

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

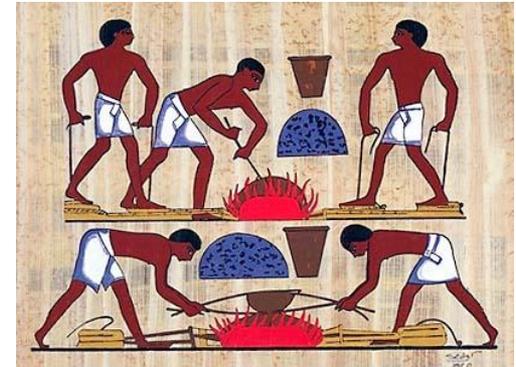
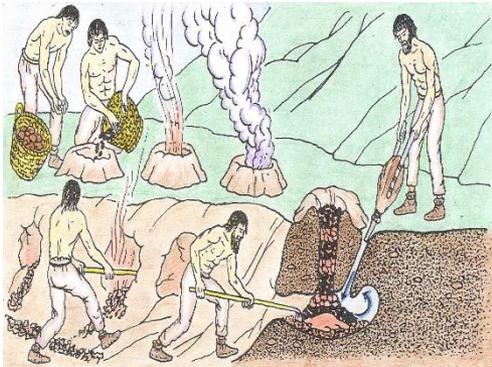


