

Стали

Влияние постоянных примесей на свойства стали

Марганец – вводится в любую сталь для раскисления, поэтому его влияние на сталь различного состава остается примерно одинаковым; оказывает положительное воздействие на свойства стали (прежде всего повышает прочность).

Кремний – вводится в сталь для раскисления, структурно не обнаруживается.

Фосфор – попадает в сталь из руды, топлива и флюсов; вызывает **хладноломкость стали** (склонность к хрупкому разрушению при понижении температуры); облегчает обрабатываемость стали резанием (в автоматных сталях содержание фосфора до 0,15%).

Сера – попадает в сталь из руды и печных газов; вызывает явление **красноломкости стали** (охрупчивание стали при температуре красного каления $\approx 800^\circ\text{C}$); облегчает обрабатываемость стали резанием (в автоматных сталях содержание серы до 0,3%).

Газы – содержание в стали зависит от способа производства; при большом количестве **водорода** могут образоваться опасные флокены; **кислород** и **азот** образуют неметаллические включения (соответственно оксиды и нитриды).

Классификация сталей

```
graph TD; A[Классификация сталей] --- B[Химический состав]; A --- C[Качество]; A --- D[Способ выплавки]; A --- E[Структура]; A --- F[Назначение];
```

Химический
состав

Качество

Способ
выплавки

Структура

Назначение

Углеродистые

Легированные

Низкоуглеродистые
до 0,25%

Среднеуглеродистые
0,25-0,7 %

Высокоуглеродистые
> 0,7%

Углеродистые стали

- Основной металлический материал промышленности – углеродистая сталь.
- Углерод вводится в простую углеродистую сталь специально.
- Технологические примеси: марганец, кремний.
- Постоянные примеси: сера, фосфор, кислород, азот, водород.
- Случайные примеси: хром, никель, медь и др..

Конструкционная углеродистые стали
обыкновенного качества общего назначения

Химический состав:

Марка стали	C%	S≤	P≤
Ст 0	≤0,23	0,07	0,055
Ст1	0,06-0,12	0,045	0,055
Ст2	0,09-0,15	0,045	0,055
Ст3	0,14-0,22	0,045	0,055
Ст4	0,18-0,27	0,045	0,055
Ст5	0,28-0,37	0,045	0,055
Ст6	0,38-0,49	0,045	0,055
Ст7	0,50-0,62	0,045	0,055

Маркировка различных групп углеродистых сталей обыкновенного качества

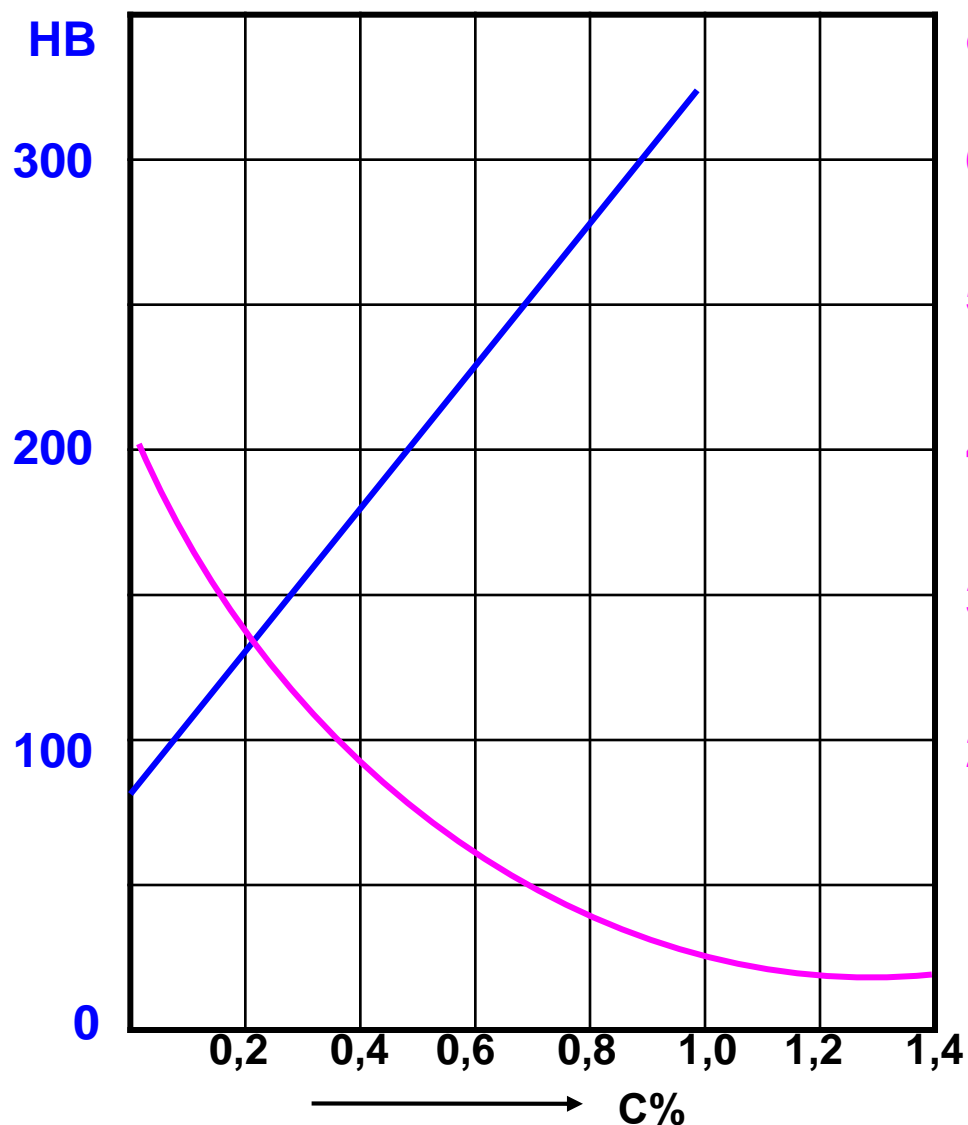
- 1. Группа А** – с гарантируемыми механическими свойствами (сталь не подвергается горячей обработке у потребителя): маркируется буквами Ст и цифрами от 1 до 7, являющимися порядковым номером. Например, Ст 3.
- 2. Группа Б** – с гарантируемым химическим составом (подвергается горячей обработке у потребителя): маркируется аналогично группе А, но с дополнительными буквами М, К, Б, что характеризует способ производства – мартеновский, конверторный, бессемеровский соответственно. Например, МСт3, БСт4, КСт5.
- 3. Группа В** – с гарантируемыми механическими свойствами и химическим составом (подвергается сварке у потребителя) маркируется аналогично группе А, но с добавлением буквы В. Например, ВСт5.

Маркировка углеродистых сталей обычного качества разных способов раскисления

В зависимости от способа раскисления (с целью удаления кислорода) предлагаемые стали маркируют следующим образом:

- 1. Кипящая сталь** - раскисленная только марганцем, содержит в марке буквы **кп**. Например, **МСт1кп**. Кипящие стали имеют наиболее низкое качество.
- 2. Спокойная сталь** – раскисленная марганцем, кремнием и алюминием, содержит в марке буквы **сп**. Например, **ВСт3сп**. Спокойные стали имеют наиболее высокое качество.
- 3. Полуспокойная сталь** – раскисленная марганцем и алюминием, содержит в марке буквы **пс**. Например, **МСт4пс**. Промежуточный вариант качества между кипящей и спокойной сталью.

Влияние углерода на свойства сталей



δ%

HV – твердость по Бринеллю – одна из характеристик прочности стали (или сопротивления деформации).

60

δ% – относительное удлинение после разрыва - одна из характеристик пластичности стали.

50

Увеличение содержания углерода приводит к повышению прочности и снижению пластичности стали.

40

30

20

10

0

Применение конструкционных углеродистых сталей обыкновенного качества

Марка стали	Применение
Ст0; Ст1	Второстепенные элементы конструкций и неответственные детали, :настилы, арматура, шайбы, перила, кожухи и т. д.
Ст2	Неответственные детали, требующие повышенной пластичности, малонагруженные элементы сварных конструкций, работающие при постоянных нагрузках и положительных температурах .
Ст3	КП – малонагруженные элементы сварных конструкций, работающие в интервале температур Т°С от -10 до +400°С; СП – фасонный и листовой прокат – несущие элементы сварных конструкций, работающие при переменных нагрузках в интервале температур от -40 до +425°С
Ст4	ПС – сварные, клепаные, болтовые конструкции повышенной прочности в виде сортового проката, а также для малонагруженных валов, осей, втулок и др.
Ст5	ПС, СП - детали клепаных конструкций, болты, гайки , втулки, упоры, штыри, пальцы и т.д., работающие в интервале температур от 0 до +425°С.
Ст6,Ст7	ПС, СП – детали повышенной прочности – оси, валы, пальцы, поршни, шпонки и т. д.

Конструкционные углеродистые качественные стали общего назначения

08; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60

Цифры в обозначении марки стали показывают содержание углерода в сотых долях процента.

Химический состав, %

Марка стали	C	Mn	Si	P ≤	S ≤	Cr ≤	Ni ≤	Cu ≤	As ≤
ВСт5сп	0,28-0,37	0,50-0,80	0,15-0,35	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
Сталь 30	0,27-0,35	0,50-0,80	0,17-0,37	0,035	0,04	0,25	0,25	0,25	0,08

Применение конструкционных углеродистых качественных сталей общего назначения

Марка стали	Применение
Сталь 15	Заменитель: стали 10, 20. Болты, винты, крюки и др. детали, к которым предъявляются требования высокой пластичности и работающие при температуре от -40 до 450°С. После ХТО – кулачки, гайки и др. детали с высокой поверхностной твердостью.
Сталь 30	Заменитель: стали 25 и 35. Рычаги, валы, соединительные муфты и др. детали невысокой прочности.
Сталь 40	Заменитель: стали 35 и 45. После ТО: коленчатые валы, шатуны, зубчатые колеса, оси и др. После ТВЧ: средних размеров валики, зубчатые колеса и др.
Сталь 50	Заменитель: стали 45 и 55. После ТО: зубчатые колеса, прокатные валки, тяжелонагруженные валы и оси, мало нагруженные пружины и рессоры и т.д.
Сталь 60	Заменитель: сталь 55. Цельнокатаные колеса вагонов, рабочие валки листовых станов для горячей прокатки, диски сцепления и др, т.е. детали с высокой прочностью и износостойкостью.

Углеродистые инструментальные стали

У7; У7А; У8; У8А; У9; У9А; У10; У10А; У12; У12А.

Цифра в марке – содержание **С** в десятых долях %

Марка стали	С%	Mn%	Si%	S% ≤	P% ≤	Cr% ≤	Ni% ≤	Cu% ≤
У7А	0,66-0,73	0,17-0,28	0,17-0,33	0,018	0,025	0,20	0,20	0,20
У7	0,66-0,73	0,17-0,38	0,17-0,33	0,028	0,030	0,20	0,25	0,25

Применение: инструмент, который работает в условиях не вызывающих разогрев рабочей кромки – зубила, молотки, ножницы по металлу... (**У7**); фрезы, пилы продольные и дисковые, отвертки, стамески...(**У8**); слесарно-монтажный инструмент...(**У9**); метчики ручные, матрицы для холодной штамповки...(**У10**); метчики машинные, измерительный инструмент простой формы...(**У12**).

