движению при резании, поверхностям на обрабатываемой детали. Рассмотреть резец как основной инструмент при резании (его части и элементы). Материалы, применяемые для изготовления резцов и других режущих инструментов. К таким материалам относятся инструментальные стали, маркируемые У7...У13 ГОСТ 1435-90, быстрорежущие стали Р9, Р18 (ГОСТ 19265-73), твердые сплавы ВК (ВК8, ВК9 и др.), ТК (Т5К6, Т15К6, Т30К4 и др.) ГОСТ 3882-74, легированные инструментальные стали (9ХС, ХВТ и др.).

Процесс резания сопровождается стружкообразованием. В месте контакта лезвия режущего инструмента с деталью образуется нарост и наклеп, что приводит к изменению геометрии режущего инструмента. Рассмотреть физическую сущность этого процесса. Силы резания, вибрации и способы борьбы с ними. Влияние тепла, выделяемого при реакции на процесс формообразования поверхности деталей машин. Охлаждающие жидкости.

Влияние физико-механических характеристик материалов заготовок и инструментов на физику процесса резания. Понятие об обрабатываемости материалов.

Инструмент для формообразования поверхностей деталей машин. Кинематика и физика процессов обработки – основа проектирования инструментов. Конструктивные схемы инструментов по принципу воспроизведения образующих геометрических форм поверхностей обрабатываемых заготовок. Инструменты для воздействия на материал заготовки различными видами энергии.

Влияние технологических методов обработки на конструктивные формы оборудования. Принципы построения конструктивных форм

оборудования. Кинематика процесса формообразования поверхностей – основа проектирования оборудования. Принципиальные конструктивные формы оборудования. Классификация движений узлов металлорежущих станков. Конструирование основных узлов оборудования как результат воплощения процесса формообразования. Требования к оборудованию в зависимости от типа производства и параметров обрабатываемых заготовок деталей машин.

***Металлорежущие станки.*** Станки токарной группы. Технологические методы формообразования поверхностей деталей машин резанием с использованием лезвийного инструмента. Технологические возможности метода обработки заготовок точением. Назначение метода и принципы формообразования поверхностей деталей машин на станках токарной группы. Схема обработки заготовок и физико-механические особенности процессов резания. Характеристика метода по применяемому режущему инструменту и оборудованию. Формирование показателей качества поверхностей тел вращения и управление ими при обработке точением. Элементы геометрии и технологии изготовления токарных резцов.

***Станки сверлильной группы.*** Технологические методы обработки отверстий. Технологические возможности методов обработки отверстий сверлением, растачиванием, протягиванием и зенкерованием. Особенности конструкций протяжек и протяжных станков. Схема обработки заготовок и особенности кинематики и физики резания при обработке отверстий. Особенности формообразования отверстий при растачивании. Применяемый режущий инструмент и оборудование. Сравнительная характеристика методов обработки отверстий (обеспечение точности формы и размеров отверстий, качество поверхности, производительность и т.п.).

Станки строгальные и долбежные. Процессы строгания и долбления плоских поверхностей. Особенности конструкций строгальных и долбежных резцов и применяемых металлорежущих станков.

***Фрезерные станки.*** Технологические возможности метода обработки

заготовок фрезерованием. Назначение метода и обеспечение кинематики и физики процесса резания при использовании многолезвийного инструмента. Применяемый инструмент. Схема обработки. Особенности обработки фасонных поверхностей при фрезеровании. Принципиальные схемы конструкций станков фрезерной группы. Управление показателями качества поверхностей деталей машин при фрезеровании.

***Зубообрабатывающие станки.*** Технологические методы нарезания зубьев зубчатых колес. Зубчатые передачи в современном машино- и приборостроении. Способы профилирования зубчатых поверхностей и технологические методы их обработки. Типы станков и применяемый режущий инструмент. Влияние технологических методов на качественные характеристики зубчатых колес. Делительная головка.

Технологические методы обработки поверхностей с учетом конструктивных особенностей деталей машин. Технологические методы обработки плоских поверхностей корпусных деталей и станин. Особенности методов формообразования глубоких отверстий сверлением. Протягивание наружных поверхностей. Специальные технологические методы обработки деталей.

***Шлифовальные станки.*** Технологические методы формообразования поверхностей деталей машин с использованием абразивного инструмента. Технологические возможности метода обработки поверхностей шлифованием. Назначение метода. Физическая сущность и особенности процесса шлифования. Абразивные материалы. Характеристика метода по применяемому инструменту и оборудованию. Схемы обработки поверхностей шлифованием. Показатели качества поверхностей деталей машин при шлифовании.

Технологические методы отделочной обработки поверхностей. Роль отделочных методов обработки в технологической последовательности изготовления деталей, физическая сущность и особенности кинематики отделочных методов обработки наружных и внутренних цилиндрических

поверхностей (хонингование, суперфиниширование и др.). Технологические возможности методов доводки поверхностей. Технологические методы отделки зубьев зубчатых колес, изготовления резьбовых и шлицевых соединений.

