



# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

## Лекция 6. Обработка материалов

КЛИМЕНОВ Василий Александрович,  
профессор ИШНПТ ТПУ

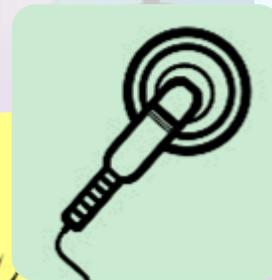
## Содержание лекции

- › Классификация методов обработки материалов
- › Прецизионное литьё
- › Деформирование и влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла. Рекристаллизация. Холодная и горячая деформация
- › Термическая обработка стали. Классификация методов
- › Превращения в стали при нагреве
- › Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита. Виды термической обработки стали. Отжиг, нормализация, закалка, отпуск
- › Термическая обработка алюминиевых сплавов (самостоятельно)

# Обработка материалов

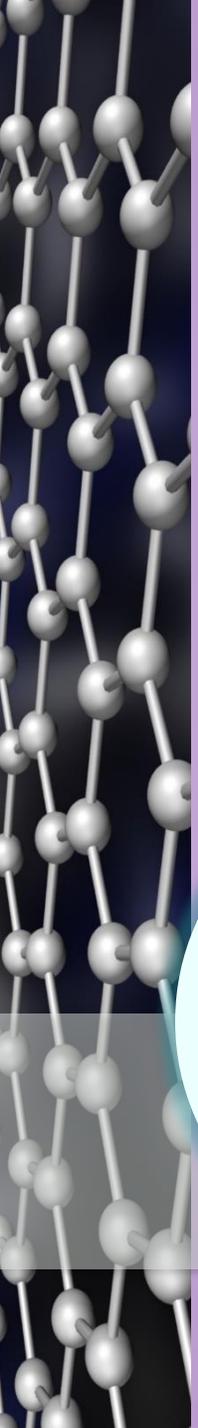
› Обработка материала - придание ему необходимых размеров, формы, свойств и включает широкий класс процессов

- Литьё
- Прокатка
- Сплавление
- Прессование
- Резание
- Термообработка
- Глубинное и поверхностное закаливание
- Шлифование
- Склеивание
- Пайка



- Сварка
- Оксидирование
- Ковка
- Травление
- Электролиз
- Обработка взрывом
- Водоструйная и пескоструйная обработка
- Растворение
- Окрашивание





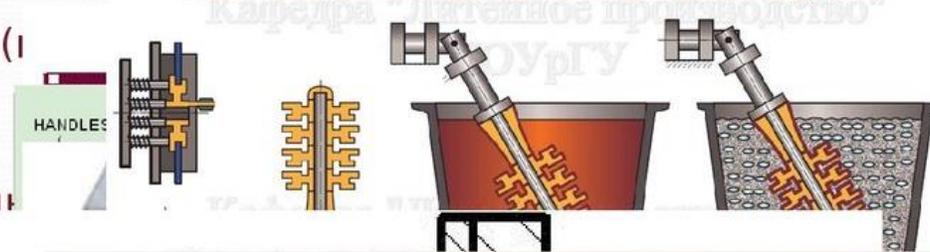
# Литье как обработка

# Прогрессивные методы литья

- › **Прецизионное литье** — это вид точного литья, рассчитанный на производство небольших партий изделий от маленького до большого формата. При этом **прецизионное литье** позволяет соблюдать и передавать самые сложные формы с высокой точностью.

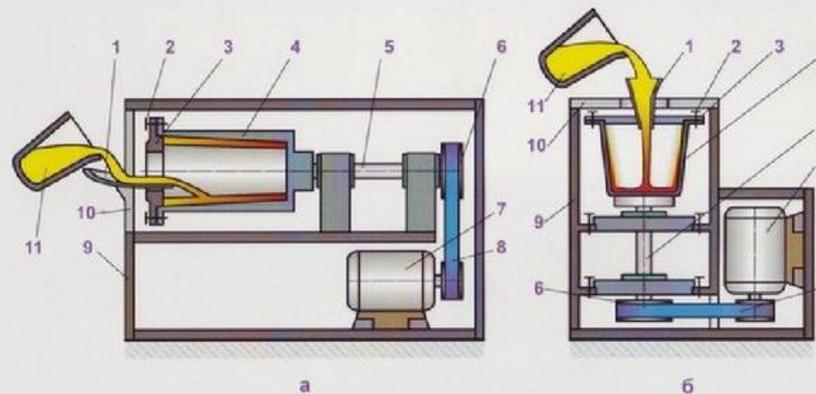
- Литье в песчано-глинистые формы (и землю)
- Литье в оболочковые формы
- Литье в кокиль
- Литье по выплавляемым (выжигаемым) моделям
- Литье под давлением
- Центробежное литье

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОТЛИВК ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ



Технология конструктивных материалов 3 18

Литейное производство  
Схемы установок для центробежного литья



а - с горизонтальной осью вращения; б - с вертикальной осью вращения.

1 - желоб; 2 - зажимы; 3 - крышка; 4 - изложница; 5 - вал; 6 - шкив; 7 - двигатель;  
8 - клиноременная передача; 9 - корпус установки; 10 - дверца; 11 - тигель с расплавом.

# Литье по выплавляемым моделям

- › Используется точная неразъемная разовая модель, изготовленная из **парафиностеариновой смеси, жирных кислот, церезина, пластмасс** и др. легкоплавких веществ. По этой модели из формовочных смесей изготавливается неразъемная керамическая оболочковая форма. Модель удаляют из формы выплавлением, растворением либо выжиганием (когда используется модель из полистирола). Форма прокаливается при высоких температурах, затем в нее заливается жидкий металл
- › **Достоинства метода**
  - возможность получения тонкостенных отливок сложной конфигурации (с толщиной стенки 1–3 мм)
  - высокое качество поверхности отливок
  - высокая точность размеров (8-11 квалитет)
  - минимальные или отсутствуют припуски на обработку резанием (0,2-0,7 мм)
- › **Недостатки метода**
  - большая трудоемкость
  - материалоемкость (требуется широкая номенклатура материалов)
- › **Область применения**
- › Производство мелких (от нескольких граммов до нескольких десятков кг) сложных отливок из сплавов, труднообрабатываемых резанием (жаропрочных, коррозионно-стойких сталей)

# Литье в оболочковые формы

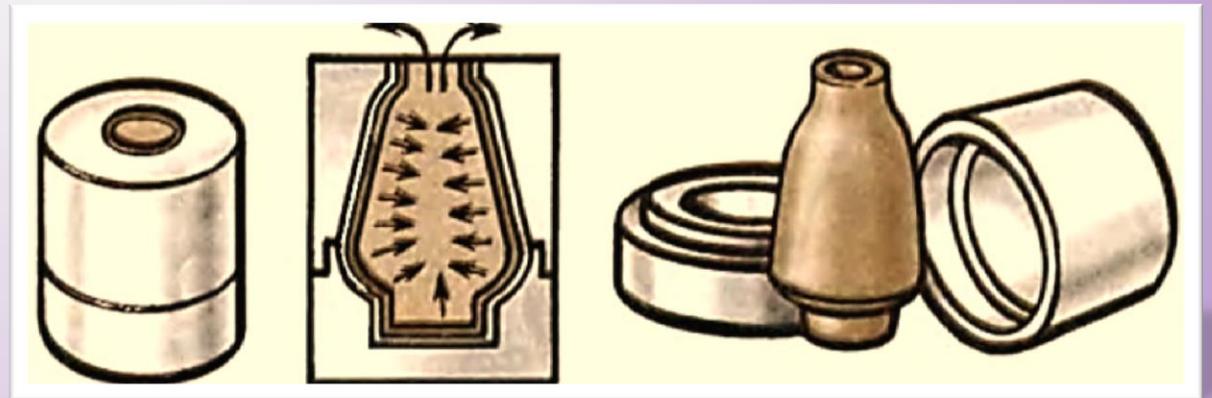
- › Основано на получении полуформ в виде оболочек толщиной **5-20 мм**. Их изготавливают путем отверждения смеси на нагретой металлической оснастке (модели). Применяют смесь, в которой связующее вещество вначале расплавляется, а потом необратимо затвердевает, образуя оболочку. В качестве связующего - терморезистивная смола **пульвербакелит (4-7%)**, остальное – мелкозернистый **кварцевый песок**
- › **Достоинства**
  - высокая производительность, причем получают не сырую, а сухую форму
  - высокая точность размеров
  - высокое качество поверхности отливок благодаря мелкому кварцевому песку
  - снижение припусков на механическую обработку
  - снижение расхода формовочных материалов
- › **Недостаток**
  - дороговизна пульвербакелита
- › **Область применения**
- › Получение отливок из **чугуна, стали, цветных металлов и сплавов** в массовом производстве (детали автомобилей, тракторов и с/х машин) с толщиной стенки **3-15 мм** и массой **0,25-100 кг**