Твердость углеродистых инструментальных сталей резко уменьшается при нагреве выше 200°С.

Быстрорежущие стали

- Стали, предназначенные для изготовления режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания, должны обладать горячей твердостью и **красностойкостью** (устойчивым сохранением твердости в нагретом состоянии при 500-600°C). **Красностойкость** создается легированием стали элементами, образующими специальные карбиды, которые не растворяются до высоких температур.
- **Износостойкость** режущего инструмента в первом приближении характеризуется твердостью в нагретом состоянии. Быстрорежущие стали – износостойкий материал.
- Буква Р в марке стали от слова рапид (скорость).

Марка стали	C%	Cr%	W%	V%	Mo%	Вид карбидной фазы
P18	0,7	4	18	1	-	M ₆ C
P9	0,9	4	9	2	-	M ₆ C; MC
P6M5	0,9	4	6	2	5	M ₆ C; MC
У7	0,7					Fe ₃ C

Твердые сплавы

Марка сплава	WC	TiC	Co
ВК2	98	-	2
ВК6	94	-	6
Т5К10	85	5	10

Твердый сплав является металлокерамическим. Для его изготовления порошки карбидов вольфрама и титана смешивают со связующим веществом (кобальтом) и спекают при $T = 1500-2000^{\circ}\text{C}$. Твердость полученного материала настолько высока, что его можно только шлифовать. Инструмент не изготавливают целиком, а лишь режущую его часть, которую прикрепляют к державке из конструкционной стали. При высокой твердости и износостойкости сплав очень хрупок и не сопротивляется растягивающим напряжениям. Рабочая температура резания может составить $800-1000^{\circ}\text{C}$.

Применение: металлорежущий инструмент высокой производительности (резцы, фрезы, сверла и др.)

Конструкционные легированные стали

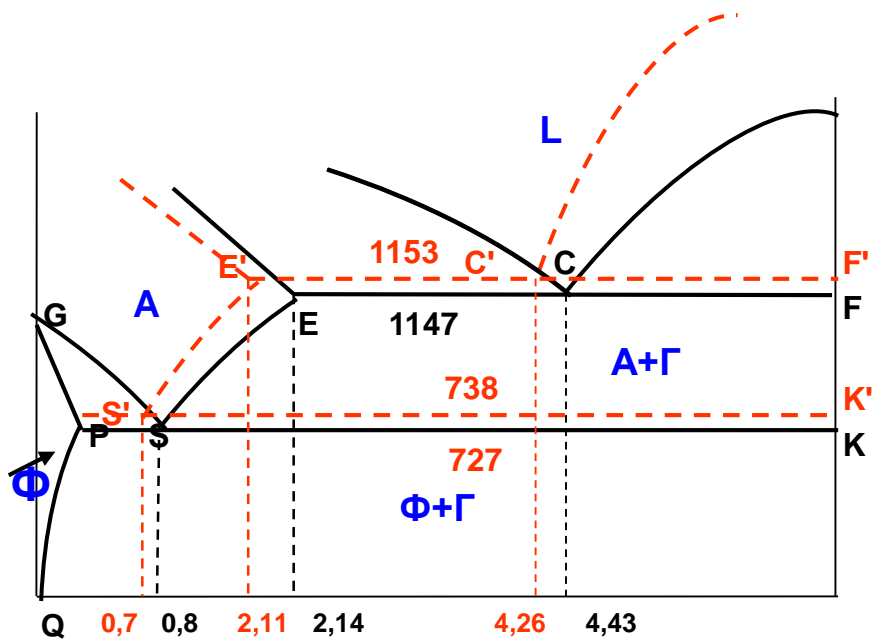
Система маркировки по ГОСТу

1. Обозначения состоят из цифр и букв, указывающих на примерный состав стали.
2. Каждый легирующий элемент обозначается буквой. Например, Н – никель, Х – хром, М – молибден, Г – марганец, С – кремний, Ю – алюминий и т.д.
3. Первые цифры в обозначении показывают среднее содержание углерода **в сотых долях процента** (у высокоуглеродистых инструментальных сталей в десятых долях процента).
4. Цифры, идущие после буквы, указывают на примерное содержание данного легирующего элемента **в процентах** (при содержании элемента менее 1% цифра отсутствует).
5. Примеры: 30ХМА; 10ГН2МФА; 20Х2Н4; 30ГСЛ и т.д.
6. **Буква А** в конце марки стали показывает, что в ней ограничено содержание **серы** и **фосфора**, а в середине марки – азот; **буква Л** в конце марки стали – литейная сталь (точнее - улучшенные литейные свойства).

Примеры применения конструкционных легированных сталей

Стали	Применение
30X; 35X; 35ХРА	Оси, рычаги, болты, гайки и др. некрупные изделия.
40X; 45X;38ХА; 40ХН; 50X	Оси, валы, валы-шестерни, коленчатые и кулачковые валы, зубчатые колеса и др улучшаемые детали повышенной прочности.
30ХМ; 30ХМА; 35ХМ; 40ХН; 30ХМ; 30ХГСА	Валы, шестерни; шпильки; фланцы и др. ответственные детали, работающие при высоких нагрузках и при $T = 450 - 500^{\circ}\text{C}$
30ХН2МФА; 30ХН2ВФА	Валы, цельнокованные роторы, детали редукторов, шпильки и др. детали турбин и компрессорных машин, работающие при повышенных температурах.
ШХ15; ШХ9; ШХ12	Шарики $d \leq 150$ мм, ролики $d \leq 23$ мм, кольца подшипников с толщиной стенки до 14 мм, ролики толкателей и др. детали от которых требуется высокая твердость, износостойкость и контактная прочность. В стали ШХ15: С – 1%; Мn – 0,3%; Si – 0,25%; Cr – 1,5% .
70; 65Г; 60С2А; 9ХС;60С2; 55С2;50ХФА	Пружины, рессоры , фрикционные диски и др. детали, к которым предъявляются требования повышенной износостойкости и работающие без ударных нагрузок.

Процесс графитизации



При определенных кинетических условиях и диффузионных процессах при охлаждении вместо цементита образуется графит (Г).

Диаграмма Fe – C называется стабильной, а Fe – Ц – метастабильной. Образование графита из жидкости или аустенита происходит в узком интервале температур между линиями стабильной и метастабильной диаграмм то есть в условиях малых переохлаждений и, следовательно при малых скоростях охлаждения

Кроме того, образование графита возможно при нагреве цементита (Ц – неустойчивое соединение) с образованием **A + Г** или **Ф + Г**.

1. **E'C'F' (1153°)** – линия фазового равновесия **L ↔ A + Г**.
2. **P'S'K' (738°)** - линия фазового равновесия **A ↔ Ф + Г**

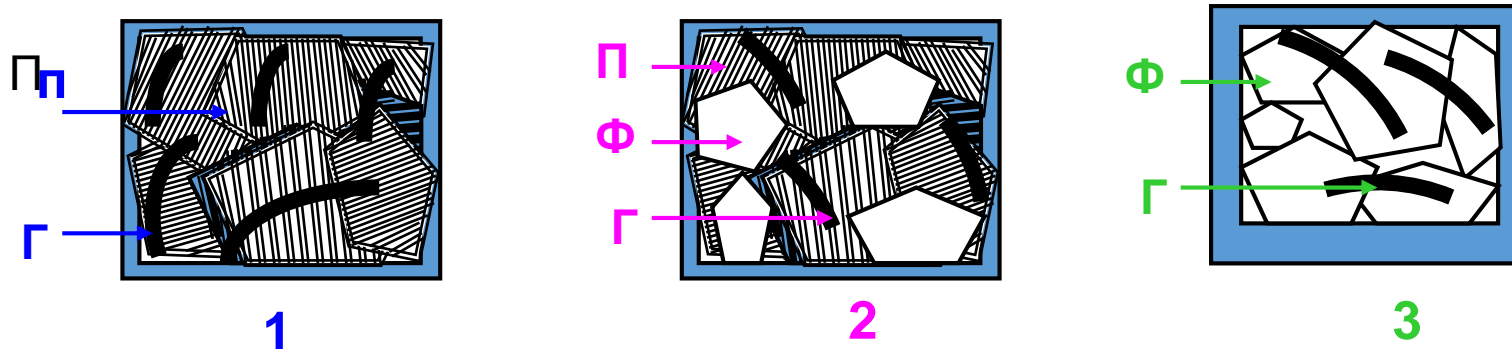
Чугуны

Белый чугун – название получил по матово-белому цвету излома;

- структура в не нагретом состоянии: $\text{Ц} + \text{П}(\text{Ф} + \text{Г})$; т.е. весь углерод находится в форме цементита;
- свойства: высокая твердость и износостойкость, хрупкость, практически не поддается обработке режущим инструментом;
- марки: ИЧХ3, ИЧХ5, ИЧХ15... (износостойкий хромистый чугун с содержанием хрома 3%, 5%, 15% соответственно...);
- применение: детали, работающие в условиях интенсивного износа без ударных нагрузок(например, линейки направляющих, детали шаровых мельниц).

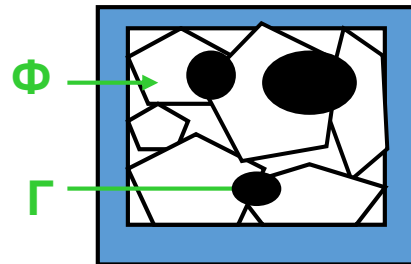
Серые чугуны

- Излом такого чугуна имеет серый цвет. Обладает хорошими литейными свойствами. В структуре присутствует графит, количество, форма и размеры которого изменяются в широких пределах. По строению металлической основы серые чугуны разделяют на: серый перлитный чугун (1) ; серый феррито-перлитный чугун (2); серый ферритный чугун (3). В **обычном сером чугуне** графит имеет пластинчатую форму (1 – 3).

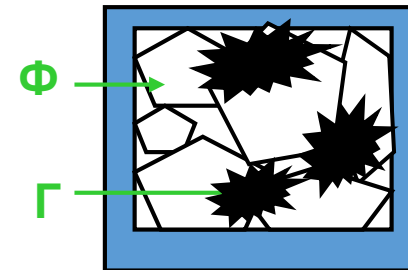


Серые чугуны

- В **высокопрочном сером чугуне** графит находится в форме шаровидного графита, который принимает такую форму благодаря присадке магния или церия (модификаторов) (1). В **ковком сером чугуне** углерод находится в форме хлопьевидного графита (углерода отжига)(2), который образуется в процессе отжига белого чугуна.