***Электрохимические (ЭХ) и электрофизические (ЭФ) методы формообразования поверхностей деталей машин.*** Роль и назначение ЭФ- и ЭХ-методов обработки в машиностроении. Физические и химические процессы, лежащие в основе технологических методов. Преимущества и недостатки методов. Реализация требований к инструментальным материалам и конструкции оборудования с учетом физики и кинематики ЭФ- и ЭХ-методов обработки. Технологические возможности методов. Основные технико-экономические показатели методов. Особенности технологичности конструкций деталей машин, обрабатываемых ЭФ- и ЭХ-методами.

Пути автоматизации технологических методов формообразования поверхностей. Автоматизация станков, станки-автоматы и полуавтоматы. Автоматизированные процессы обработки резанием на базе станков с программным управлением.

## 7. ТЕМАТИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ, ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ

### 1 Основные свойства материалов

<b>АЛЛОТРОПИЯ, или</b>	— Способность некоторых металлов существовать в двух или нескольких кристаллических формах.
<b>ПОЛИМОРФИЗМ</b>	
<b>АНИЗОТРОПИЯ</b>	— Различие свойств металлов и сплавов в разных кристаллографических направлениях.
<b>ВАКАНСИЯ</b>	— Точечный дефект кристаллической решетки – узел кристаллической решетки, в котором отсутствует атом или ион.
<b>ВАКУУМИРОВАНИЕ СТАЛИ</b>	— Кратковременная обработка под вакуумом выплавленной обычными методами жидкой стали с целью ее дегазации и раскисления.
<b>ВРЕМЕННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРЫВУ (<math>\sigma_B</math>)</b>	— Значение предела прочности материала при испытаниях на растяжение.
<b>ВЯЗКОСТЬ</b>	— Свойство твердых тел необратимо поглощать энергию при их пластичной деформации.
<b>ДЕНДРИТ</b>	— Кристалл древовидной формы, возникающий при кристаллизации в результате различий в скоростях роста зародыша в разных кристаллографических направлениях.
<b>ДЕФЕКТ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ</b>	— Нарушение строгой периодичности расположения частиц в кристаллической решетке.
<b>линейный Д.</b>	— Дефект кристаллической решетки, имеющий малые размеры (несколько атомных диаметров) в двух измерениях и значительную протяженность.
<b>поверхностный Д.</b>	— Дефект кристаллической решетки, имеющий малые размеры (несколько атомных диаметров) только в одном измерении, в двух других он соизмерим с размерами кристалла.
<b>точечный Д.</b>	— Дефект кристаллической решетки, размеры которого малы (не более нескольких атомных диаметров) во всех трех измерениях.
<b>ДЕФОРМАЦИЯ</b>	— Изменение взаимного расположения точек твердого тела под воздействием внешних или внутренних сил.

<b>горячая Д.</b>	— Деформирование, протекающие при температурах выше температуры рекристаллизации.
<b>холодная Д.</b>	— Деформирование без предварительного нагрева материала или деформирование при температурах не превышающих температуры рекристаллизации (тепловое деформирование).
<b>ДИСЛОКАЦИЯ</b>	— Линейный дефект кристаллической решетки, нарушающий правильное чередование атомных плоскостей и образующий внутри кристалла границу зоны сдвига.
<b>ЗЕРНО</b>	— Отдельные кристаллиты поликристаллического конгломерата, разделенные между собой границами.
<b>ИЗЛОМ</b>	— Поверхность разрушения образца или изделия.
<b>вязкий или волокнистый И.</b>	— Поверхность вязкого разрушения с характерными “волокнами”, вытянутыми в направлении нагружения под действием деформации зерен, разорванных в процессе разрушения.
<b>усталостный И.</b>	— Излом, возникающий под давлением знакопеременных или циклических нагрузок.
<b>хрупкий И.</b>	— Излом без видимых следов пластической деформации на поверхности разрушения.
<b>КОМПОНЕНТ</b>	— Чистый химический элемент или устойчивое химическое соединение, входящее в состав сплава.
<b>КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ</b>	— Образование кристаллов из паров, растворов, расплавов или из вещества в аморфном состоянии.
<b>МАКРОСТРУКТУРА</b>	— Строение металлов и сплавов, видимое невооруженным глазом или с помощью лупы на шлифованных и/или протравленных образцах.
<b>МИКРОСТРУКТУРА</b>	— Строение металлов и сплавов, выявляемое с помощью микроскопа на шлифованных и (или) протравленных образцах (в оптическом и растровом электронных микроскопах) или на репликах и фольгах (в просвечивающем электронном микроскопе).
<b>НАКЛЕП</b>	— Изменение структуры и свойств металлов и сплавов в результате пластической деформации. Сопровождается повышением твердости и прочности и понижением пластичности и ударной вязкости.
<b>ПЕРИОД РЕШЕТКИ или ПАРАМЕТР РЕШЕТКИ</b>	— Расстояние между центрами ближайших атомов в элементарной ячейке.
<b>ПЛАСТИЧНОСТЬ</b>	— Способность твердых тел к развитию пластических

деформаций без разрушения под действием внешних сил при напряжениях, превышающих предел текучести.

**ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ**

— Условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом.

**ПРОЧНОСТЬ**

— Способность твердых тел сопротивляться разрушению или пластической деформации под действием внешних нагрузок.

**ТРЕЩИНА**

— Двумерный дефект – нарушение сплошности материала с образованием свободных поверхностей.

**ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ**

— Способность материала противостоять образованию трещин, характеризуемая величиной вязкости разрушения.

**УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ**

— Механическая характеристика материала, соответствующая отношению работы разрушения при ударном изгибе образца к начальной площади его конечного сечения в плоскости излома.

**УПРУГОСТЬ**

— Способность тел восстанавливать свою форму и объем или только объем после прекращения действия внешних сил.

**ШЛИФ**

— Полированная поверхность сечения металла или минерала, подготовленная для визуального или микроскопического исследования.

**2 Основы теории сплавов**

**ГЕТЕРОГЕННАЯ СИСТЕМА**

— Макроскопически неоднородная физико-химическая система, состоящая из различных фаз, разграниченных поверхностями раздела.

**ГЕТЕРОГЕННЫЕ СПЛАВЫ**

— Сплавы, структура которых состоит из двух или более фаз.

**ГОМОГЕННАЯ СИСТЕМА**

— Макроскопически однородная система, состоящая из одной фазы.

**ГОМОГЕНИЗАЦИОННЫЙ ОТЖИГ**

— Отжиг при высокой температуре и длительной выдержке с целью уменьшения химической неоднородности, обусловленной ликвацией.

**ГОМОГЕННЫЕ СПЛАВЫ**

— Сплавы, структура которых состоит из одной фазы (например, твердого раствора).

**ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ, или БИНАРНЫЕ Д.С., ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ**

— Физико-химические системы, состоящие из двух независимых составных частей (компонентов).



<b>ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ</b>	— Диаграмма, показывающая равновесное фазовое состояние сплавов при разных температурах (давлениях) в зависимости от их концентрации или графическое изображение соотношения между параметрами состояния термодинамически равновесной системы (температурой, химическим и фазовым составом).
<b>ЖИДКОТЕКУЧЕСТЬ</b>	— Способность жидкого металла заполнять литейную форму. Характеристика жидкого металла по величине, обратная вязкости.
<b>ЗОНАЛЬНАЯ ЛИКВИДИЦИЯ</b>	— Ликвация в отдельных частях слитка или изделия.
<b>КОНОДА</b>	— Связующая прямая, соединяющая сопряженные точки, изображающие составы равновесных фаз.
<b>КОНЦЕНТРАЦИЯ</b>	— Количество вещества, содержащееся в единице массы или объема сплава.
<b>КРИВАЯ НАГРЕВА (охлаждения)</b>	— График, характеризующий увеличение (уменьшение) температуры от времени.
<b>КРИТИЧЕСКИЕ ТОЧКИ</b>	— Точки, соответствующие изменению фазового состояния в сплаве.
<b>ЛИКВАЦИЯ</b>	— Неоднородность сплава по химическому составу, структуре и неметаллическим включениям, образующаяся при кристаллизации слитка.
<b>ЛИКВИДУС</b>	— Геометрическое место точек температур начала кристаллизации всех сплавов системы или графическое изображение на диаграмме состояния (точка, линия или поверхность) зависимости температур начала кристаллизации (или завершения расплавления) от химического состава сплава.
<b>МОДИФИКАТОР</b>	— Добавка, вводимая в расплав для измельчения зерна и улучшения механических свойств сплава.
<b>МОДИФИЦИРОВАНИЕ</b>	— Введение модификатора в металлический расплав.
<b>НЕОГРАНИЧЕННЫЙ ТВЕРДЫЙ РАСТВОР</b>	— Твердый раствор замещения между двумя или более компонентами, неограниченно растворимыми в твердом состоянии.
<b>ИНВARIANTНОЕ РАВНОВЕСИЕ</b>	— Равновесие, при котором сплав из данного числа фаз может существовать только в совершенно определенных условиях: при постоянной температуре и определенном составе всех находящихся в равновесии фаз. Это означает, что превращение начинается и заканчивается при одной постоянной температуре.

**ОГРАНИЧЕННЫЙ  
ТВЕРДЫЙ РАСТВОР**

— Твердый раствор между двумя или более компонентами, существующий до определенной, ограниченной концентрации компонентов.

**ПРАВИЛО ОТРЕЗКОВ  
(рычага)**

— Используют для определения количественного соотношения фаз, находящихся в равновесии при данной температуре.

**ПРАВИЛО ФАЗ**

— Позволяет определить закономерность изменения числа фаз в гетерогенной системе, устанавливая зависимость между числом термодинамических степеней свободы (**C**), числом компонентов (**K**), образующих систему, и числом фаз (**Φ**), находящихся в равновесии:  $C = K - \Phi + 1$ , где **1** – число внешних факторов.

**ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЕ**

— Охлаждение высокотемпературной фазы ниже температуры ее равновесного фазового перехода в низкотемпературную.

**РАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯ-  
НИЕ СИСТЕМЫ**

— Характеризуется при постоянных внешних условиях неизменностью термодинамических параметров во времени и отсутствием в системе потоков энергии и вещества.

**УСАДОЧНАЯ РАКОВИНА**

— Полость в слитке (обычно в верхней части), образуемая вследствие усадки при затвердевании металла.

**РАСТВОР**

— Однородная смесь двух или большего числа компонентов, равномерно распределенных в виде атомов, ионов или молекул в жидкости или твердом веществе.

**СОЛИДУС**

— Геометрическое место точек температур конца кристаллизации всех сплавов системы.