# Крупногабаритная литая задвижка (ТЭМЗ-ГАЗПРОМ)



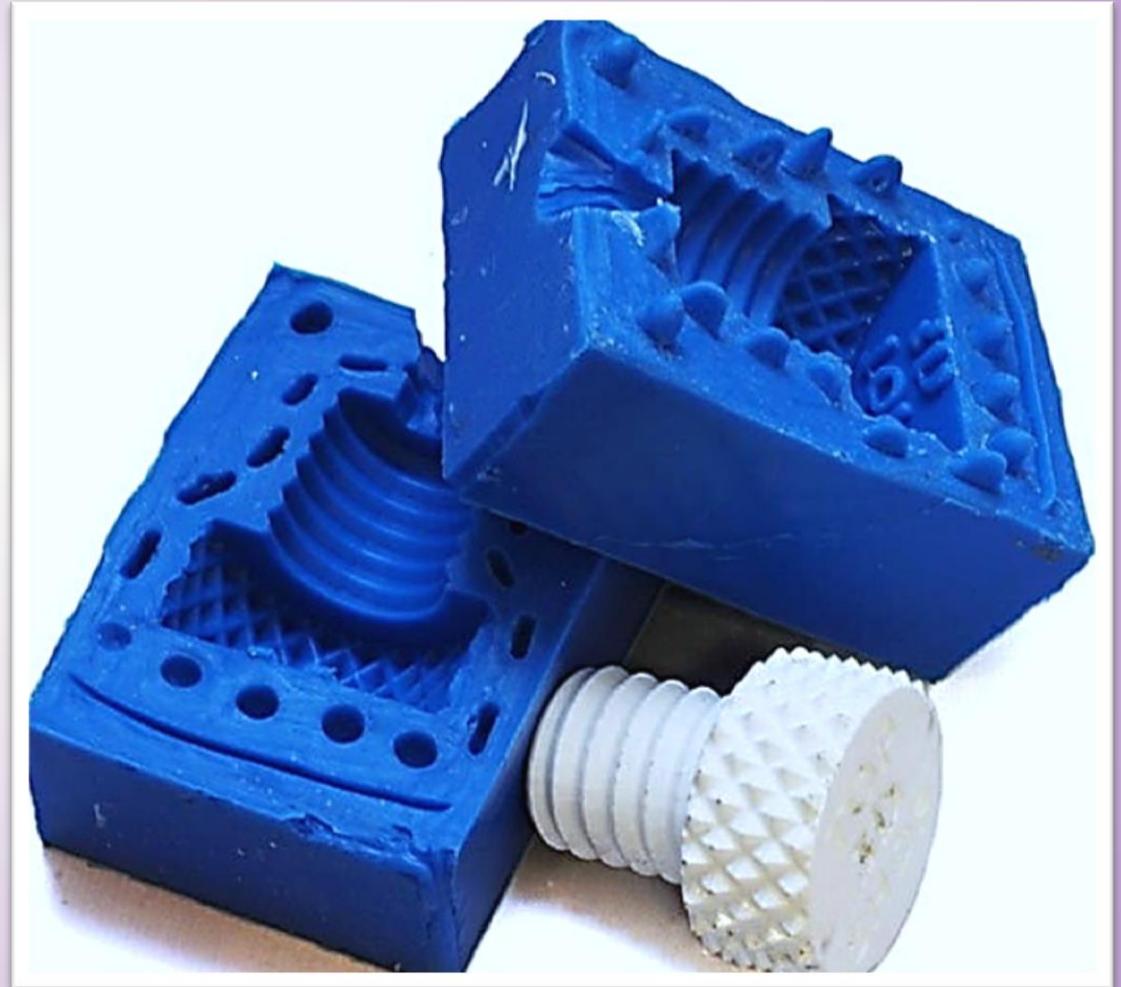
# Литье и обработка керамики

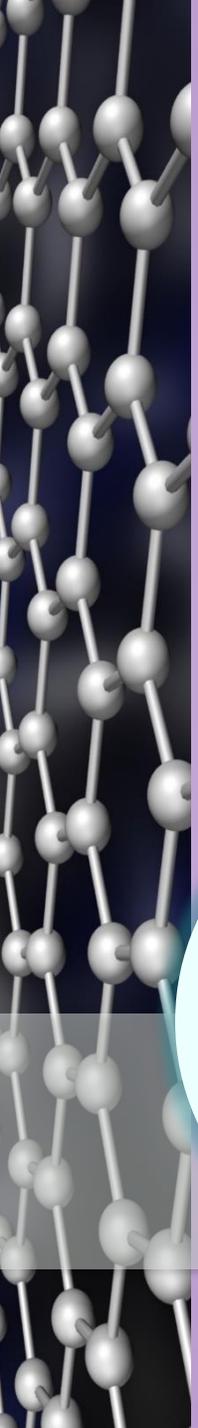
- › Из известных процессов формообразования керамических изделий (сухое прессование, продавливание через мундштук, пластическое формование) широко применяют **шликерное литье** или **горячее литье под давлением**
- › В многоместных формах можно одновременно отливать большое число изделий сложной конфигурации, разных размеров с однородными свойствами и высокой плотностью



# Инжекционное литье пластмасс

- › **Литье пластмасс** – процесс, во время которого полимерный материал под действием температуры, переводится в **вязко-текучее** состояние, а затем впрыскивается в **пресс-форму**, где происходит формирование изделия

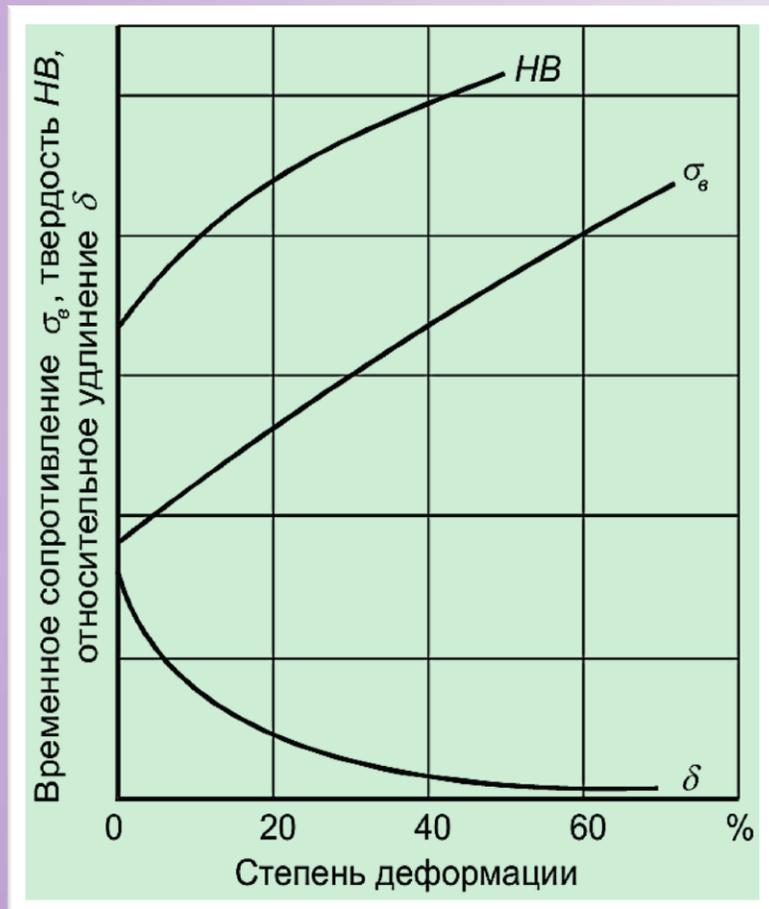




# Обработка давлением

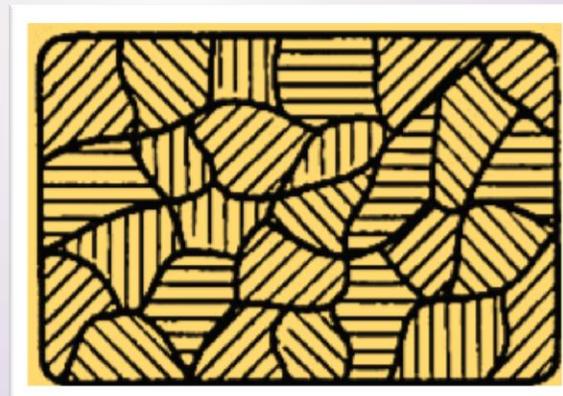
# Обработка металлов давлением

- › Технологический процесс получения заготовок необходимой формы и размеров путем пластической деформации