1



2

Марки серых чугунов

Вид чугуна	Примеры маркировки	Свойства	Применение
Обычный серый	СЧ12-28 СЧ18-36	$\sigma_B = 12 \text{ кгс/мм}^2 = 120 \text{ МПа}$ $\sigma_{\text{и}} = 28 \text{ кгс/мм}^2 = 280 \text{ МПа}$ $\sigma_B = 18 \text{ кгс/мм}^2; \sigma_{\text{и}} = 36 \text{ кгс/мм}^2$	Станины; корпуса редукторов; тракторные отливки, поршневые кольца и др.
Высокопрочный чугун	ВЧ50-1,5 ВЧ45-5	$\sigma_B = 50 \text{ кгс/мм}^2 = 500 \text{ МПа}$ $\delta\% = 1,5\%$ $\sigma_B = 45 \text{ кгс/мм}^2; \delta\% = 5\%$	Коленчатые валы; арматура тоннелей метро; канализационные трубы; и др.
Ковкий чугун	КЧ35-10 КЧ45-6	$\sigma_B = 35 \text{ кгс/мм}^2 = 350 \text{ МПа}$ $\delta\% = 10\%$ $\sigma_B = 45 \text{ кгс/мм}^2; \delta\% = 6\%$	Литые детали машин, не испытывающие значительных растягивающих и ударных нагрузок.

σ_B - предел прочности при растяжении; $\delta\%$ - относительное удлинение после разрыва;

$\sigma_{\text{и}}$ — предел прочности при изгибе.

Механические свойства металлических материалов и методы их определения

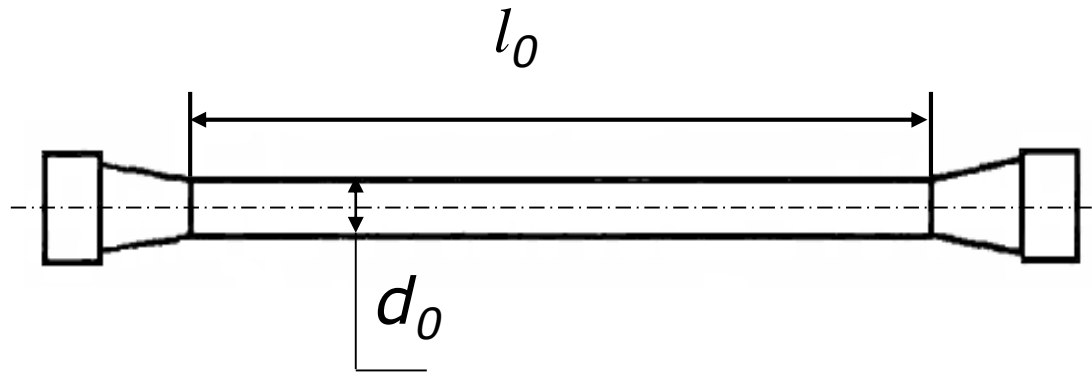
- Аспекты выбора материалов для изготовления деталей машин и механизмов:
 1. **Механические (конструкционные) свойства материалов.**
 2. **Технологические свойства материалов.** Это часть общих физико-химических свойств, по которым на основании практического опыта проектируют и реализуют процесс получения узлов и деталей машин с наилучшими служебными свойствами. Методы определения технологических свойств стандартизованы. К числу важнейших относятся: свариваемость, паяемость, упрочняемость, обрабатываемость резанием, литейные свойства и технологическая деформируемость.
 3. Экономические параметры, связанные с изготовлением деталей.

Механические свойства металлических материалов и методы их определения

- Детали должны выдерживать (передавать) различные нагрузки: статические, динамические, циклические, тепловые и др.
- Способность материала в конструкции сопротивляться внешним воздействиям, (т.е. **свойства материала**), **принято оценивать механическими характеристиками**. Один и тот же материал при различных внешних условиях (температура, скорость нагружения и т.д.) может иметь различные механические свойства.
- Количественная оценка механических свойств материалов производится путем испытаний образцов в специальных испытательных машинах при определенных условиях. Размеры образцов и методики проведения испытаний стандартизованы.

Испытание на растяжение

Образец для испытаний



Относительное

- удлинение

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

- сужение

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\%$$

Разрушение образца из
пластичного материала

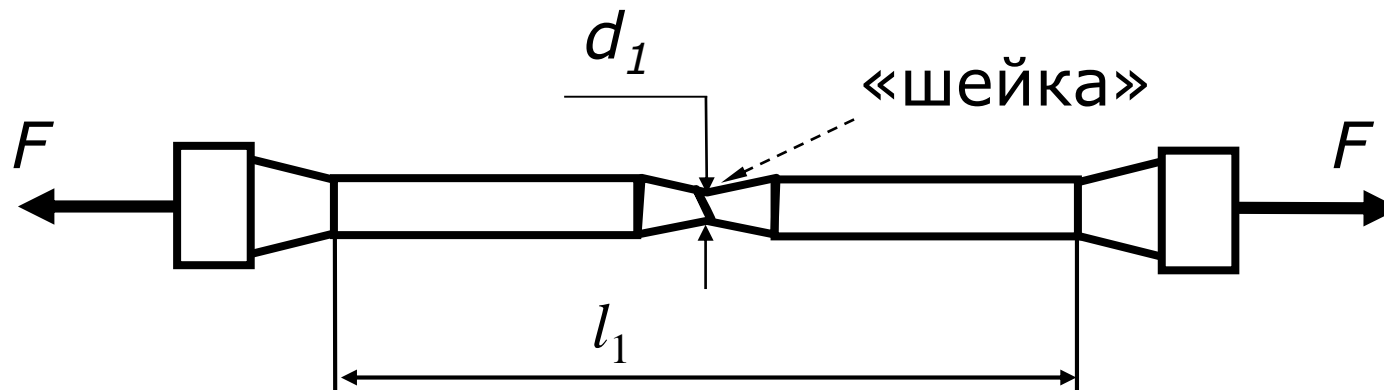
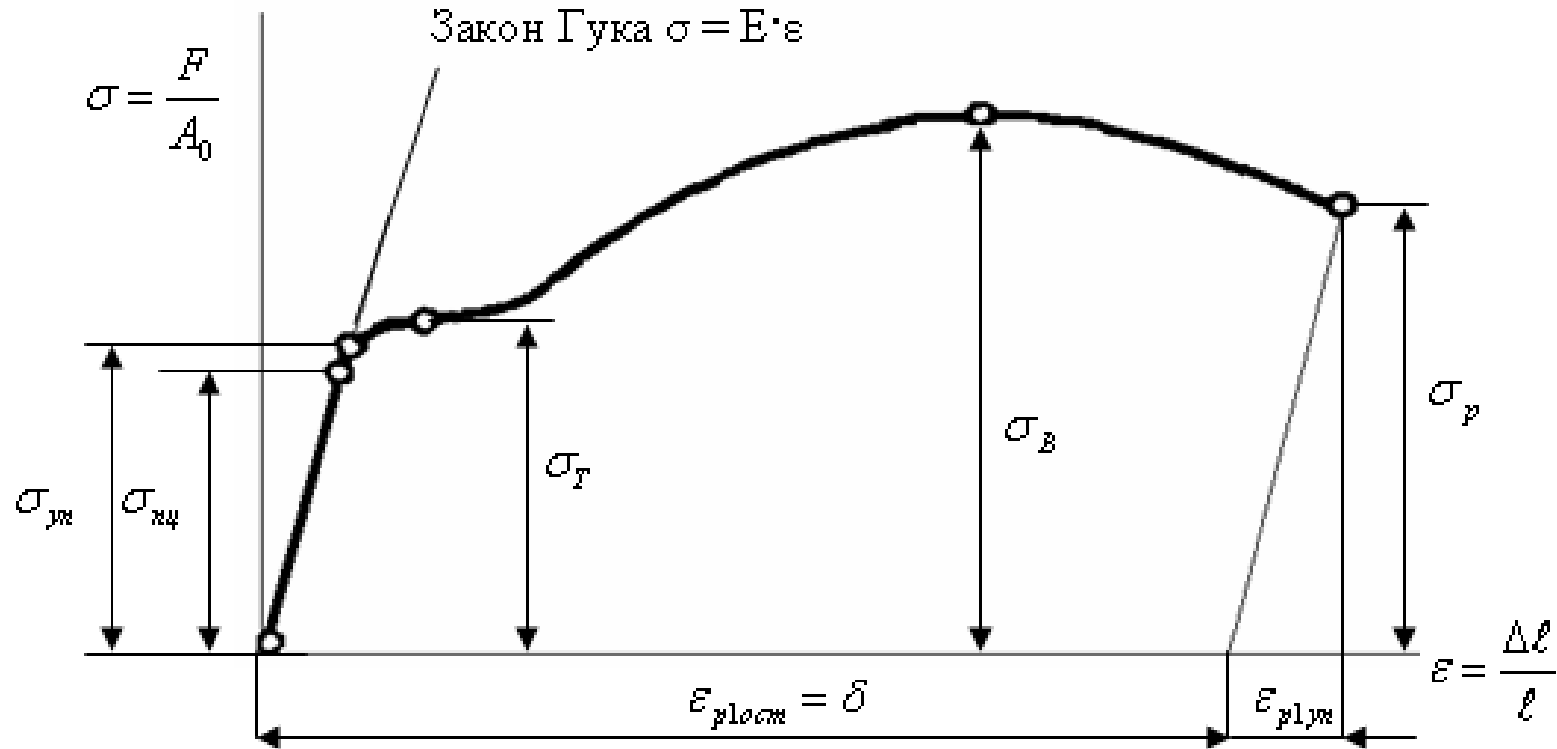


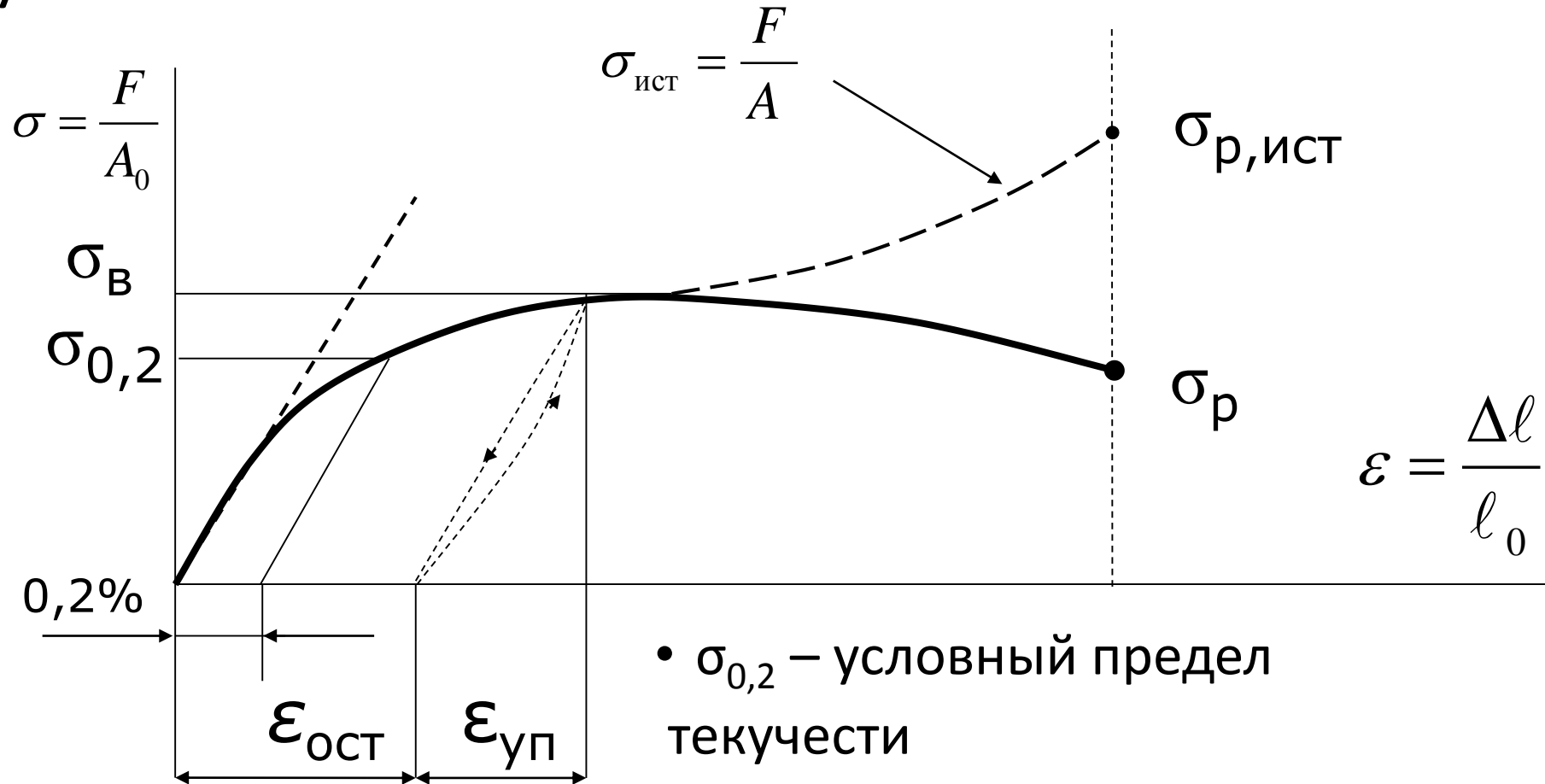
Диаграмма растяжения с площадкой текучести