**СПЛАВЫ**

— Однородные системы из двух или более элементов, претерпевающие переход из жидкого состояния в твердое агрегатное состояние и обладающие характерными металлическими свойствами.

**СТАБИЛЬНАЯ ФАЗА**

— Фаза, устойчивая в данных условиях.

**СТРУКТУРНАЯ  
СОСТАВЛЯЮЩАЯ**

— Элемент микроструктуры сплава с характерным и однообразным строением, а также или отдельные элементы микроструктуры сплава с характерным строением при средних увеличениях.

**ТВЕРДЫЙ РАСТВОР**

— Однородные твердые вещества, состоящие из нескольких компонентов, концентрация которых может быть изменена без нарушения однородности, или однофазное твердое состояние сплава, представляющее собой кристаллическую решетку растворителя, в

которой находятся атомы одного или более растворенных элементов.

**ТВЕРДЫЙ РАСТВОР  
ВНЕДРЕНИЯ**

— Раствор между металлом и неметаллом, в котором атомы неметалла располагаются в междоузлиях атомов металла.

**ТВЕРДЫЙ РАСТВОР  
ЗАМЕЩЕНИЯ**

— Раствор между двумя или более металлами, в котором атом одного компонента занимает место любого атома в кристаллической решетке второго компонента.

**ФАЗА**

— Однородная по химическому составу, кристаллической структуре и физическим свойствам часть системы, отделенная от других ее частей поверхностью раздела.

**ФАЗОВОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ**

— Превращение, при котором происходит изменение фазового состояния системы

**ЭВТЕКТИКА**

— Смесь двух или более твердых фаз, одновременно образующаяся из расплава, характеризующаяся постоянством состава.

**ЭВТЕКТИЧЕСКОЕ  
ПРЕВРАЩЕНИЕ**

— Превращение, происходящее при постоянной температуре и неизменных составах участвующих фаз, одной из которых является жидкость или процесс образования двух или более твердых фаз из жидкой; в равновесных условиях происходит при постоянной температуре.

### **3 Железоуглеродистые сплавы**

**АВТОМАТНАЯ СТАЛЬ**

— Сталь с повышенным содержанием серы и фосфора, легко поддающаяся скоростной обработке на металлорежущих станках-автоматах.

**АУСТЕНИТ**

— Фаза, структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе.

**ГРАФИТ**

— Аллотропическая модификация углерода с гексагональной кристаллической решеткой.

**ЖЕЛЕЗО**

— Химический элемент, Fe, с атомной массой 55,84; относится к группе черных металлов,  $t_{пл}$  1539 ° C; важнейший металл современной техники, основа сплавов примерно 95 % металлической продукции.

**$\alpha$ -железо**

— Низкотемпературная аллотропическая модификация железа с о.ц.к. решеткой, существующая в чистом железе в интервале температур от 0 до 911 ° C.

<b>γ -железо</b>	— Высокотемпературная аллотропическая модификация железа с г.ц.к. решеткой, существующая в чистом железе в интервале температур от 911 до 1392 ° С.
<b>δ -железо</b>	— Высокотемпературная аллотропическая модификация железа с о.ц.к. решеткой, существующая в чистом железе в интервале температур от 1392 ° С до плавления.
<b>ЛЕДЕБУРИТ</b>	— Структурная составляющая железоуглеродистых сплавов (главным образом чугунов) – эвтектическая смесь аустенита и цементита, образующаяся из расплава при температуре ниже 1147 ° С.
<b>МЕТАСТАБИЛЬНАЯ ФАЗА</b>	— Промежуточная, относительно устойчивая фаза, которая может перейти в более устойчивую под действием внешнего воздействия или самопроизвольно.
<b>ПЕРЛИТ</b>	— Структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – эвтектоидная смесь феррита и цементита, имеющая межпластинчатое расстояние более 0,3 мкм.
<b>СТАЛЬ</b>	— Сплав железа с углеродом, содержащий от 0,025 до 2,14 % углерода, а также ряд других элементов.
<b>высококачественная сталь</b>	— Сталь с низким содержанием вредных примесей (обычно фосфора не более 0,025 % и серы не более 0,025 %), обладающая повышенными механическими свойствами.
<b>высокоуглеродистая сталь</b>	— Сталь содержащая более 0,6 % углерода.
<b>высокопрочная сталь</b>	— Легированная конструкционная сталь с временным сопротивлением разрыву 1500 МПа и более.
<b>Сталь обыкновенного качества</b>	— Сталь с содержанием вредных примесей не более: фосфора 0,040 % и серы 0,050 %.
<b>рессорно-пружинная сталь</b>	— Качественная конструкционная сталь содержащая 0,5-0,6 % углерода.
<b>Улучшаемая сталь</b>	— Содержит 0,3 – 0,45 %С. Сталь, изделия из которой подвергают закалке с высоким отпуском.
<b>углеродистая сталь</b>	— Сталь, не содержащая специально введенных легирующих элементов.
<b>цементируемая сталь</b>	— Машиностроительная низкоуглеродистая сталь, подвергаемая цементации.