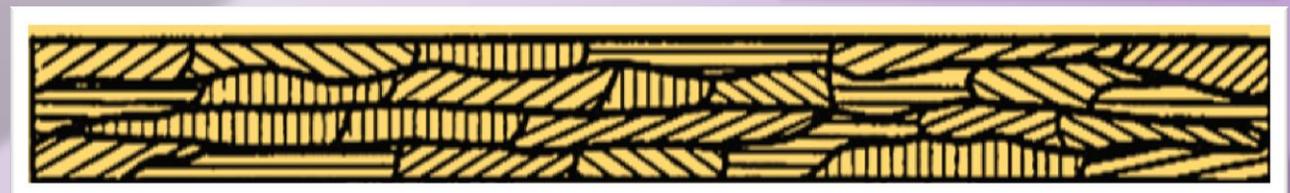


Изменение механических свойств стали при деформации

- › Зерна деформируются и вытягиваются в направлении деформации
  - прочность и твердость металла **увеличиваются**
  - пластичность и вязкость **уменьшаются**



До деформации



После деформации

# Обработка металлов давлением

- › При **температуре рекристаллизации** в металле начинается процесс рекристаллизации
- › Температура рекристаллизации ( $T_p$ ) и температура плавления ( $T_{пл}$ ) связаны зависимостью **А. Бочвара**

$$T_p = \alpha \cdot T_{пл}$$

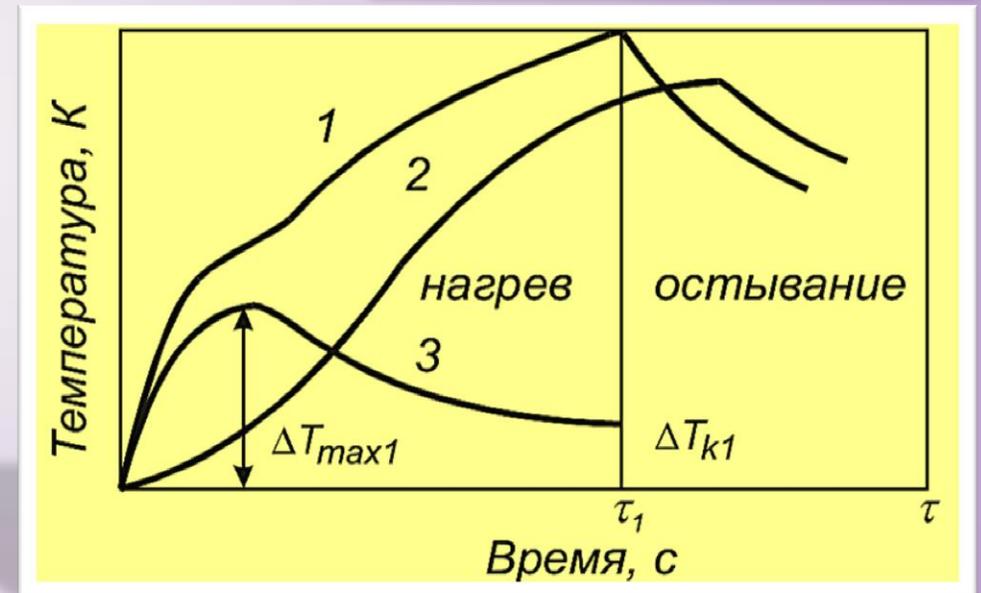
$T$  – температура в градусах Кельвина

- › Коэффициент  $\alpha$  зависит от состава и структуры металла (**0,5–0,6** для сплавов и **0,3–0,4** для технически чистых металлов)
- › **Горячая деформация** – деформирование металла при  $T > T_p$ 
  - упрочнение металла не происходит
  - одновременно идут процессы наклепа (упрочнения) и рекристаллизации (разупрочнения)
- › **Холодная деформация** – деформирование металла при  $T < T_p$ 
  - наклеп (упрочнение) металла

# Нагрев перед обработкой металлов давлением

- › Нагрев
  - **Прямой** - преобразование электроэнергии в тепловую при прохождении электрического тока по нагреваемому телу
  - **Косвенный** - электрический ток проходит по нагревательному устройству. Тепло передается телу или среде посредством **теплопроводности, конвекции, излучения**
- › Параметры нагрева
  - температура нагрева
  - скорость нагрева
  - время нагрева
  - выбор нагревательного устройства
- › Заготовки нагревают в пламенных или электрических печах **быстро**, чтобы зерно не успело вырасти и **равномерно** для минимизации термических напряжений