З
а
к
о
н
Г
у
к
а
σ = E · ε



- $\sigma_{\text{пц}}$, $\sigma_{\text{уп}}$ и σ_{T} – пределы пропорциональности, упругости и текучести;
- $\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление;
- $\sigma_{\text{р}}$ – напряжение в момент разрыва.

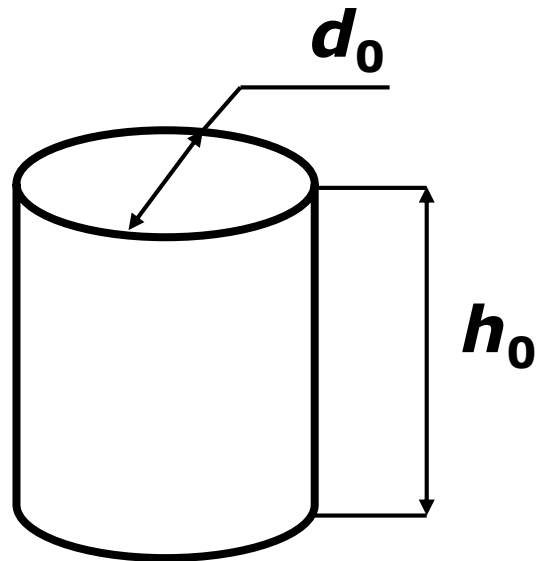
Диаграмма растяжения без площадки текучести



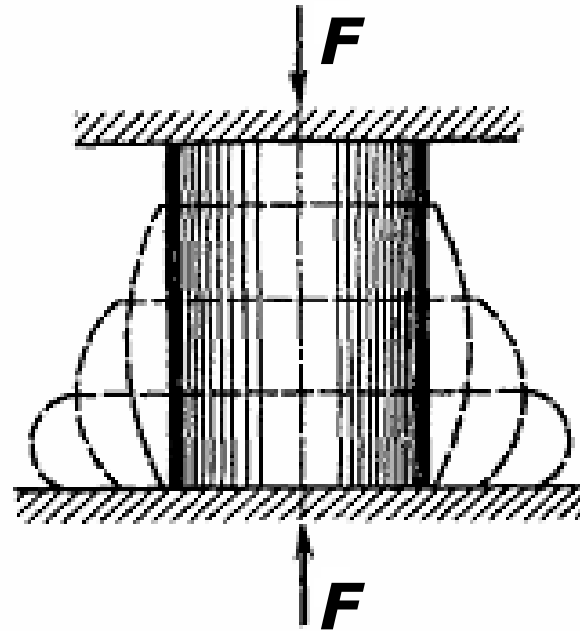
- $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести
- $\sigma_{р,ист}$ – истинное напряжение в момент разрыва