<b>УГЛЕРОД</b>	— Химический элемент, С, с атомной массой 12; имеет две аллотропические модификации. Входит в состав стали и чугуна.
<b>ФЕРРИТ</b>	— Структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – твердый раствор углерода (до 0,025 %) в $\alpha$ - железе.
<b>ЦЕМЕНТИТ</b>	— Структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – карбид железа, $Fe_3C$ , содержащий 6,67 % углерода.
<b>вторичный Ц.</b>	— Цементит, образующийся из аустенита при охлаждении вследствие понижения растворимости в нем углерода.
<b>первичный Ц.</b>	— Цементит, образующийся в заэвтектических чугунах при кристаллизации их из расплава.
<b>третичный Ц.</b>	— Цементит, образующийся из феррита при охлаждении вследствие понижения растворимости в нем углерода.
<b>ЧУГУН</b>	— Сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14 % углерода, постоянные примеси, а иногда и легирующие элементы.
<b>белый чугун</b>	— Чугун, в котором весь углерод находится в химически связанном состоянии в виде цементита; имеет матово-белый цвет излома.
<b>высокопрочный чугун</b>	— Чугун со структурой графита шаровидной формы; отличается высокой прочностью и пластичностью; часто используется вместо стали.
<b>с вермикулярным графитом (ЧВГ)</b>	— “Vermikulus” – червячок, графитизированный чугун с червеобразной формой графита. Отношение длины графитной пластинки к ее ширине больше 10.
<b>доэвтектический чугун</b>	— Чугун, углеродный эквивалент которого ниже 4,3 %.
<b>заэвтектический чугун</b>	— Чугун, углеродный эквивалент которого выше 4,3 %.
<b>ковкий чугун</b>	— Чугун в котором углерод частично или полностью (кроме углерода в феррите) находится в структурно свободном состоянии в форме хлопьевидного графита, что обеспечивает высокий уровень его пластичности и прочности.
<b>серый чугун</b>	— Чугун в котором углерод частично или полностью (кроме углерода в феррите) находится в структурно свободном состоянии.

**эвтектический чугун** — Чугун, углеродный эквивалент которого составляет 4,3 %.

**ЭВТЕКТОИД** — Смесь двух стабильных фаз, имеющая постоянный для данной системы состав и образующаяся при эвтектоидном превращении.

**ЭВТЕКТОИДНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ** — Превращение, происходящее при постоянной температуре и неизменных составах участвующих фаз, находящихся в твердом состоянии, или полиморфное превращение, заключающееся в распаде при охлаждении равновесного твердого раствора на две стабильные фазы; характеризуется температурой эвтектоидного превращения, при которой все три фазы находятся в равновесии; полностью обратимо при нагреве.

#### **4 Термическая и химико-термическая обработка**

**АЗОТИРОВАНИЕ** — ХТО с насыщением поверхностного слоя стали, чугуна и сплавов тугоплавких металлов азотом при температуре 500 – 1200 ° С.

**АЛИТИРОВАНИЕ** — ХТО с диффузионным насыщением поверхности металлов и сплавов алюминием.

**АТМОСФЕРА** — Газовая среда, в которой производится обработка материала.

**АУСТЕНИТ** — Фаза, структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – твердый раствор углерода, а также легирующих элементов в  $\gamma$ -железе.

**остаточный аустенит** — Неустойчивый аустенит, существующий в качестве структурной составляющей в мартенситной или бейнитной структуре стали.

**переохлажденный аустенит** — Аустенит, существующий при температурах ниже температуры его термодинамической устойчивости.

**АУСТЕНИЗАЦИЯ** — Процесс образования аустенита при нагреве сталей выше критических температур.

**БИМЕТАЛЛ** — Материал, состоящий из двух разнородных, прочно соединенных между собой металлов или сплавов.

**БОРИРОВАНИЕ** — ХТО с насыщением поверхности металлов и сплавов бором для повышения износостойкости, твердости и коррозионной стойкости.

**БОРОСИЛИЦИРОВАНИЕ** — ХТО, заключающаяся в совместном или последовательном насыщении поверхности металла бором и кремнием.

<b>БОРОХРОМИРОВАНИЕ</b>	— ХТО, заключающаяся в совместном насыщении металла бором и хромом.
<b>ВАННА</b>	— Расплавленная среда. Открытая емкость для жидкой среды.
<b>ВОЗВРАТ</b>	— Частичное восстановление совершенства кристаллической структуры и свойств деформированных металлов или сплавов при их нагреве ниже температуры рекристаллизации.
<b>ЗАКАЛКА</b>	— Термическая обработка с нагревом до температур, превышающих температуру фазовых превращений, с выдержкой и с последующим охлаждением металла или сплава со скоростью, превышающей критическую; обеспечивает получение неравновесной структуры.
<b>закалка в водных растворах</b>	— Закалка с охлаждением в водных растворах солей, кислот и щелочей, обеспечивающих интенсификацию процесса; охлаждающая способность среды зависит от состава, концентрации и температуры растворов.
<b>закалка в двух средах</b>	— Закалка с охлаждением в двух средах (напр. через воду в масло), при которой для уменьшения закалочных напряжений используют замедленное охлаждение стали в области мартенситного превращения.
<b>изотермическая закалка</b>	— Закалка, при которой для уменьшения закалочных напряжений осуществляют изотермическую выдержку метастабильного аустенита, обеспечивающую получение бейнита.
<b>индукционная закалка</b>	— Поверхностная закалка с нагревом в индукторе токами высокой частоты.
<b>закалка в масле</b>	— Закалка с охлаждением в минеральных маслах, обеспечивающая равномерное охлаждение изделия в широком интервале температур.
<b>неполная закалка</b>	— Закалка доэвтектоидной стали с нагревом до температур межкритического интервала $A_{c1} - A_{c3}$ , не обеспечивающая полного превращения в аустенит; приводит к формированию феррито-мартенситной структуры.
<b>объемная закалка</b>	— Закалка, при которой изделие нагревают до заданной температуры по всему объему.
<b>закалка с обработкой холодом</b>	— Закалка, сопровождаемая охлаждением до температуры ниже комнатной, обеспечивающим перевод остаточного аустенита в мартенсит.
<b>поверхностная закалка</b>	— Закалка, при которой только поверхностный слой изделия нагревают до заданной температуры.