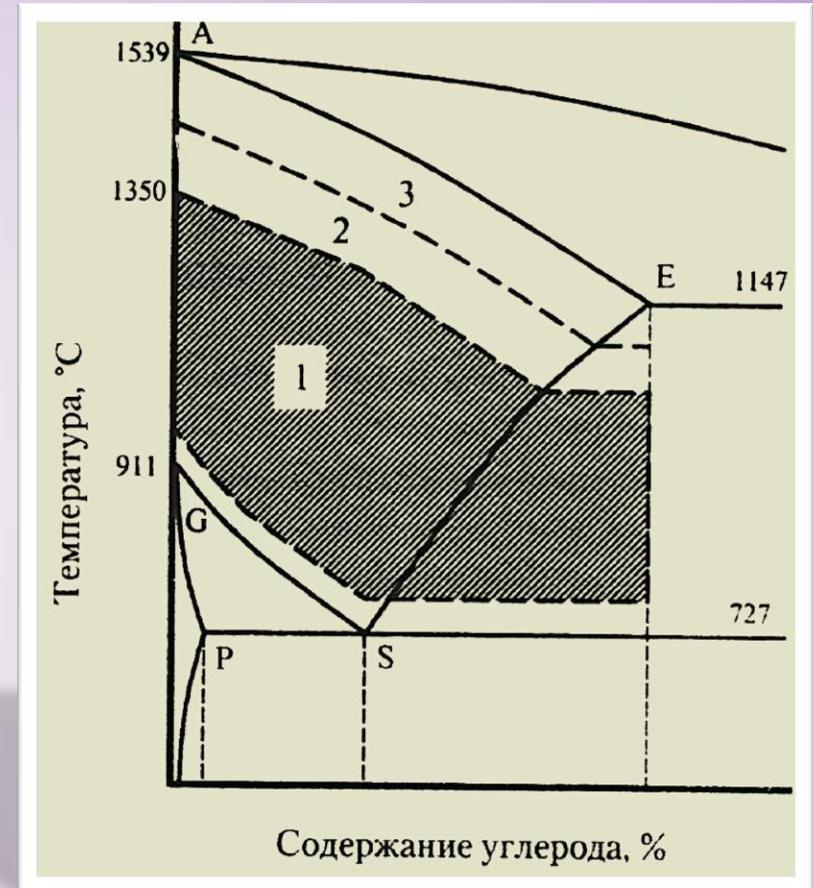
Скорость и время нагрева



1 – поверхность; 2 – сердцевина; 3 – перепад температур

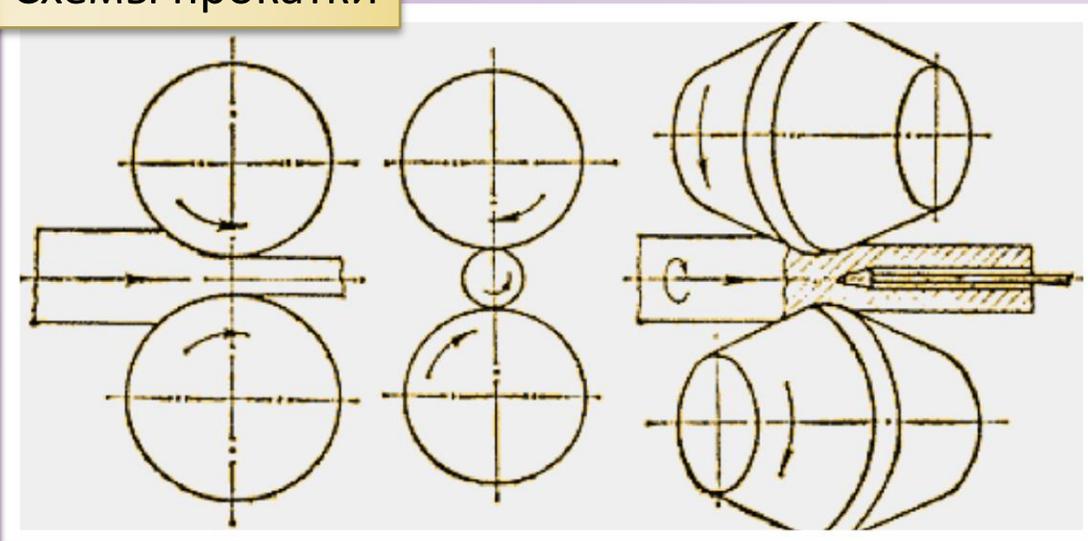
# Обработка металлов давлением

- › **Зона нагрева 1** – оптимальные температуры. Верхний предел зоны нагрева на **150–200°C** ниже линии солидуса. Нижний предел на **60–70°C** выше температур превращения феррита и перлита в аустенит
- › **Зона перегрева 2** – интенсивный рост зерна. Необходима термическая операция отжига
- › **Зона пережога 3** на **100°C** выше зоны перегрева 2. Пережог металла – неисправимый брак. Пережог наступает
  - для стали 20 при **1470 °C**
  - для стали У11 при **1180 °C**
- › **Зона наклепа** - ниже линии нижних температурных пределов
- › При горячей деформации зерно тем мельче, чем ближе окончание обработки к нижнему температурному пределу



Левая часть диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C:  
1 – горячая обработка давлением;  
2 – перегрев; 3 – пережог

## Схемы прокатки

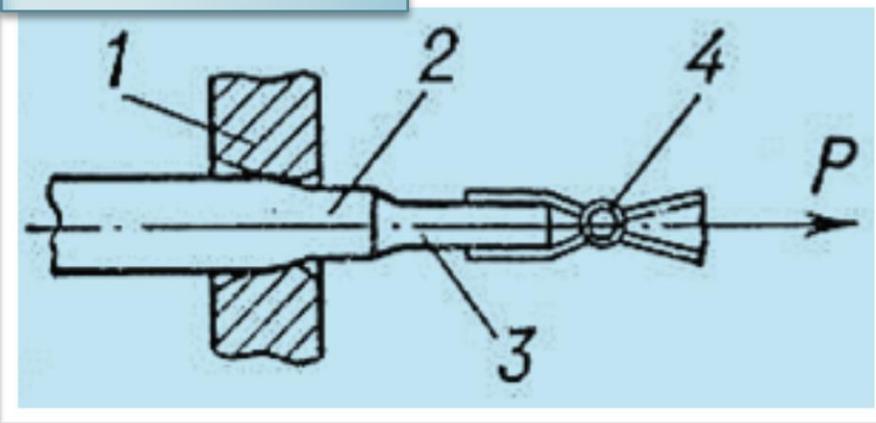


Продольная ♦ Поперечная ♦ Поперечно-винтовая

- › **Продольная (90% листового и профильного проката)**
    - валки вращаются в разные стороны
    - заготовка движется поступательно перпендикулярно оси валков
  - › **Поперечная (заготовки валов переменного сечения, зубчатые колеса)**
    - валки вращаются в одном направлении, заготовка – в противоположном
    - заготовка деформируется, но не движется вдоль оси валков
  - › **Поперечно-винтовая (бесшовные трубы)**
    - валки расположены под углом, вращаются в одну сторону
    - придают заготовке вращательно-поступательное движение
    - за счет перекоса валков заготовка получает поперечную и продольную деформацию
- › Металл пластически деформируется между вращающимися валками
  - › Заготовка деформируется и перемещается за счет сил трения
  - › Толщина заготовки уменьшается, длина и ширина увеличиваются
  - › Форма поперечного сечения – **профиль проката**

# Волочение

Схема волочения



1 – волока; 2 – заготовка; 3 – острый конец заготовки; 4 – захват; P – усилие

## › **Материал волоки**

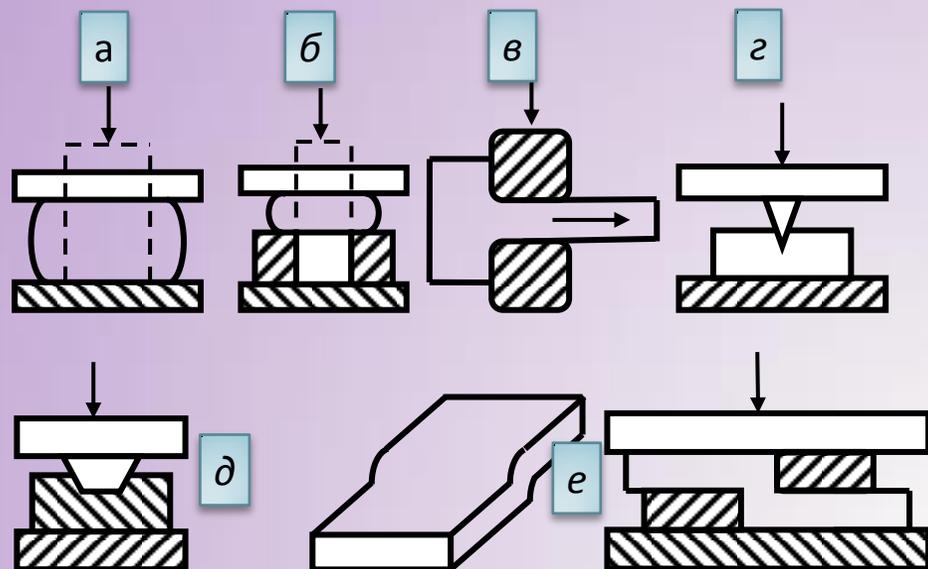
- инструментальные стали
- металлокерамические сплавы
- технические алмазы – при волочении тонкой проволоки

## › Жидкие и твердые смазки (минеральное масло, эмульсии, мыло, порошки графита, меди, молибдена) применяют для

- уменьшения трения
- повышения стойкости инструмента
- улучшения отвода тепла при волочении

## › **Волочительный стан** – станина с держателем волоки; тянущее устройство. При волочении протягиваемый металл движется прямолинейно (цепной, речный стан) или наматывается на барабан

- › Волочению подвергают сталь, цветные металлы и их сплавы
- › Заготовку в **холодном** состоянии протягивают через отверстие – **волоку**. Ряд волок с постепенно сужающимися отверстиями. На каждом этапе волочения – наклеп металла. Для снятия упрочнения – **отжиг** и **травление** окалины. **Проволока, калиброванные прутки, тонкостенные трубы**
- › Изделия имеют точные размеры и высокую чистоту поверхности



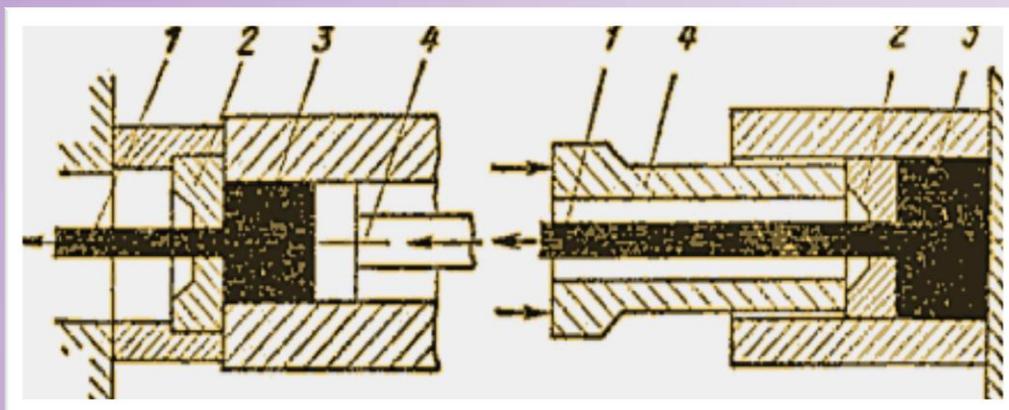
а – осадка; б – высадка; в – протяжка; г – рубка; д – прошивка; е – передача