Испытание на сжатие

Образец для
испытаний

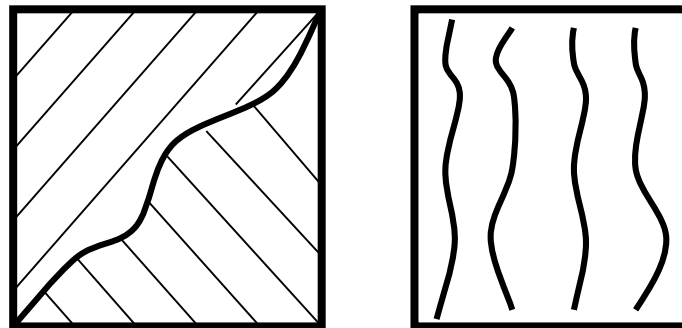


$$\frac{h_0}{d_0} = 1 \div 3$$



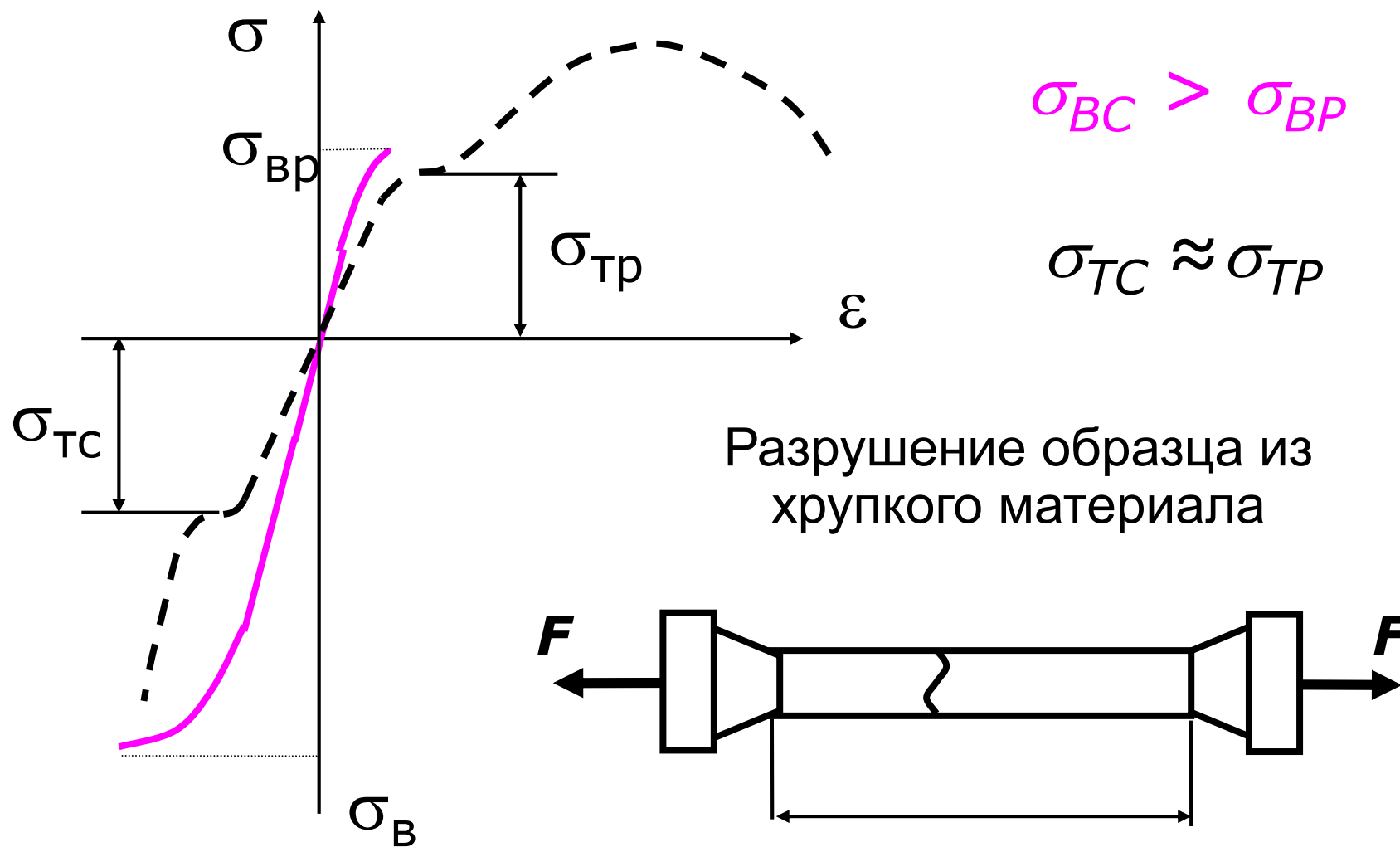
Деформация
образца

из пластичного
материала

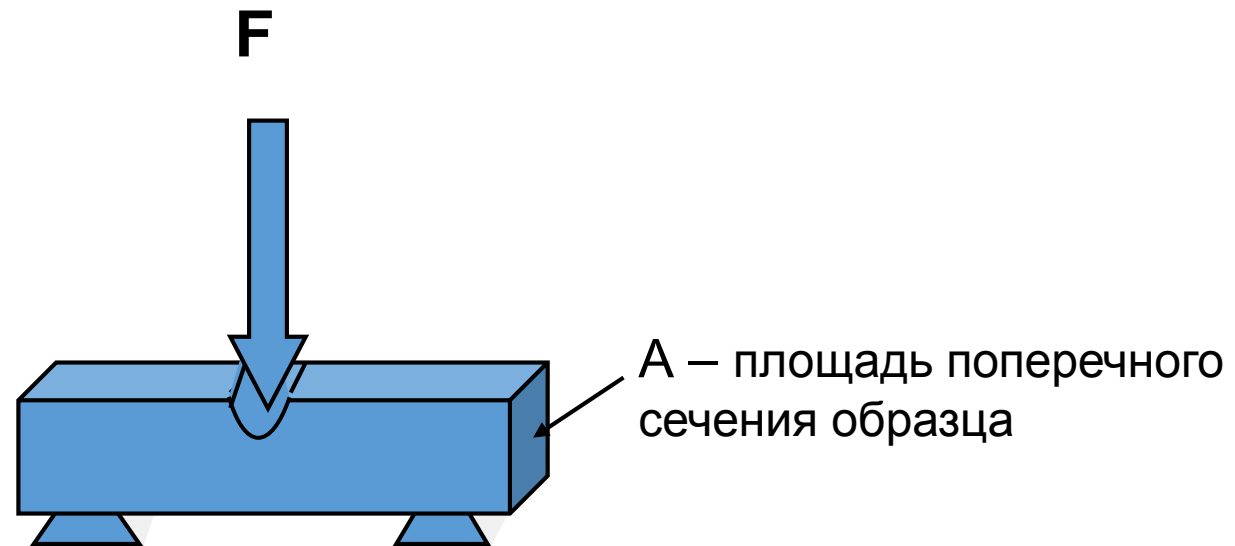


из хрупкого
материала

Диаграммы растяжения и сжатия пластичного и хрупкого материалов



Испытания на изгиб

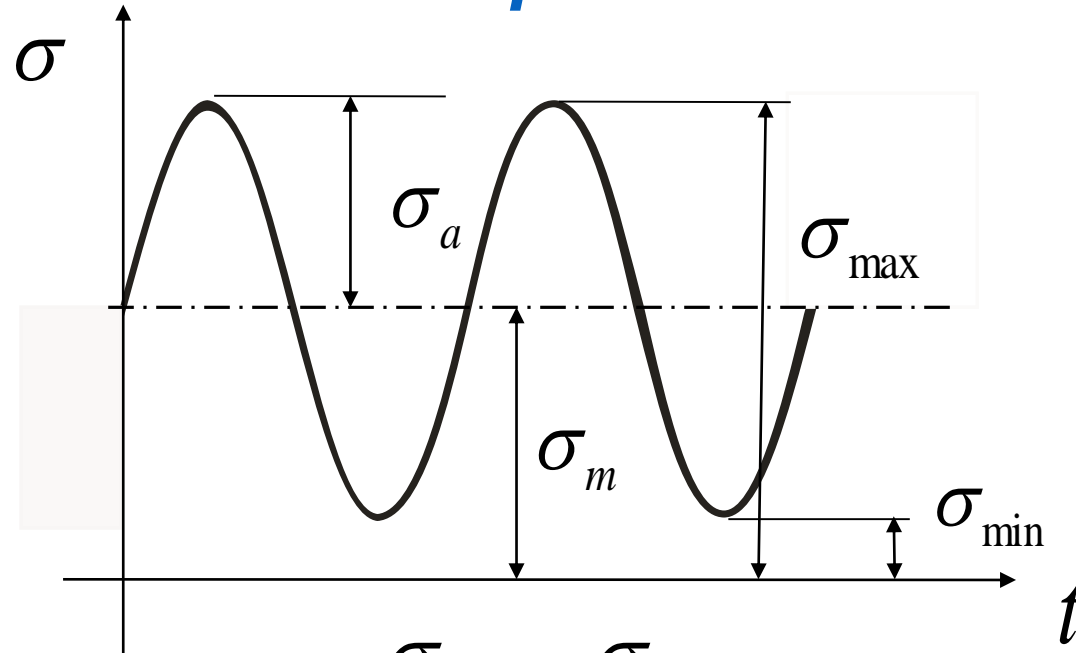


$\sigma_{\text{и}}$ – предел прочности при изгибе

$$\sigma_{\text{и}} = F_{\text{кр}} / A$$

Переменные циклы напряжений

асимметричный

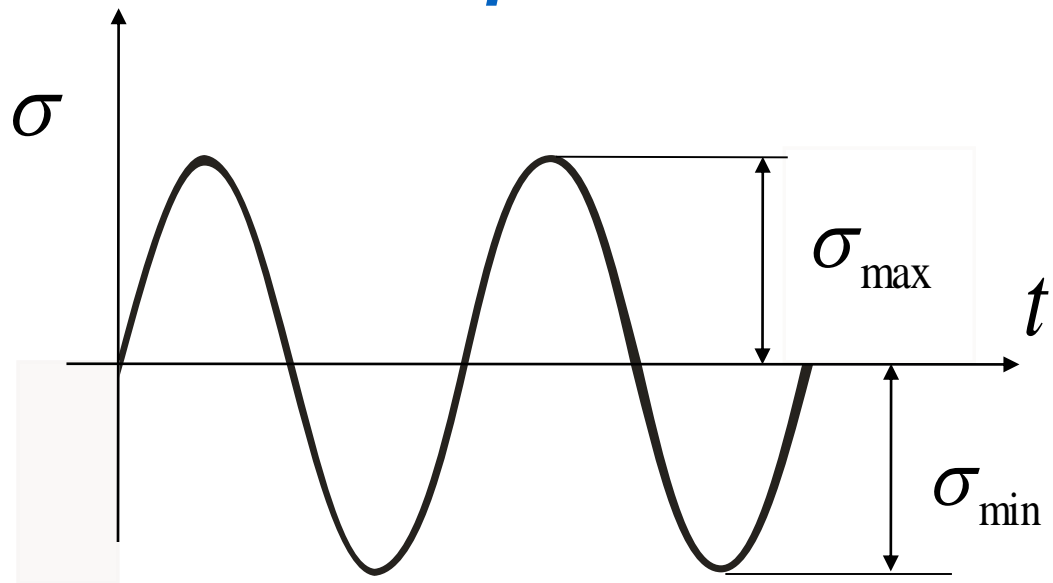


$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

симметричный

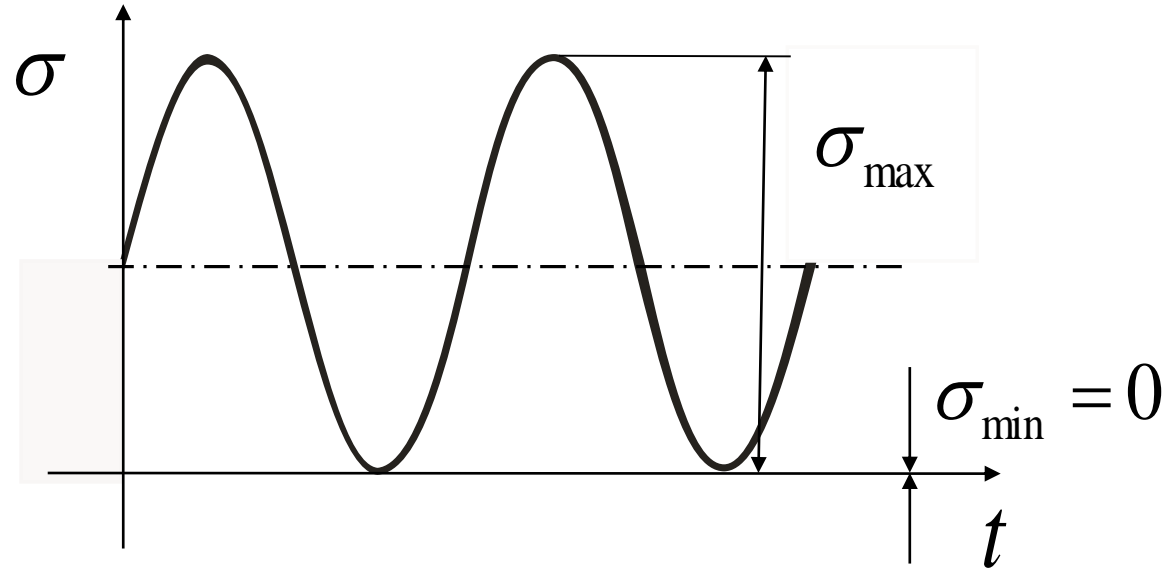


$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \sigma_{\max}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = 0$$

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1 \quad \sigma_r = \sigma_{-1}$$

**отнулевой
(пульсирующий)**

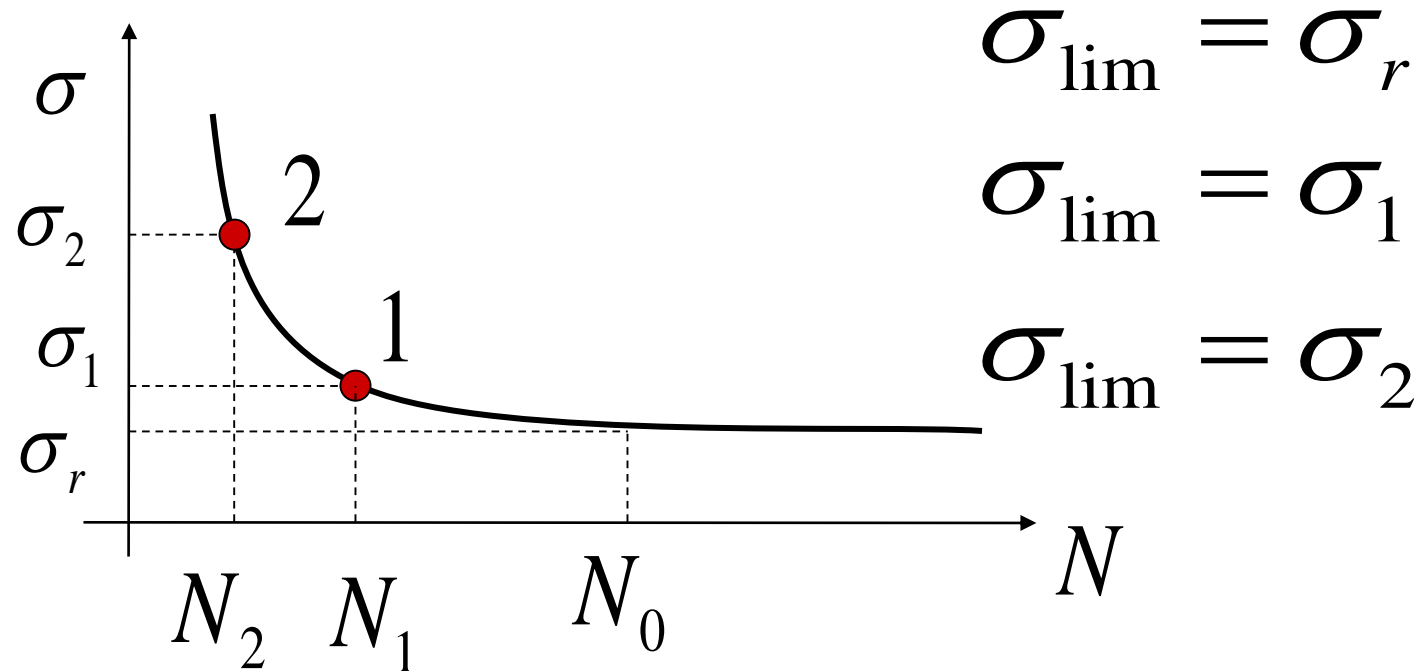


$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_{\max}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_{\max}}{2}$$

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0 \quad \sigma_r = \sigma_0$$

Кривая усталости



- σ_r - предел выносливости - максимальное значение напряжения цикла, при котором разрушение не происходит после практически неограниченного числа циклов изменения напряжений.
- **Цикл изменения напряжений** – совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период их изменения.

Методы определения твердости материалов.

- Измерение твердости – упрощенный метод определения прочности. Твердость – одна из характеристик сопротивления деформации.
- **Метод Бринелля**: в испытуемый материал под действием силы P внедряется шарик (индентор) диаметром D ; число твердости по Бринеллю – $HB = P / S$, где S – сферическая поверхность отпечатка с диаметром d .
- **Метод Роквелла**: индентор – алмазный конус или стальной шарик; числом твердости считают величину обратную глубине вдавливания h ; прибор имеет три шкалы: **HRB** – при вдавливании стального шарика; **HRA** и **HRC** при вдавливании алмазного конуса (с различной нагрузкой).
- **Метод Виккерса**: индентор – алмазная пирамида; критерий числа твердости **HV** – диагональ отпечатка d .