Материаловеден

Система Fe-Fe₃C. Термообработка

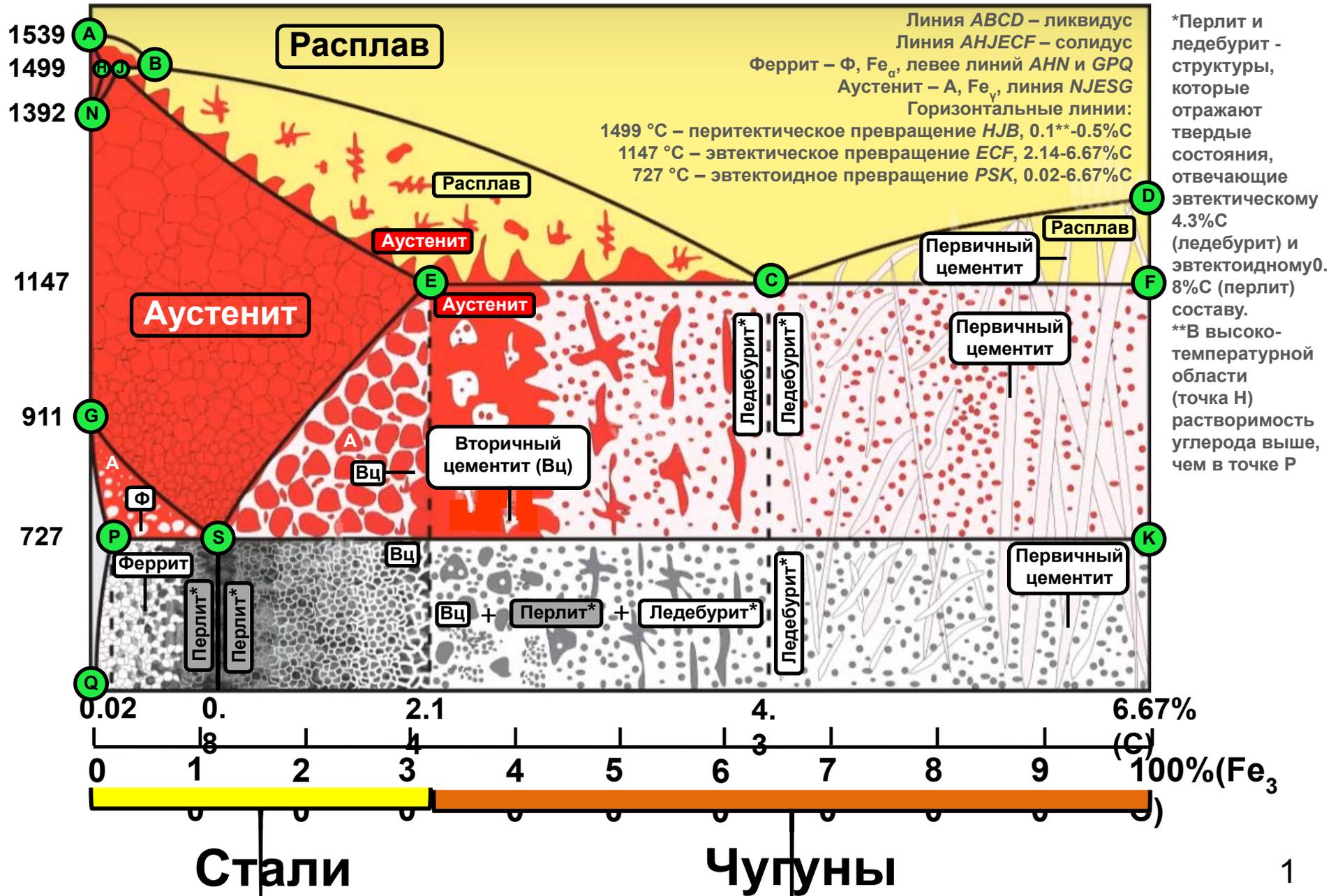
Стали: классификация и маркировка

Чугуны: классификация и маркировка



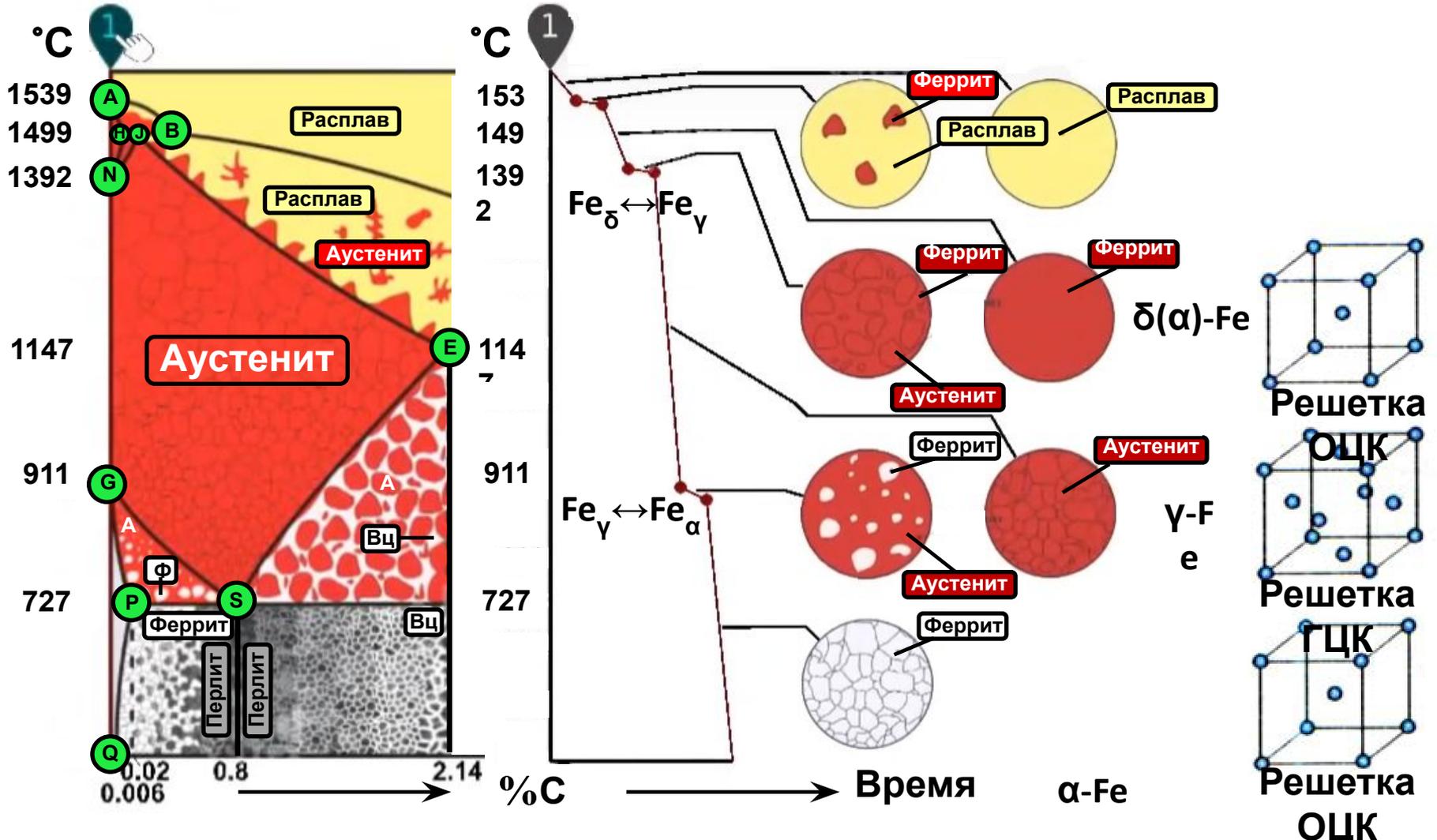
Санкт-Петербург
3 апреля 2020 г

Диаграмма состояния Fe-Fe₃C



Температурный полиморфизм железа

Полиморфизм – это способность некоторых веществ иметь разную кристаллическую решетку в зависимости от внешних условий (Т и Р). Разные кристаллические формы вещества называются полиморфными модификациями.



Фазы и смеси фаз в системе Fe-Fe₃C

Феррит (Ф или α и δ) – твёрдый раствор внедрения углерода в α-железе.