- › Metall deformiert durch **mehrfache** Schläge des Hammers oder durch den Druck der Presse. Produkte – **поковки**
- › Основные операцииковки

- **Осадка** – уменьшение высоты заготовки за счет увеличения площади поперечного сечения
- **Высадка** – осадка части заготовки. Выполняют при помощи оправки – **подкладного** инструмента.
- **Протяжка** – увеличение длины заготовки за счет уменьшения площади поперечного сечения
- **Раскатка** на оправке – увеличение внутреннего и наружного диаметров кольцевой заготовки и уменьшение толщины стенок

- **Прошивка** – получают в заготовке сквозные отверстия или полости (глухие отверстия). Инструмент – **прошивень**, отход металла – **выдра**
- **Рубка** – отделение одной части заготовки от другой
- **Гибка** – придает заготовке изогнутую форму по заданному контуру. Выполняют при помощи опор и приспособлений. **Угольники, скобы**
- **Скручивание** – поворот части заготовки вокруг продольной оси
- **Передача** – вертикальное смещение одной части заготовки относительно другой. Выполняют при помощи дополнительных опор

## Схема прессования прутка



Прямой



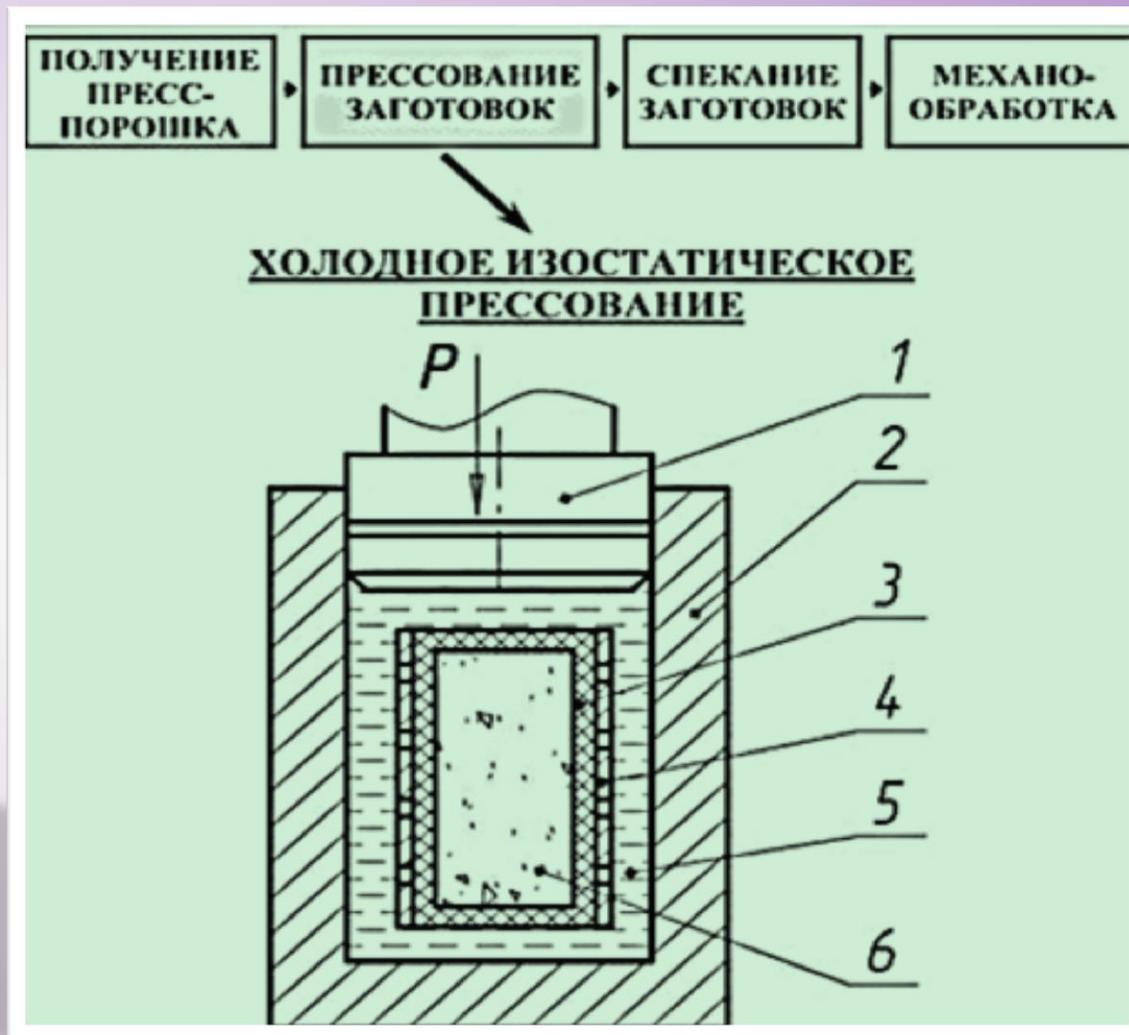
Обратный методы

- › Метод обосновал академик **Курнаков Н.С.** (1813)
- › Способ получения прутков диаметром **3-250** мм; труб диаметром **20-400** мм с толщиной стенки **1,5-15** мм; профилей сложного сечения – сплошных и полых

- › Нагретый металл выдавливается из замкнутой полости через отверстие в матрице 2
- › Метод **прямого** прессования – металл выдавливается в направлении движения пуансона 4
- › Метод **обратного** прессования – металл выдавливается навстречу движению пуансона
- › Из заготовки 3 прутки 1 сплошного сечения получают любым методом, трубы – прямым прессованием
- › Элементы пресса (матрица, пуансон и камера прессования) работают в **жестких условиях** (высокие давление и температура). Их изготавливают из дорогостоящих инструментальных жаропрочных сталей и сплавов
- › Для снижения износа и увеличения срока службы применяют **смазку** (минеральные масла, графит, канифоль, жидкое стекло)
- › **Недостаток:** большой пресс-остаток (до **20 %**) металла в камере прессования

# ОБРАБОТКА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

- › Барометрическая обработка предметов в сжатом газе или жидкости, технологическая операция материала путем равномерного сжатия
  - холодное
  - горячее
  - квазиизостатическое
- › Обеспечивает высокие характеристики обрабатываемых материалов
  - равномерная, хорошо регулируемая плотность
  - равномерный хим. состав
  - однородная текстура
- › Получение готовой продукции любой сложной формы
- › Минимальная чистовая обработка
- › **100%** сжатие и уплотнение порошка



1 – шток; 2 – контейнер; 3 – эластичная пресс-форма; 4 – перфорированная обойма; 5 – рабочая жидкость; 6 – порошок;  $P$  – давление прессования