Методы определения твердости материалов.

- Методы **HB** и **HRB** применяют для мягких материалов; **HRC** - для твердых материалов (например, закаленных сталей); методы **HV** и **HRA** - для тонких слоев (листов).
- Между различными методами существует примерная корреляция. По соответствующим таблицам можно перевести значение твердости, полученное одним из методов в значения твердости соответствующие другим методам.
- Число твердости по Бринеллю приблизительно в три раза больше чем предел прочности: $HB \approx \sigma_b / 3$.
- Метод определения микротвердости **H** применим для определения твердости отдельных структурных составляющих. Индентор – алмазная пирамида при очень небольшой нагрузке (до 100г).
- Метод Шора - экспресс-метод определения твердости (**HSD**) крупных изделий в условиях производства по отскоку стального шарика

Сплавы меди

- **Латуни** – сплавы меди с цинком – при содержании цинка до 45%.

Свойства латуней:

- Сплав обладает высокой пластичностью, которая достигает максимального значения при 30% Zn. Латуни легко поддаются пластической деформации.
- Литейные свойства латуней: малая склонность к ликвации; хорошая жидкотекучесть; склонность к образованию концентрированной усадочной раковины.
- Механические свойства латуней: невысокая прочность – $\sigma_{\text{в}} = 300 - 350$ МПа при $\delta\% = 40\% - 20\%$.

Марки латуней:

- Двойные латуни: **Л62** (62%Cu; 38% Zn) **Л68**; **Л70**; в том числе ювелирные латуни (томпаки): **Л80**; **Л85**; **Л96**.
- Специальные латуни: **ЛС59-1** – автоматная латунь (59%Cu; 1% Pb; 40% Zn); морская латунь – **ЛО60-1** (60%Cu; 1%Sn; 39% Zn); латунь с повышенной прочностью – **ЛАН59-3-2** (59%Cu; 3%Al; 2%Ni; 36%Zn).

Сплавы меди

- **Оловянистые бронзы** – сплавы меди с оловом.

Свойства оловянистых бронз:

- Бронзы, содержащие более 5% – 6% Sn обладают низкой пластичностью, их не куят и не прокатывают, а применяют в литом виде.
- Высокие литейные свойства бронз определяются прежде всего малой усадкой (менее 1%) при довольно низкой жидкотекучести.
- Бронзы обеспечивают высокую стойкость против истирания; бронза с 10% олова - наилучший антифрикционный материал.
- Высокая химическая стойкость.

Применение:

- Отливки сложной формы, в т.ч. художественное литье.
- Вкладыши подшипников качения.
- Арматура (паровая, водяная и др.)

Сплавы меди

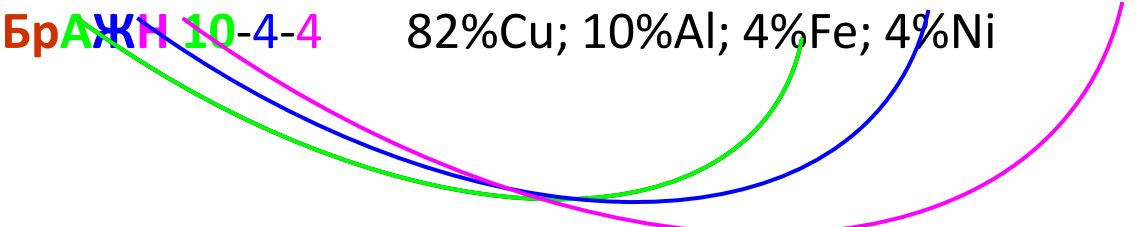
- Сплавы меди с алюминием, кремнием, бериллием и др. элементами также называют **бронзами: алюминиевыми, кремнистыми, бериллиевыми и т.д.**
- Эти бронзы не имеют такой низкой усадки как оловянистая бронза, но превосходят ее по механическим свойствам (алюминиевая, кремнистая), по химической стойкости (алюминиевая), по жидкотекучести (кремнистая), по твердости и упругости (бериллиевая).

Марки бронз

БрО10 90%Cu; 10%Sn

БрОЦСН 3-7-5-1 84%Cu; 3%Sn; 7%Zn; 5%Pb; 1%Ni

БрАЖН 10-4-4 82%Cu; 10%Al; 4%Fe; 4%Ni



Термическая обработка

Технология металлов включает в себя:

1. Металлургию – получение металла заданного состава.
2. Механическую технологию – получение из металла изделий заданной формы.
3. **Термическую обработку** – получение заданных свойств.

Параметры термической обработки:

1. Максимальная температура нагрева – t_{\max} .
2. Время выдержки сплава при температуре нагрева - $\tau_{\text{в}}$.
3. Скорость нагрева - $V_{\text{нагр}}$.
4. Скорость охлаждения – $V_{\text{охл}}$.

Режим термической обработки можно представить в виде график в координатах температура - время

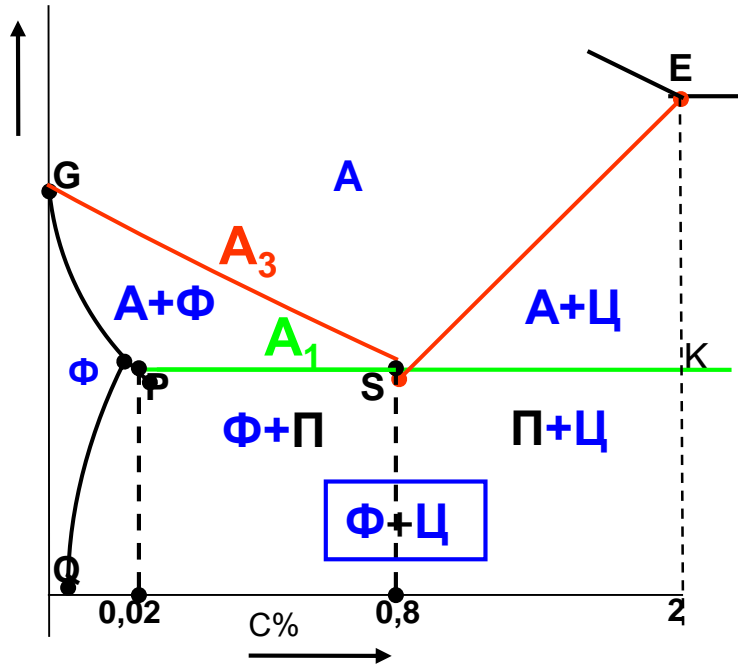
Основные виды термической обработки

1. **Отжиг (первого рода)** – термическая операция, состоящая в нагреве металла, имеющего неустойчивое состояние в результате предшествующей обработки, и приводящая металл в более устойчивое состояние.
2. **Отжиг (второго рода)** – нагрев металла выше температуры превращения с последующим достаточно медленным охлаждением для получения структурно устойчивого состояния сплава.
3. **Закалка** – нагрев металла выше температуры превращения с последующим достаточно быстрым охлаждением для получения структурно неустойчивого состояния сплава.
4. **Отпуск** – нагрев закаленного сплава ниже температуры превращения для получения более устойчивого структурного состояния .

Сложные виды термической обработки

- **Химико-термическая обработка** – нагрев сплава в соответствующих химических реагентах для изменения состава и структуры поверхностных слоев. В данном случае используется способность металлов растворять различные, окружающие их поверхность элементы, атомы которых, при повышенных температурах, могут дифундировать в металлы.
- **Термомеханическая (термопластическая)** обработка – деформация и последующая термическая обработка, сохраняющая в той или иной форме результаты наклепа

Виды термической обработки стали



Основа изучения термообработки стали – диаграмма железо – углерод.

Общепринятые обозначения критических точек (А):

- A_1 – линия PSK – соответствует превращению $A \leftrightarrow П$;
- A_3 – линия GSE – соответствует началу выпадения или концу растворения Φ (в доэвтектоидных сталях) или Ψ (в заэвтектоидных сталях);
- A_{c_1} и A_{c_3} – обозначение критических точек при нагреве;
- A_{r_1} и A_{r_3} – обозначение критических точек при охлаждении.

1. **Отжиг** – нагрев выше A_{c_3} с последующим медленным охлаждением (если охлаждение происходит на воздухе то такой вид термообработки называют **нормализацией**); при охлаждении из межкритического интервала термообработку называют **неполным отжигом**.
2. **Закалка** нагрев выше A_{c_3} с последующим быстрым охлаждением; при охлаждении из межкритического интервала термообработку называют **неполной закалкой**.
3. **Отпуск** – нагрев закаленной стали ниже A_{c_3} .

Четыре основных превращения в стали

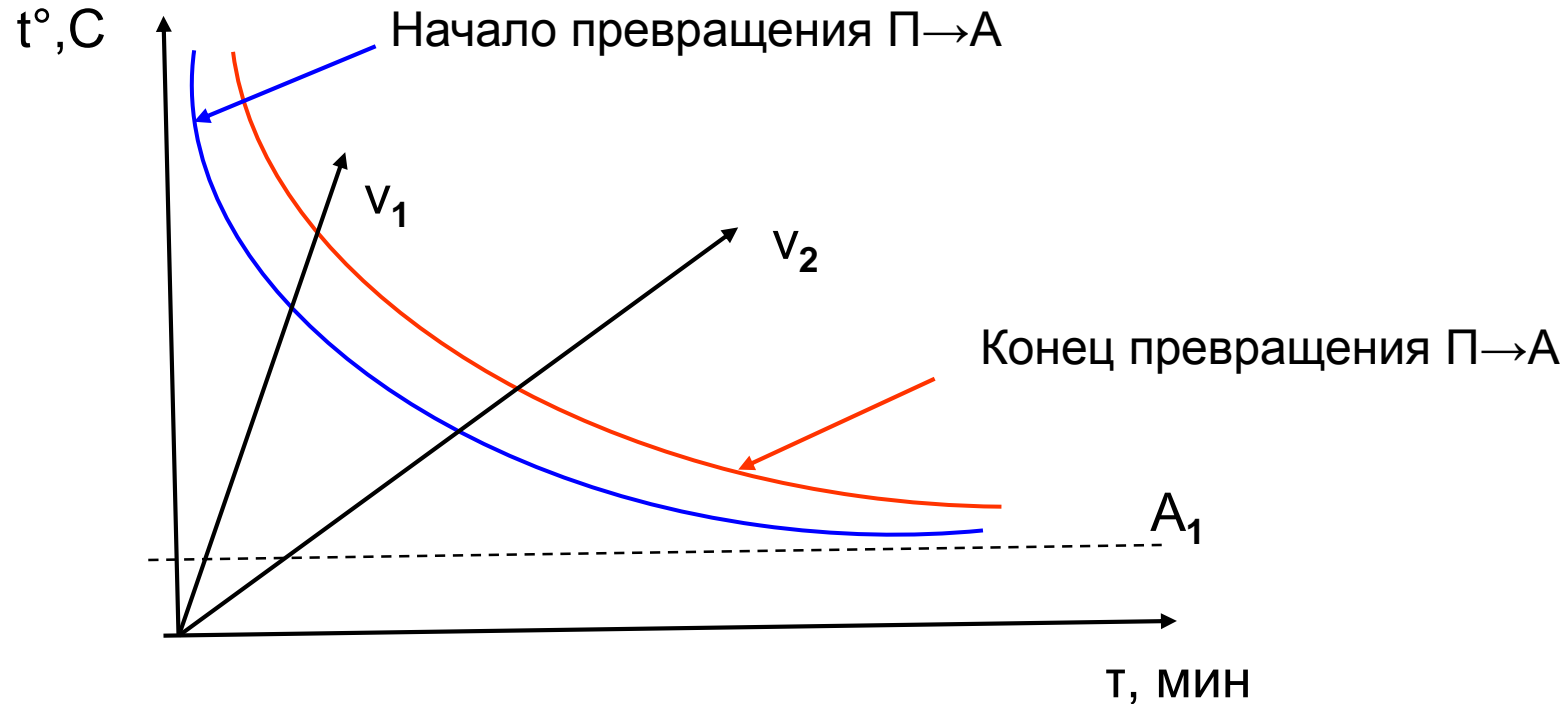
1. Превращение перлита в аустенит при нагреве: $P \rightarrow A$.
2. Превращение аустенита в перлит при медленном охлаждении: $A \rightarrow P$.
3. Превращение аустенита в мартенсит при закалке: $A \rightarrow M$.
(Мартенсит – пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе).
4. Превращение мартенсита в перлит (феррито – карбидную смесь) чаще всего при нагреве: $M \rightarrow P$.