<b>полная закалка</b>	— Закалка доэвтектоидной стали с нагревом выше критической температуры $A_{c3}$ , обеспечивающая полный переход в аустенитное состояние; последующее охлаждение приводит к образованию в основном мартенситной структуры.
<b>закалка с самоотпуском</b>	— Закалка стали, при которой для уменьшения закалочных напряжений осуществляют вторую изотермическую выдержку метастабильного аустенита при температуре выше температуры начала мартенситного превращения; распад аустенита осуществляется при последующем медленном охлаждении в области образования мартенсита.
<b>ступенчатая закалка</b>	— Закалка стали, при которой для уменьшения закалочных напряжений осуществляют вторую изотермическую выдержку метастабильного аустенита при температуре выше температуры начала мартенситного превращения; распад аустенита осуществляется при последующем медленном охлаждении в области образования мартенсита.
<b>ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ</b>	— Способность стали повышать твердость при закалке. Возрастает с ростом содержания углерода.
<b>КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА</b> (температура)	— Температура начала или конца фазового превращения в сплаве; может быть определена из диаграммы состояния элементов, входящих в состав сплава.
<b>T. A<sub>1</sub></b>	— Температура в равновесной системе Fe – Fe <sub>3</sub> C, при которой протекает превращение перлит ↔ аустенит.
<b>T. A<sub>2</sub></b>	— Температура соответствующая точке Кюри феррита.
<b>T. A<sub>3</sub></b>	— Температура, в равновесной системе Fe – Fe <sub>3</sub> C, выше которой в доэвтектоидных сталях присутствует одна фаза – аустенит.
<b>T. A<sub>c</sub></b>	— Температура в равновесной системе Fe – Fe <sub>3</sub> C, при которой фазовое превращение протекает в процессе нагрева.
<b>T. A<sub>cm</sub></b>	— Температура в равновесной системе Fe – Fe <sub>3</sub> C, выше которой в заэвтектоидных сталях присутствует одна фаза – аустенит.
<b>T. A<sub>r</sub></b>	— Температура в равновесной системе Fe – Fe <sub>3</sub> C, при которой фазовое превращение протекает в процессе охлаждения.



<b>КАРБИУРИЗАТОР</b>	— Жидкая, твердая или газообразная среда с высоким углеродным потенциалом, в которой происходит насыщение поверхности стали углеродом.
<b>КОРОБЛЕНИЕ</b>	— Искажение формы изделия вследствие действия внутренних напряжений, образующийся из-за неравномерной деформации по длине и ширине заготовки.
<b>МАРТЕНСИТ</b>	— Пересыщенный твердый раствор углерода в $\alpha$ - железе, образующийся при закалке из аустенита.
<b>отпущенный мартенсит</b>	— Мартенсит, образованный из мартенсита закалки в процессе отпуска или самоотпуска стали в результате частичного выделения углерода из пересыщенного твердого раствора.
<b>НОРМАЛИЗАЦИЯ</b>	— Термическая обработка стали или чугуна, заключающаяся в нагреве выше критических точек (с получением преимущественно структуры аустенита), выдержке и охлаждении на воздухе.
<b>НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ</b>	— ХТО с одновременным насыщением стали углеродом и азотом в газовой среде при температуре 850 – 870 °С.
<b>ОТДЫХ</b>	— Одна из стадий возврата, при которой происходит перераспределение и уменьшение концентрации точечных дефектов без образования новых субзерен.
<b>ОТЖИГ</b>	— Термическая обработка с нагревом до температур, выше либо ниже фазовых или структурных превращений, с выдержкой и последующим медленным охлаждением; при этом обеспечивается получение равновесной структуры.
<b>ОТПУСК</b>	— Термическая обработка стали с нагревом ниже температуры полиморфного превращения, с выдержкой и охлаждением; обеспечивает получение более равновесной структуры и оптимальное сочетание служебных свойств.
<b>высокий отпуск</b>	— Отпуск с нагревом до 500 – 700 °С, обеспечивающий высокую конструкционную прочность стали.
<b>низкий отпуск</b>	— Отпуск с нагревом до температур ниже 300 °С, обеспечивающий твердость, прочность и износостойкость стали на высоком уровне.
<b>средний отпуск</b>	— Отпуск с нагревом до 300 – 500 °С, обеспечивающий сочетание высокой прочности, упругости и вязкости.
<b>сорбит отпуск</b>	— Сорбит, образовавшийся при отпуске закаленной стали в результате коагуляции зерен цементита, имеет

зернистое строение.