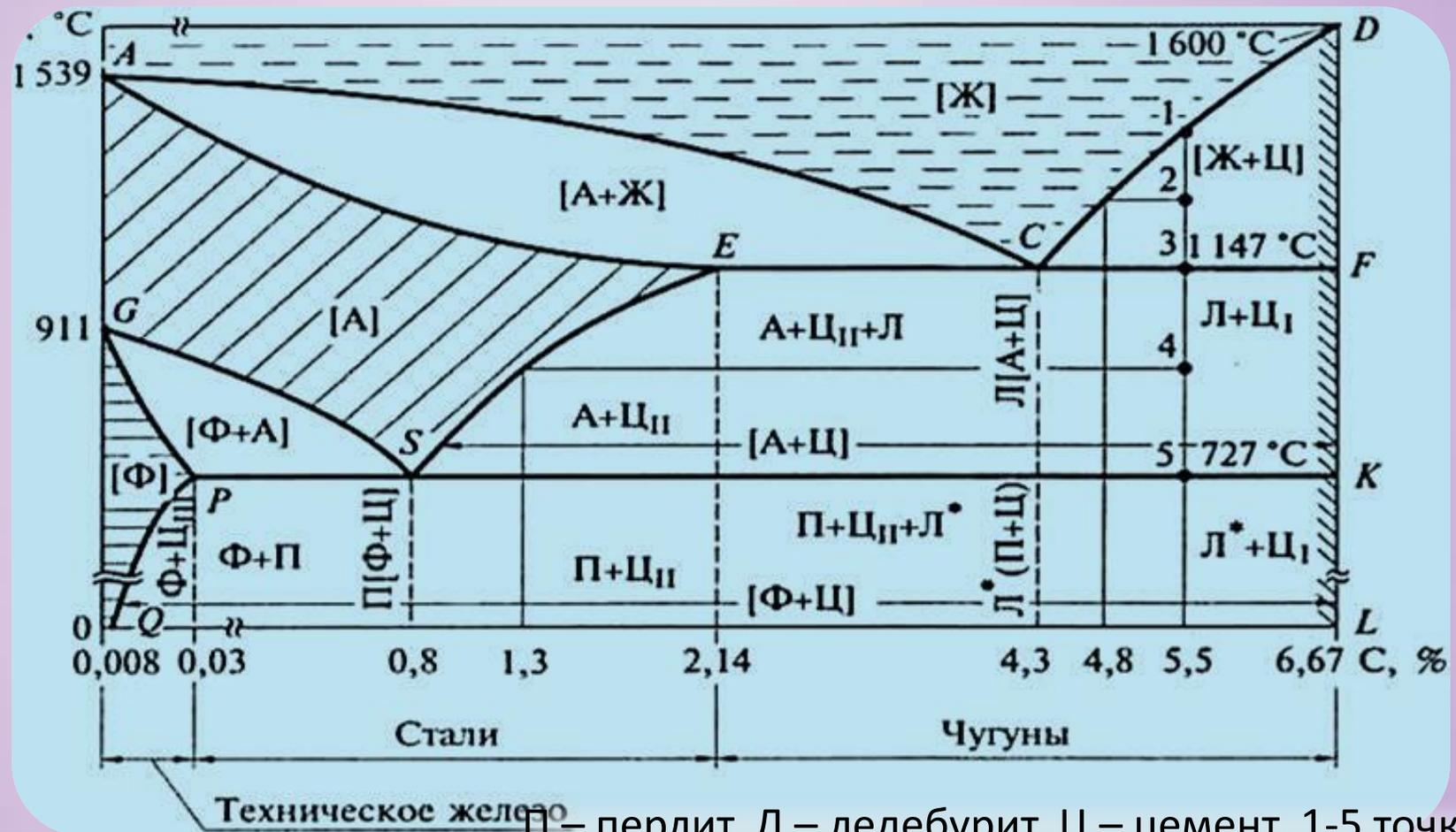
# Термообработка

# Термическая обработка металлов

- › Совокупность операций нагрева и охлаждения с целью изменить структуру и свойства сплава в нужном направлении
  - Упрочняющая – **повышает** твердость, прочность и износостойкость
  - Разупрочняющая – **повышает** пластические свойства и вязкость, **снижает** твердость и сопротивление деформации и разрушению
- › Для стальных изделий применяются оба варианта обработки



# Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

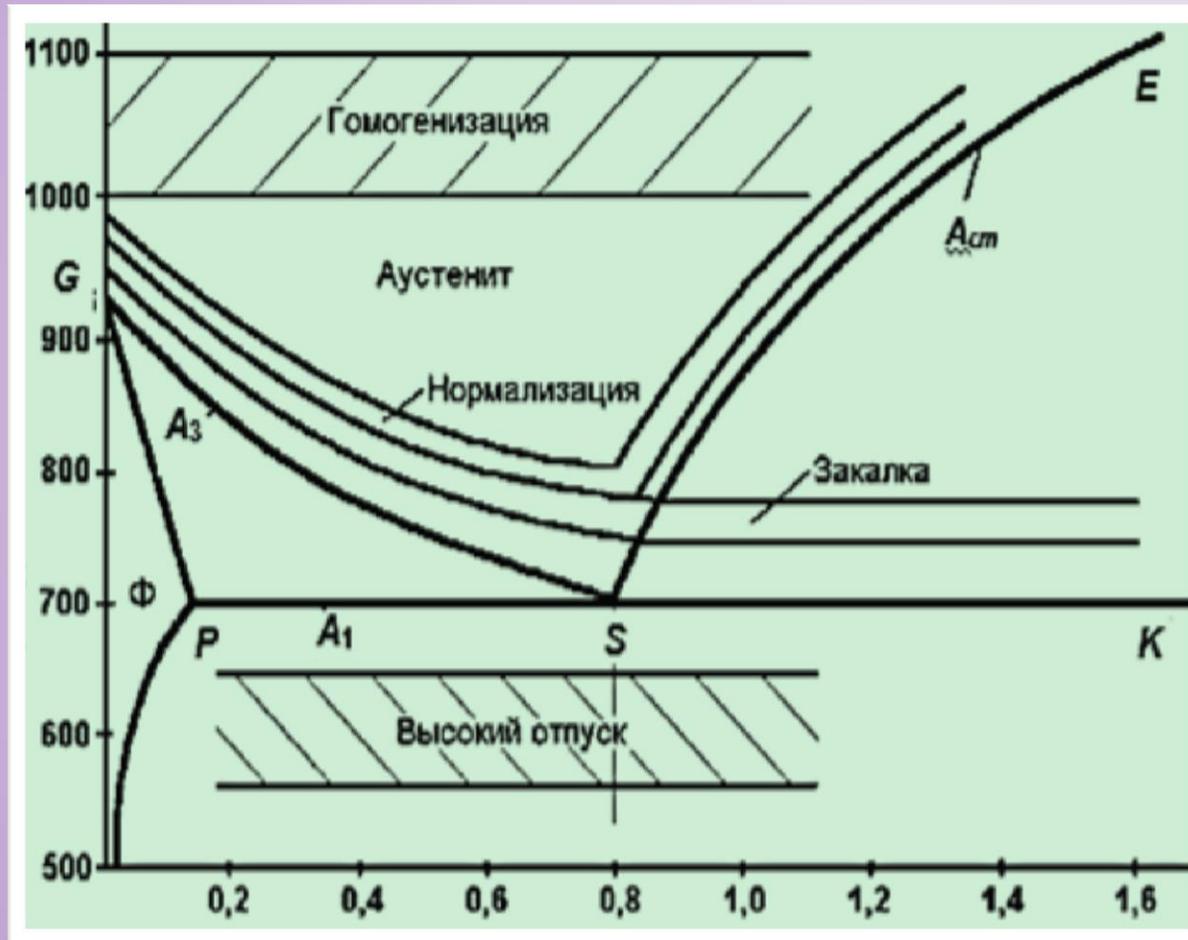


П – перлит, Л – ледебурит, Ц – цемент, 1-5 точки структурных превращений при охлаждении сплава с 5.5% углерода

# Диапазон оптимальных температур нагрева

Температура, С

Диапазон оптимальных температур нагрева



- Любая термическая обработка стали состоит из комбинации 4 основных превращений:
  - перлита в аустенит П→А при нагреве выше критической температуры  $A_{c1}$
  - аустенита в перлит А→В при охлаждении ниже критической температуры  $A_{r1}$
  - аустенита в мартенсит А→М при быстром охлаждении (со скоростью выше критической)
  - мартенсита в перлит М→В при нагреве до температур ниже критической температуры  $A_1$

Содержание углерода, %

# Основные превращения в сталях

- › Диффузионное превращение аустенита в перлит имеет место при малой степени переохлаждения и связано с диффузией избыточного углерода, растворенного в  $Fe_\gamma$
- › Для изучения кинетики превращения строится **диаграмма изотермического превращения аустенита** в координатах «температура – время». По форме кривых ее называют **С-образной диаграммой**
- › Построение ведется экспериментально, по изменению свойств, обычно магнитных