Представленные фазовые превращения используются при термообработке и обусловлены изменением температуры.

Практическое значение температуры рекристаллизации

1. **Горячая обработка давлением** – пластическое деформирование выше температуры рекристаллизации. При этом упрочнение металла, если и произойдет, то будет немедленно сниматься процессами рекристаллизации, протекающими при этих температурах.
2. **Холодная обработка давлением** – пластическая деформация ниже температуры рекристаллизации. Такая обработка вызывает наклеп (нагартовку) металла – упрочнение металла под действием пластической деформации.

Образование аустенита

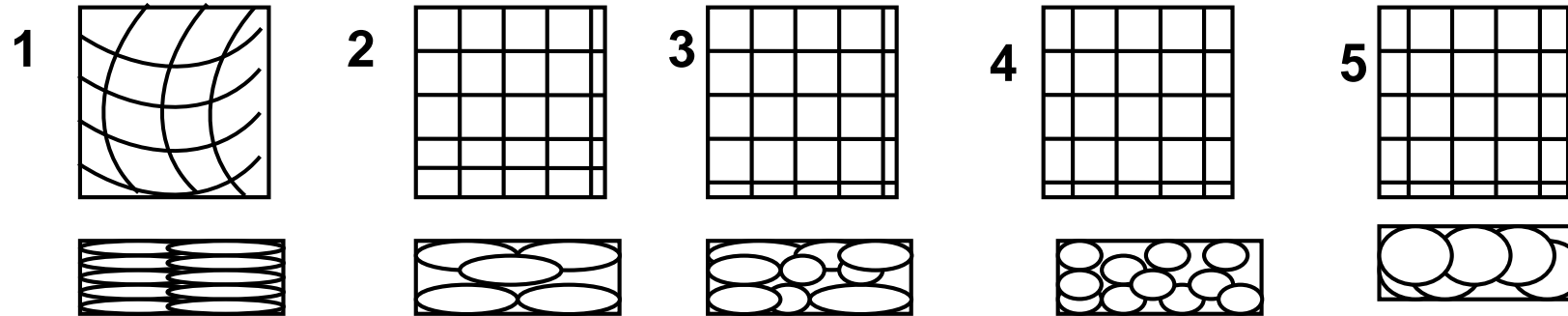


При обычных условиях нагрева:

1. Для начала превращения необходим перегрев выше A_1 .
2. Превращение происходит в интервале температур.

Кривые начала и конца превращения асимптотически приближаются к линии A_1 .

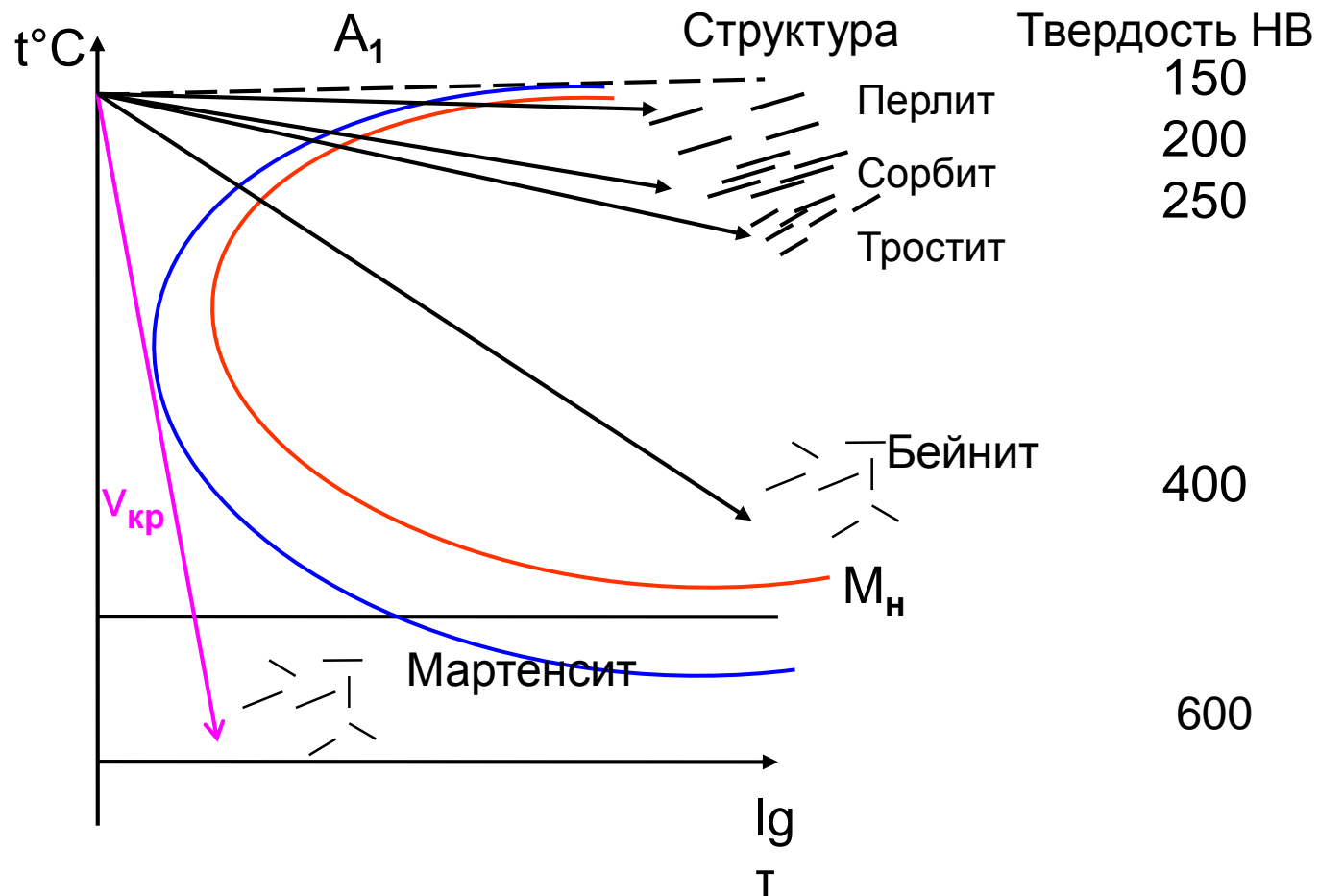
Отжиг пластически деформированного металла



1. Пластическая деформация приводит металл в структурно неустойчивое состояние. Искривляется кристаллическая решетка, появляется **текстура** (определенная ориентировка зерен).
2. **Возврат (отдых)** – снятие искажений кристаллической решетки в процессе нагрева до $300^{\circ} - 400^{\circ}\text{C}$. Твердость и прочность несколько понижаются, а пластичность возрастает.
3. **Рекристаллизация (первая стадия)** – образование новых зерен протекает при более высокой температуре (для сплавов T рекристаллизации $\approx 0,8T$ плавления). Свойства металла становятся прежними.
- 4, 5. **Рекристаллизационный отжиг** – вторая стадия рекристаллизации – образование и рост равноосных зерен. Происходит при более высоких температурах. (**Вторичная или собирательная рекристаллизация**).

Распад аустенита

Диаграмма изотермического превращения аустенита



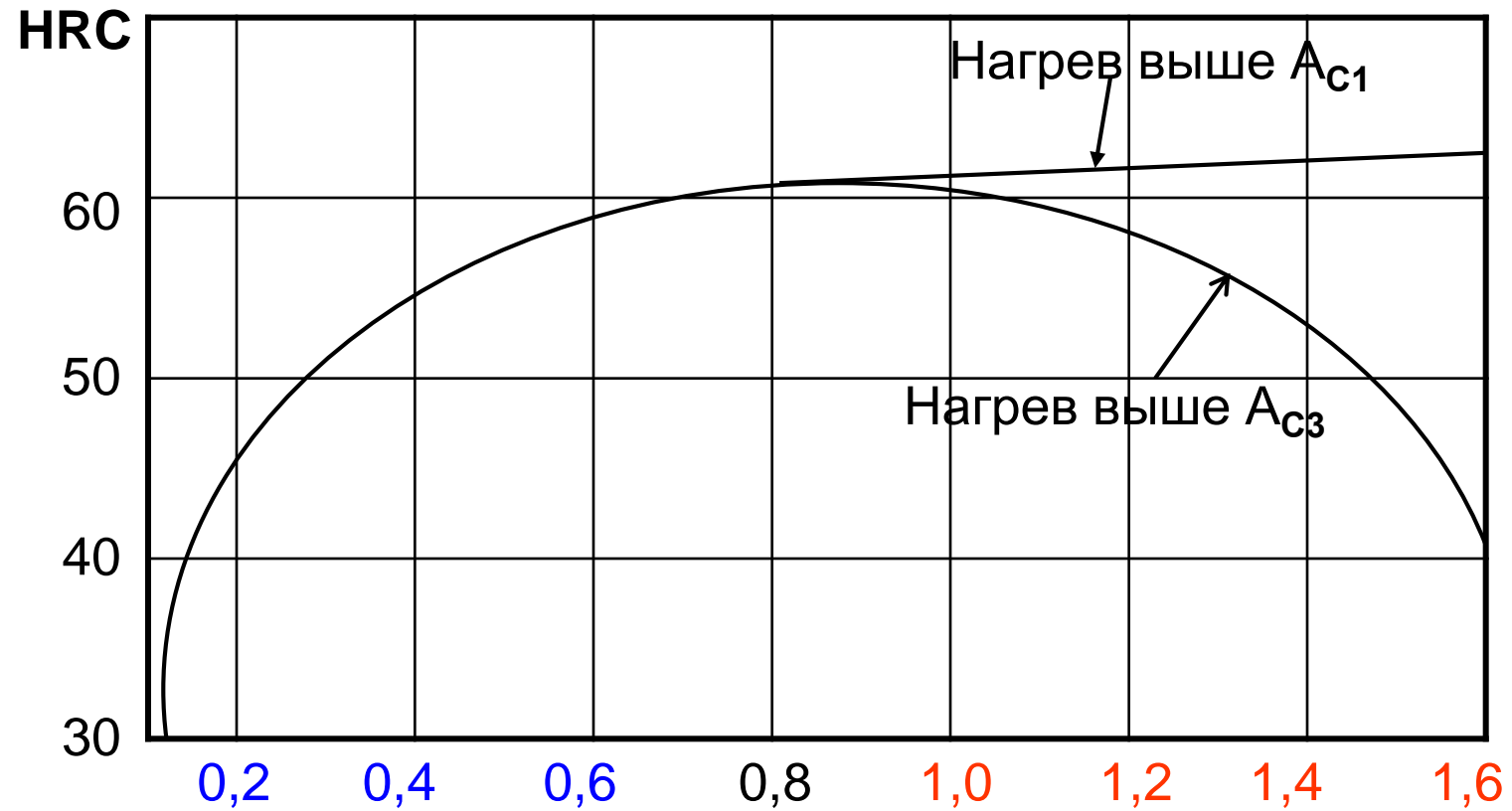
Минимальная скорость охлаждения необходимая для переохлаждения аустенита до мартенситного превращения называется **критической скоростью закалики**.