**троостит отпуск**

— Троостит с зернистым строением, образовавшийся при распаде мартенсита в процессе отпуска.

**ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ**

— Дефект термической обработки, заключающийся в обеднении поверхностного слоя стали углеродом.

**ОБРАБОТКА**

**высокотемпературная  
термомеханическая  
обработка (ВТМО)**

— ТМО в условиях стабильности высокотемпературной фазы с последующим охлаждением со скоростью выше критической; заключительная операция – отпуск или старение.

**низкотемпературная  
термомеханическая  
обработка (НТМО)**

— ТМО в условиях метастабильности высокотемпературной фазы с последующим охлаждением со скоростью выше (или равной) критической; заключительная операция – отпуск или старение.

**механико-термическая  
обработка (МТО)**

— Деформирование изделия после полного цикла термической обработки с небольшой степенью деформации (0,3 – 10 %) при одновременном или последующем нагреве до температур ниже температуры рекристаллизации.

**предварительная  
термомеханическая  
обработка (ПТМО)**

— ТМО с предварительным холодным деформированием, за которым следует полный цикл термической обработки (закалка и отпуск).

**термомеханическая  
обработка (ТМО)**

— Совокупность операций пластического деформирования и термической обработки, в результате которых формируется повышенная плотность дефектов кристаллического строения металла или сплава, что приводит к повышению прочности.

**ПЕРЕЖОГ**

— Необратимый дефект металла или сплава, заключающийся в окислении или оплавлении границ зерен в результате значительного превышения заданной температуры нагрева.

**ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ**

— Глубина слоя от поверхности детали на которую сталь восприняла закалку. Зависит от содержания легирующих элементов.

**РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ**

— Процесс зарождения и роста новых зерен в деформированном поликристаллическом металле или сплаве, приводящий к повышению структурного совершенства и восстановлению свойств до уровня недеформированного состояния.

**САМООТПУСК**

— Отпуск стали, происходящий за счет теплоты,

аккумулятивной при закалке.

**СИНЕЛОМКОСТЬ**

— Снижение пластичности стали при одновременном повышении прочности, характерное для деформации при температурах возникновения синего цвета побежалости (200 – 300 °С).

**закаленный СЛОЙ**

— Поверхностный слой материала, охлаждение которого с температуры закалки осуществлялось со скоростью выше критической.

**ТЕРМООБРАБОТКА (ТО)**

— Совокупность операций теплового воздействия на материал с целью изменения его структуры и свойств в нужном направлении.

**5 Цветные металлы и сплавы на их основе**

**АНТИФРИКЦИОННЫЕ СПЛАВЫ**

— Сплавы с низким коэффициентом трения и высоким уровнем износостойкости.

**БАББИТЫ**

— Антифрикционный сплав на основе олова или свинца; дополнительно может быть легирован Pb, Sn, Sb, Cu, Cd, Co, Na; высокие антифрикционные свойства обеспечиваются гетерогенной структурой сплава.

**БРОНЗА**

— Сплав меди (обычно многокомпонентный) с др. элементами (кроме цинка).

**ЛАТУНЬ**

— Сплав на основе меди, содержащий до 50 % цинка; может быть дополнительно легирован алюминием, никелем и др. элементами; используется в литом и деформированном состояниях.

**морская Л.**

— Латунь, легированная оловом, имеет хорошую коррозионную стойкость в морской воде.

**литейная Л.**

— Латунь, отличающаяся малой усадкой и высокой жидкотекучестью.

**однофазная двухкомпонентная Л.**

— Латунь, содержащая до 39 процентов цинка.

**Сплавы на основе АЛЮМИНИЯ**

— Различают литейные и деформируемые алюминиевые сплавы. Деформируемые сплавы алюминия подразделяют на термически неупрочняемые и термически упрочняемые.

**деформируемые Al сплавы, упрочняемые термической обработкой**

— К ним относятся высокопрочные Al сплавы и дуралюмины. Упрочняющая термическая обработка заключается в закалке и последующем старении.

**литейный Al сплав**

— К ним относятся силумины. Силумины подвергают

модифицированию для измельчения эвтектики.

## **МАГНАЛИИ**

— Коррозионностойкие сплавы на основе алюминия, содержащие до 13 % магния. Относятся к деформируемым, термически неупрочняемым.

## **6 Неметаллические материалы**

### **ВАКУУМНОЕ СТАРЕНИЕ РЕЗИНЫ**

— Резины газопроницаемы, термоокисляемы, выделяют газы. Оценка вакуумстойкости делается по потере массы и зависит от типа каучука. Устойчивы в вакууме – СКИ - 3, СКД, СКМС - 10 и др.

### **ГЕРМЕТИКИ**

— Полимерные композиции обычно на основе полисульфидных или кремнийорганических жидких каучуков), обеспечивающие непроницаемость болтовых и заклепочных соединений металлических конструкций. Герметизирующая прослойка образуется непосредственно на соединительном шве в результате вулканизации (отверждения) полимерной основы герметика.