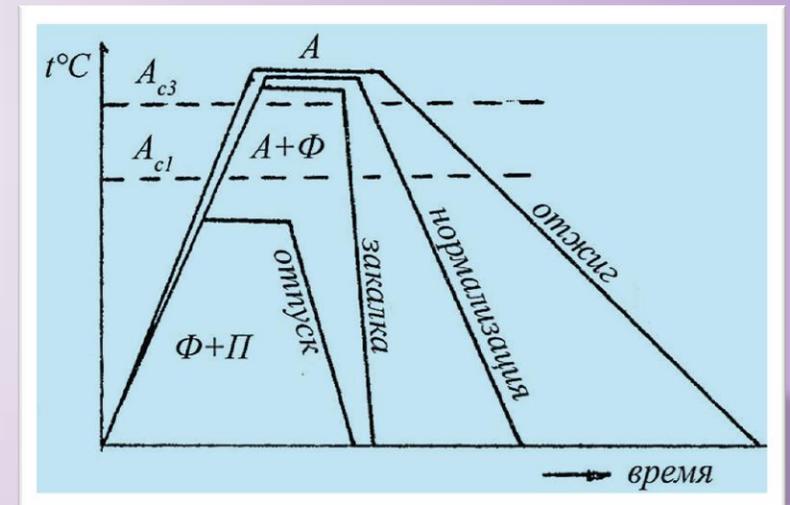
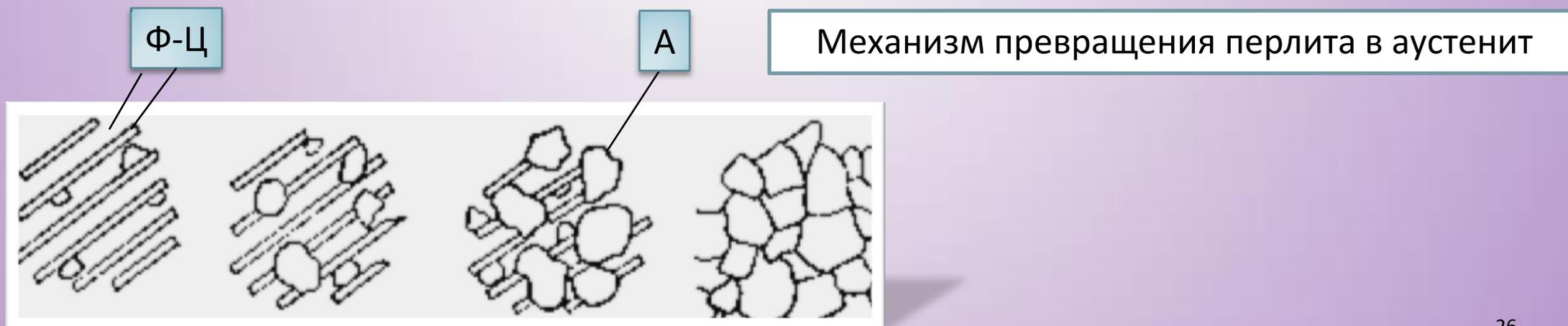


Диаграмма изотермического превращения эвтектоидной стали с 0,8 % С

# Основные превращения в сталях

- › **Превращение перлита в аустенит** включает  $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$  и растворение цементита в аустените, основанном на диффузии углерода
- › Начинается с зарождения зерен **аустенита** на поверхности раздела **феррит-цементит** (решетка  $Fe_{\alpha}$  перестраивается в  $Fe_{\gamma}$ ) и заканчивается, когда весь **цементит** растворится в **аустените**. Мелкие зерна **аустенита** растут при повышении температуры и времени выдержки
- › **Перегрев стали** – рост зерна аустенита при нагреве выше **900 °С**. При последующем охлаждении укрупненного аустенита образуются крупные **пластинчатые** или **игольчатые** кристаллы **феррита** – **видманштеттова структура** с пониженными механическими свойствами. Перегрев исправляют повторным нагревом до оптимальных температур с медленным охлаждением
- › **Пережог** - неисправимый брак - окисление границ зерен при нагреве стали близко к температуре плавления



# Основные превращения в стали

- › Образование зародышей цементита облегчено на границах аустенитных зерен
- › Пластинка цементита растет в **длину и ширину** за счет диффузии углерода из прилегающих областей, из которых образуются **пластинки феррита**
- › Рост колоний перлита продолжается до столкновения с колониями, растущими из других центров. Строение и свойства перлита зависят от **температуры**, при которой он образовался
- › Межпластиночное расстояние определяет **дисперсность структуры**, в зависимости от нее продукты распада аустенита имеют различное название

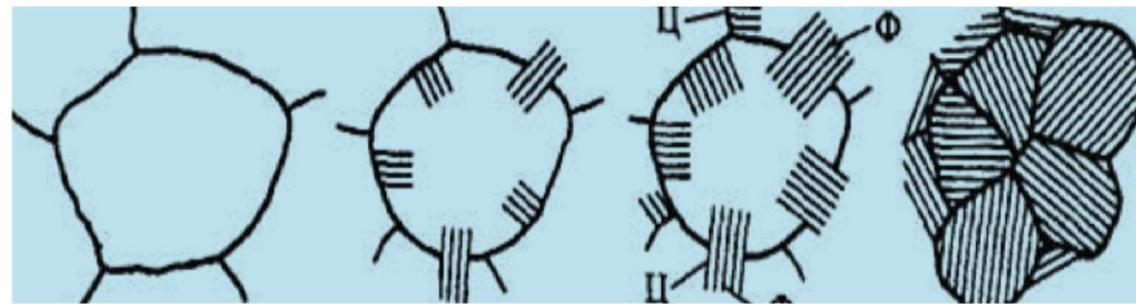


Схема роста перлитных колоний

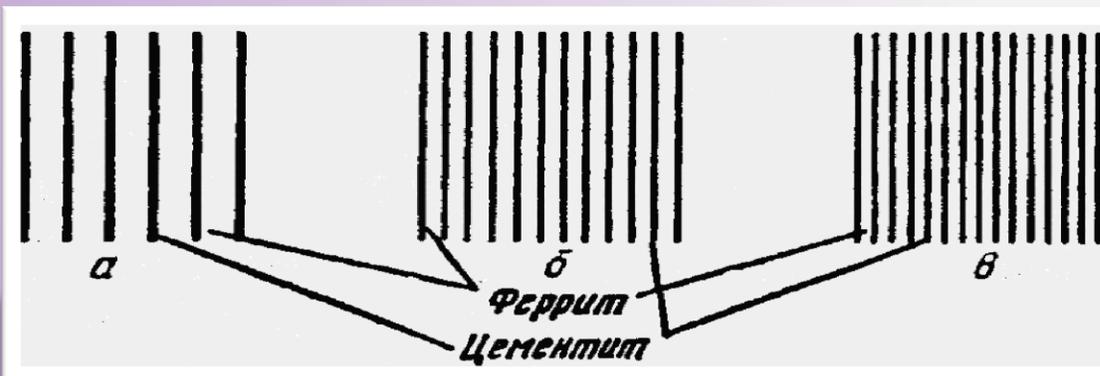


Схема феррито-цементитных структур: а – перлит; б – сорбит; в – троостит

- › **Перлит** ( $\Delta = 0,7$  мкм) образуется при переохлаждении до **650–700 °C** или охлаждении со скоростью **30 °C/с**. Твердость **180–250 НВ**
- › **Сорбит** (англ. ученый Сорби) ( $\Delta = 0,25$  мкм) образуется при переохлаждении до **600–650 °C** или охлаждении со скоростью **60 °C/с**. Высокие пластичность и ударная вязкость, достаточные упругость и прочность. Твердость до **350 НВ**
- › **Троостит** (фр. химик Труст) ( $\Delta = 0,1$  мкм) образуется при переохлаждении до **550–600 °C** или охлаждении со скоростью **150 °C/с**. Высокий предел упругости, малая вязкость, пластичность. Твердость **350–450 НВ**

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВ ТЕРМООБРАБОТОК

## › Отжиг I типа

› **Диффузионный** - для легированных сталей устранение ликвации выравнивания химического состава сплава, растворения избыточных карбидов. Температура нагрева  $T_n = 0,8 T_{пл}$ . Продолжительность – 8–20 часов.

› **Рекристаллизационный** Температура нагрева  $T_n = 0,4 T_{пл}$ . Продолжительность - от габаритов.

› **Отжиг для снятия напряжений**, образующихся в процессе литья, сварки, обработки резанием. Температура нагрева:  $T_n = 160–700^{\circ}\text{C}$ . Продолжительность - от габаритов.

## › Отжиг II типа

› **Полный отжиг (закалка)** - для доэвтектоидных сталей для исправления структуры стали – **перегрева**. При отжиге формируется мелкозернистый аустенит, после охлаждения сталь также имеет мелкозернистую структуру.

› **Неполный отжиг (закалка)** - для доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей, цементит вторичный при отжиге приобретает сферическую форму (сфероидизация). Неполный отжиг обязателен для инструментальных сталей.

› **Нормализация (разновидность полного отжига)** – нагрев до аустенитного состояния на 30–50° выше линии GSE с охлаждением на воздухе.