Преобразования при отпуске

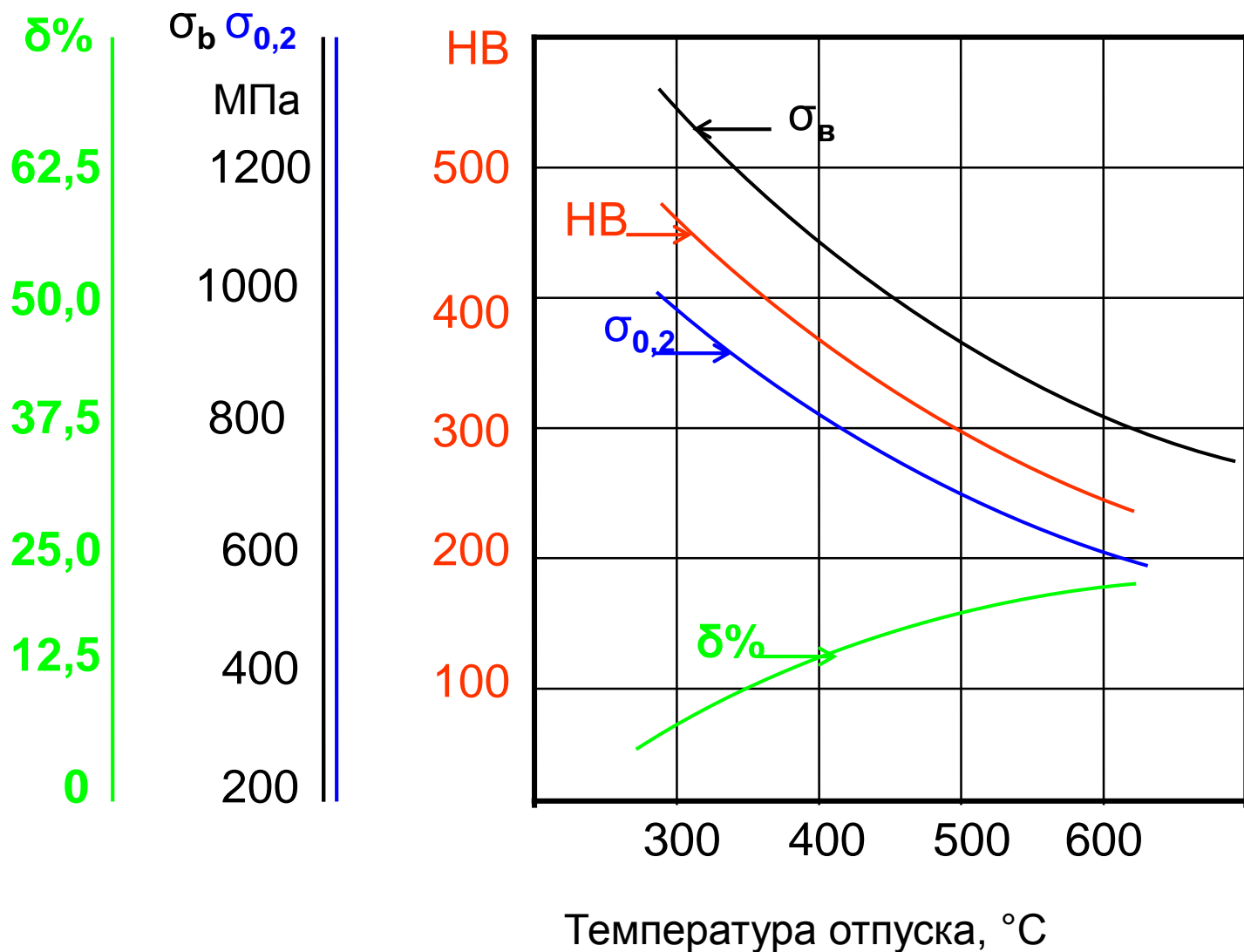
Исходная структура: мартенсит – структура закаленной стали. Мартенсит – структура, обладающая наибольшим объемом, а аустенит – минимальным.

- 1. Первое превращение:** в интервале температур 80° - 200°C образуется мартенсит отпуска, при этом тетрагональность решетки мартенсита уменьшается вследствие выделения карбидов.
- 2. Второе превращение:** в интервале температур 200° - 300°C происходит распад остаточного аустенита с образованием мартенсита отпуска, при этом объем увеличивается.
- 3. Третье превращение:** в интервале температур 300° - 400°C происходит снятие внутренних напряжений, возникающих в результате предыдущих превращений, сопровождавшимся объемными изменениями.
- 4. Четвертое превращение:** выше 400°C происходит интенсивная коагуляция карбидов, образуется смесь $\Phi + \text{Ц}$ в виде тростита (350° - 500°C) или сорбита (500° - 600°C).

Влияние параметров закалки на твердость стали



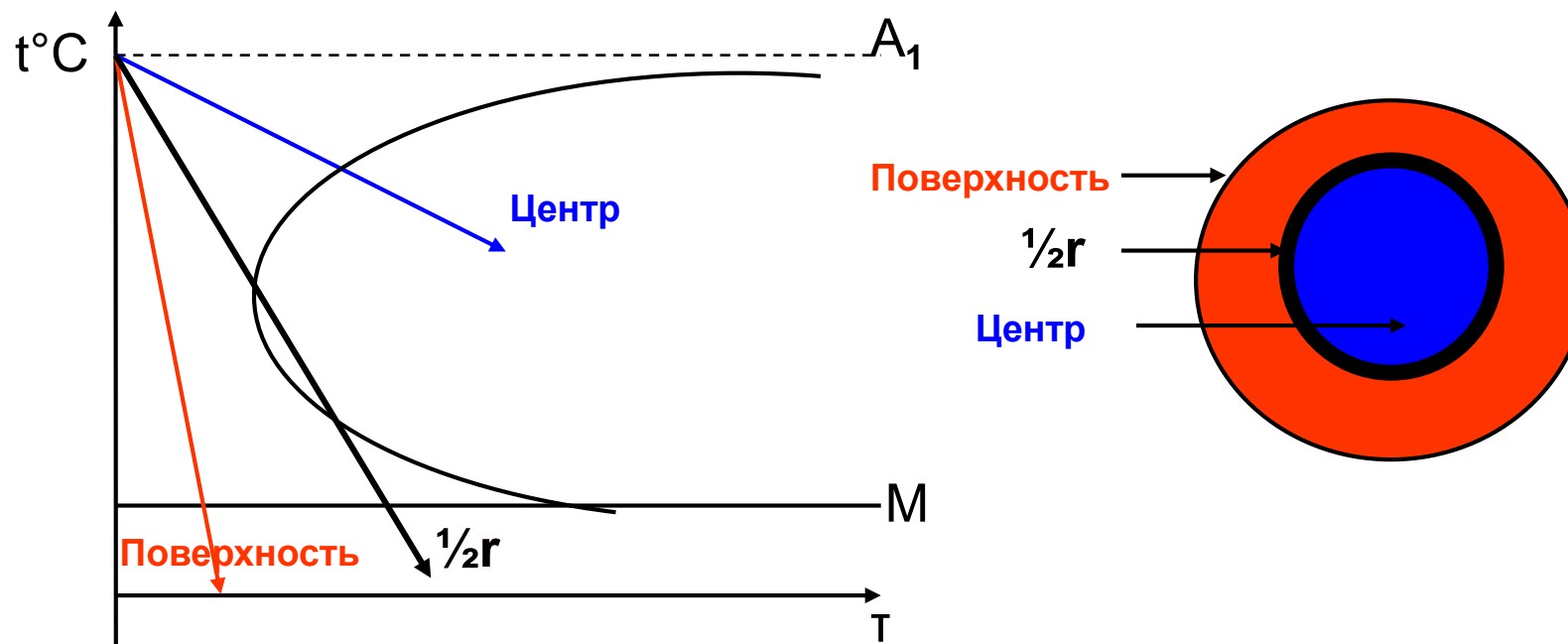
Влияние температуры отпуска на свойства закаленной стали 40



Практика термической обработки

Закалка стали.

- Закаливаемость – характеризуется максимальным значением твердости, приобретенным сталью в результате закалки.
- Прокаливаемость – глубина проникновения закаленной зоны.



D_k – критический диаметр- максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в данном охладителе.

Внутренние напряжения при закалке

- 1. Внутренние напряжения первого рода (термические):** зональные внутренние напряжения, возникающие между отдельными зонами сечения и различными частями детали. Чем больше градиент температур по сечению, тем больше напряжения первого рода.
- 2. Внутренние напряжения второго рода (структурные):** возникают внутри зерна или между соседними зернами. Эти напряжения возникают между различными фазами вследствие того, что у них разные коэффициенты линейного расширения, или из-за образования новой фазы с иным объемом.
- 3. Остаточные напряжения** – напряжения, которые сохранилась в детали в результате охлаждения.

Отпуск – необходимое и радикальное средство уменьшения остаточных напряжений.

Химико-термическая обработка.

- **Преимущества по сравнению с закалкой ТВЧ:**

1. Независимость от внешней формы изделия.
2. Большое различие между свойствами сердцевины и поверхности.
3. Последствия перегрева могут быть устранены последующей термической обработкой.

- **Виды ХТО:**

1. Цементация – насыщение поверхности детали углеродом с последующей закалкой, при которой на поверхности получается высокоуглеродистый мартенсит, а в сердцевине сохраняется низкая твердость и высокая вязкость.
2. Азотирование – насыщение поверхности детали азотом, которое осуществляют на готовых деталях, т.к. азотированный слой обладает высокой твердостью, а размеры изделий изменяются после азотирования крайне мало.
3. Цианирование.
4. Диффузионная металлизация – процесс диффузионного насыщения поверхности деталей металлами. Например: хромирование или алитирование для повышения жаростойкости изделий.