### **КАУЧУК СИНТЕТИЧЕСКИЙ (СК)**

— Синтетические полимеры, которые при обычных температурах высокоэластичны и могут быть переработаны в резину. СК делят обычно на каучуки общего и специального назначения.

### **КЕРАМИКА**

— Изделия и материалы, получаемые спеканием оксидов металлов, глин и смесей, а также других тугоплавких соединений; характеризуются как правило, повышенной твердостью, прочностью и жаростойкостью.

### **КЛЕЙ**

— Клей – пленкообразующий материал. Состоит из растворов или расплавов полимеров, а также неорганических веществ. Для создания определенной вязкости добавляют растворители; устранения усадочных явлений – пластификаторы; перевода в термостабильное состояние – отвердители и катализаторы.

### **КОНСТРУКТИВНАЯ ПРОЧНОСТЬ**

— Конструктивную прочность сплавов оценивают проводя испытание на растяжение с концентраторами (надрезами). Прочность в этом случае ( $\sigma_{\text{в}}^{\text{H}}$ ) определяют как разрушающее напряжение, деленное на сечение нетто (живое сечение в месте надреза) или с помощью диаграмм конструктивной прочности, построенных в координатах  $K_{1c}$ - $\sigma_{0,2}$ . Повысить сопротивление хрупкому разрушению при сохранении высокой статической прочности можно измельчением зерна, ТМО, очисткой стали от вредных примесей, использованием мартенситно-старееющих сталей.

<b>ОТВЕРДИТЕЛЬ</b>	— Добавляют к термореактивным пластмассам для отверждения. При этом между макромолекулами возникают поперечные связи, а молекулы отвердителя встраиваются в общую молекулярную сетку. В качестве отвердителей используют органические перекиси, в резинах – серу.
<b>ОРГАНИЧЕСКОЕ СТЕКЛО</b>	— Прозрачный аморфный термопласт на основе сложных эфиров акриловой и метакриловой кислот. От неорганического стекла отличается небольшой плотностью, меньшей хрупкостью, но значительно более низкой температурой размягчения. Идет на изготовление трехслойного безосколочного стекла, используемого в судостроении.
<b>ОЗОННОЕ СТАРЕНИЕ РЕЗИНЫ</b>	— На стойкость к радиации влияет природа каучука, ингредиентов, защитных добавок, среда. Устойчивы к радиации – НК, СКИ-3, СКЭП.
<b>ПЛАСТМАССА</b>	— Композиционный материал, представляющий собой металлические листы с полимерным покрытием
<b>простые П.</b>	— Полимеры без добавок.
<b>сложные П.</b>	— Смеси полимеров с различными добавками (наполнителями, стабилизаторами, пластификаторами и т.д.).
<b>Наполнители</b>	— Наполнители добавляют в пластмассы для повышения механических свойств. Могут использоваться порошки – древесная мука, сажа, слюда, тальк; волокна – хлопчатобумажные, стеклянные, асбестовые, полимерные; листы – бумага, ткань, древесный шпон.
<b>термореактивные пластмассы</b>	— Термореактивные пластмассы (реактопласты), переработка которых в изделия сопровождается необратимой химической реакцией. Получают на основе эпоксидных, полиэфирных и др. полимеров.
<b>термопластичные пластмассы</b>	— Пластические массы, способные размягчаться при нагревании и затвердевать при охлаждении. Могут подвергаться повторной переработке.
<b>ПОЛИМЕР</b>	— От греческого “состоящий из многих частей” – высокомолекулярные соединения.
<b>ПОЛИЭТИЛЕН</b>	— Твердый продукт полимеризации этилена. Плотность 913 – 978 кг/м <sup>3</sup> плавится при 102 – 137 °С. Сочетает высокую прочность при растяжении с эластичностью.
<b>РЕЗИНА</b>	— Резиной называется продукт специальной обработки (вулканизации) смеси каучука и серы с

различными добавками. Основой резины служит каучук натуральный (НК) или синтетический (СК). Для улучшения физико-механических свойств вводятся различные добавки.

### **СТАРЕНИЕ РЕЗИНЫ**

— В процессе эксплуатации резиновые изделия подвергаются световому, озонному, тепловому, радиационному, вакуумному старению.

### **СТЕКЛО НЕОРГАНИЧЕСКОЕ**

— Аморфный изотропный, твердый и хрупкий термопластичный прозрачный материал, получаемый в результате переохладения расплава различных стеклообразующих компонентов. По типу стеклообразующего компонента различают стекло неорганическое силикатное, боратное, боросиликатное и т.п.

### **СТЕКЛО КВАРЦЕВОЕ**

— Наиболее чистое (практически однокомпонентное –  $\text{SiO}_2$ ) силикатное стекло, получаемое плавлением (выше  $1770\text{ }^\circ\text{C}$ ) природного кристаллического кварца (горный хрусталь, жильный кварц или чистый кварцевый песок).

### **ФТОРОПЛАСТ**

— Техническое название фторсодержащих пластмасс политетрафторэтилена и политрифторхлорэтилена.

**Петряков Сергей Николаевич  
Морозов Александр Викторович**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЯ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

краткий курс лекций

для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения по  
направлению подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транс-  
портно-технологических машин и комплексов» - Димитровград:  
Технологи- ческий институт – филиал УлГАУ, 2023.- 484 с.