# ПРОДОЛЖЕНИЕ

- › Отпуск - отжиг закаленной стали. (Разупрочняющая обработка.)

Нагрев закаленной стали ниже температур фазовых превращений с последующим медленным охлаждением, обычно на воздухе.

Цель – *требуемые эксплуатационные свойства детали*, уменьшение внутренних напряжений.

- › Низкий отпуск – 200 °С. Первое превращение – распад мартенсита.

**А. Нагрев 80–150 °С** из мартенсита выделяется часть углерода. Сначала появляется  $\epsilon$ -карбид с ГПУ решеткой ( $\text{Fe}_2\text{C}$ ), пластинки карбидов очень мелкие; имеют когерентную границу с мартенситом.

**В. Нагрев 200 °С**  $\epsilon$ -карбид преобразуется:  $\text{Fe}_2\text{C} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$  пластинки карбидов размером  $5 \times 80 \times 200$  нм растут когерентные и полуккогерентные границы. Снижение тетрагональности решетки и внутренних напряжений.

- › Второе превращение – распад остаточного аустенита ( $A_{\text{ост}}$ ) Бейнитное превращение. Выделение углерода в виде карбида + полиморфное превращение.
- › Структура после низкого отпуска – *мартенсит отпуска*, малоуглеродистый мартенсит и очень мелкие карбидные частицы –
- › **Применение.** Детали, сочетающие высокую и твердость и износостойкость.

# ПРОДОЛЖЕНИЕ

- › **Средний отпуск** – 350–450 °С.

из мартенсита **выделяется весь избыточный углерод** (превращается в феррит) образование мелких цементитных частиц **округлой формы**

пластинки цементита растут: 200×400×1000 нм

границы - некогерентные.

Тетрагональные искажения снимаются. Решетка становится кубической.

- › **Структура после среднего отпуска** – *троостит отпуска*

Мартенсит превращается в феррито-цементитную смесь с мелкими округлой формы частицами цементита.

Сочетает высокую упругость и твердость 40–45 HRC.

- › **Применение.**

Изделия типа пружин, рессор, торсионов

# ПРОДОЛЖЕНИЕ

## Высокий отпуск – 550–650 °С

- › Высокая температура. Скорость диффузионных процессов возрастает.
- › Образуется феррито-цементитная смесь с более крупными зернами цементита сферической формы.
- › Растворение мелких и рост крупных карбидных частиц.
- › Плотность дислокаций снижается до  $10^8$ – $10^9$  см<sup>-2</sup>,
- › Устраняются остаточные внутренние напряжения.

## Структура после высокого отпуска – *сорбит отпуска*

сочетает высокую пластичность и ударную вязкость при достаточной твердости.

### **Применение.**

Детали машин, испытывающих ударные и знакопеременные нагрузки.

# ПРОДОЛЖЕНИЕ

Закалка + высокий отпуск – *термическое улучшение стали*.

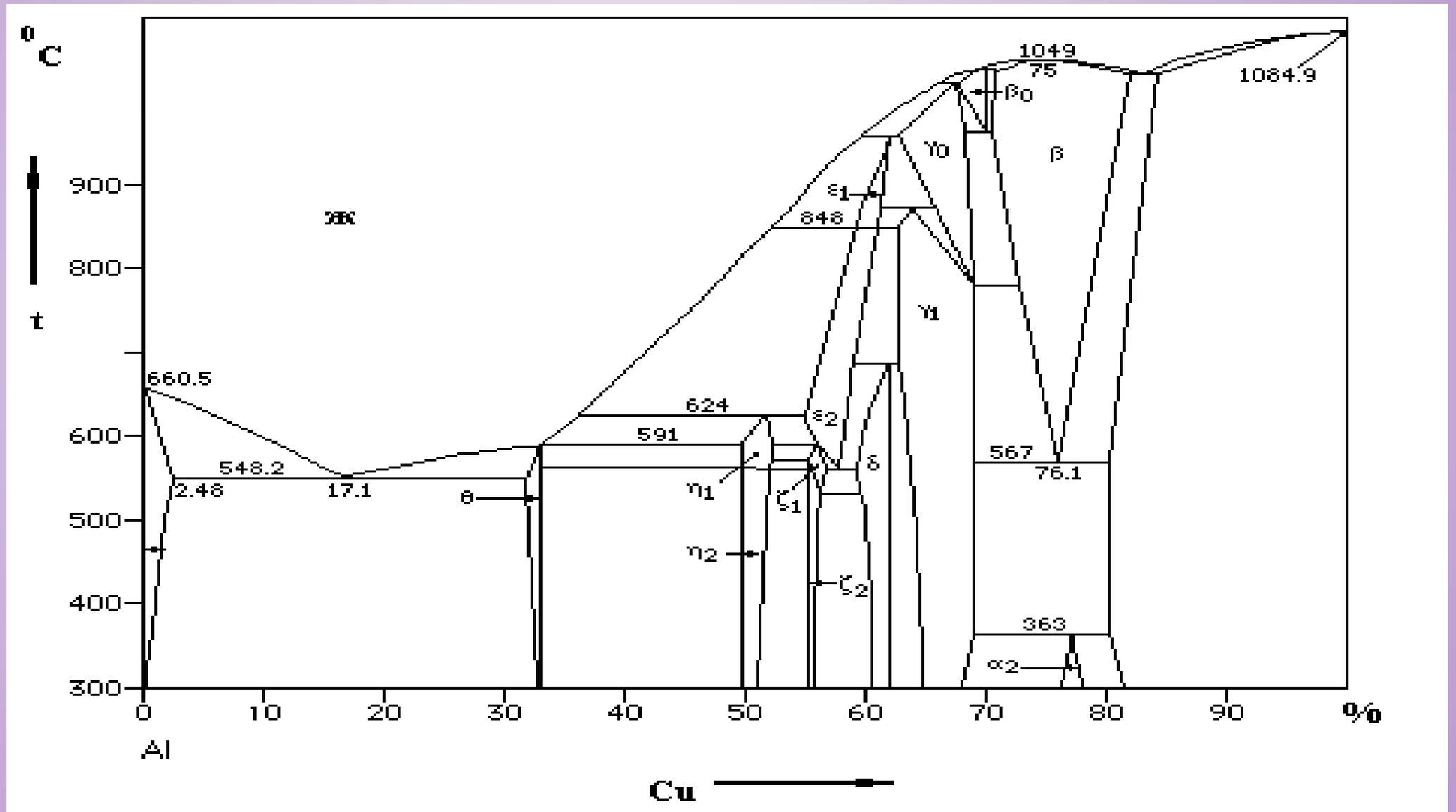
- › **Отпускная хрупкость I типа.** (В углеродистых сталях) Неравномерный распад мартенсита.

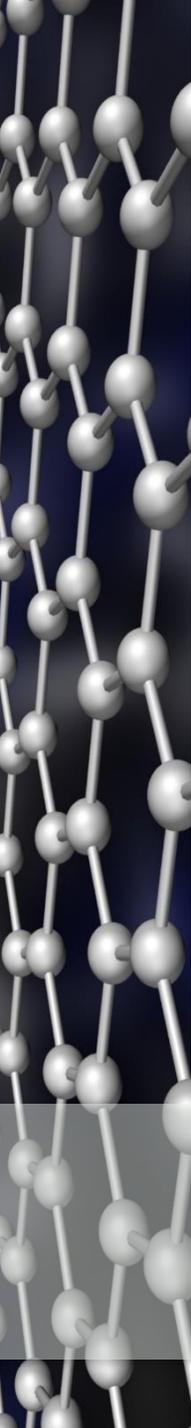
При медленном охлаждении: Вблизи границ карбидов выделяется больше, чем внутри зерна. Концентрация напряжений у границ делает зерна более хрупкими.

При быстром охлаждении: частицы равномерно распределены по объему зерна.

- › **Отпускная хрупкость II типа.** (В легированных сталях)
- › Высокий отпуск и медленное охлаждение, при медленном охлаждении за счет диффузии вблизи границ образуются мелкодисперсные карбиды, фосфиды, нитриды снижают ударную вязкость.
- › Хром, марганец и фосфор увеличивают отпускную хрупкость II типа. Почему?
- › Молибден (0,2–0,3 %), вольфрам (0,6–1,0 %), а также быстрое охлаждение способствуют ее уменьшению.

# Диаграмма состояния сплавов системы медь - алюминий





**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**