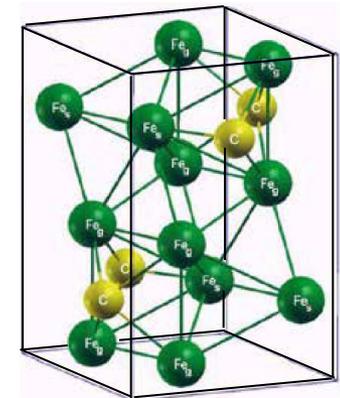
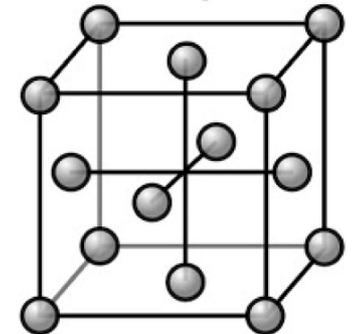
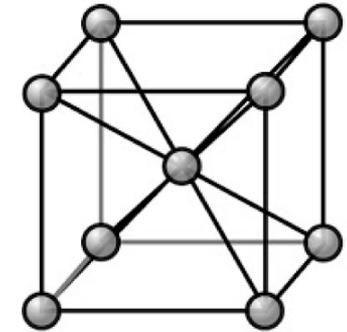
Предел растворимости углерода 0.02 масс.% в низкотемпературной модификации (α), 0.1 масс.% в высокотемпературной модификации (δ). Углерод растворяется в вакансиях ОЦК α-железа. Мягко, пластичен, обладает магнитными свойствами.

Аустенит (А или γ) – твердый раствор внедрения углерода в γ-железе. Предел растворимости углерода 2.14 масс.%. Углерод растворяется в октаэдрических пустотах кристаллической решетки ГЦК γ-железа. Пластичен, немагнитен.

Цементит (Fe₃C) – метастабильное химическое соединение железа с углеродом (6.67 масс.%). Очень тверд и хрупок. Магнитен до 210 °С.

Перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита

Ледебурит – эвтектическая смесь аустенита и цементита



Обозначение критических точек на диаграмме состояния Fe-Fe₃C

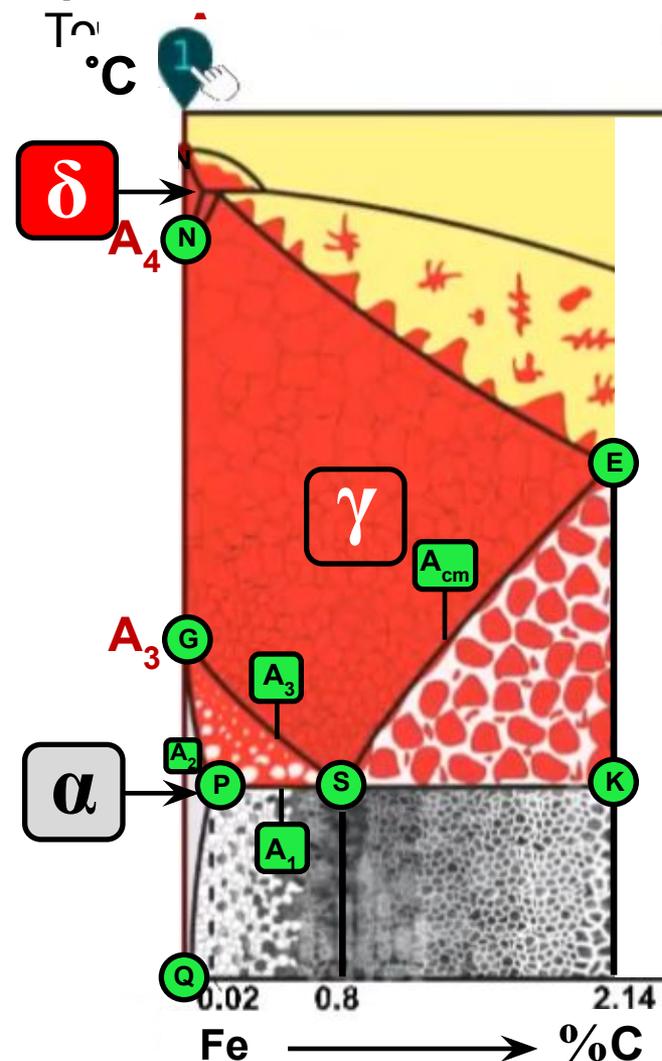
Критические точки железа: Точка **A₃** – температура равновесия **Fe_α ↔ Fe_γ** (911°C)
Точка **A₄** – температура равновесия **Fe_γ ↔ Fe_δ** (1392°C)

Критические точки стали: Точка **A₁** (линия **PSK**) – температура эвтектоидного превращения: при медленном охлаждении **аустенит** состава **S** превращается в **феррит** состава **P** и цементит, при медленном нагреве реакция идет в обратном направлении.

Точка **A₃** (линия **GS**) – начало выделения феррита из аустенита при медленном охлаждении или конец превращения феррита в аустенит при медленном нагреве

Точка **A_{cm}** (линия **SE**) – начало выделения цементита из аустенита при медленном охлаждении или окончание равновесия цементита в аустените при медленном нагреве.

Точка **A₂** (768°C) – температура перехода феррита из **ферромагнитного** в **парамагнитное** состояние при нагреве и в обратном направлении при охлаждении (**температура Кюри**).



Обозначение критических точек на диаграмме состояния Fe-Fe₃C

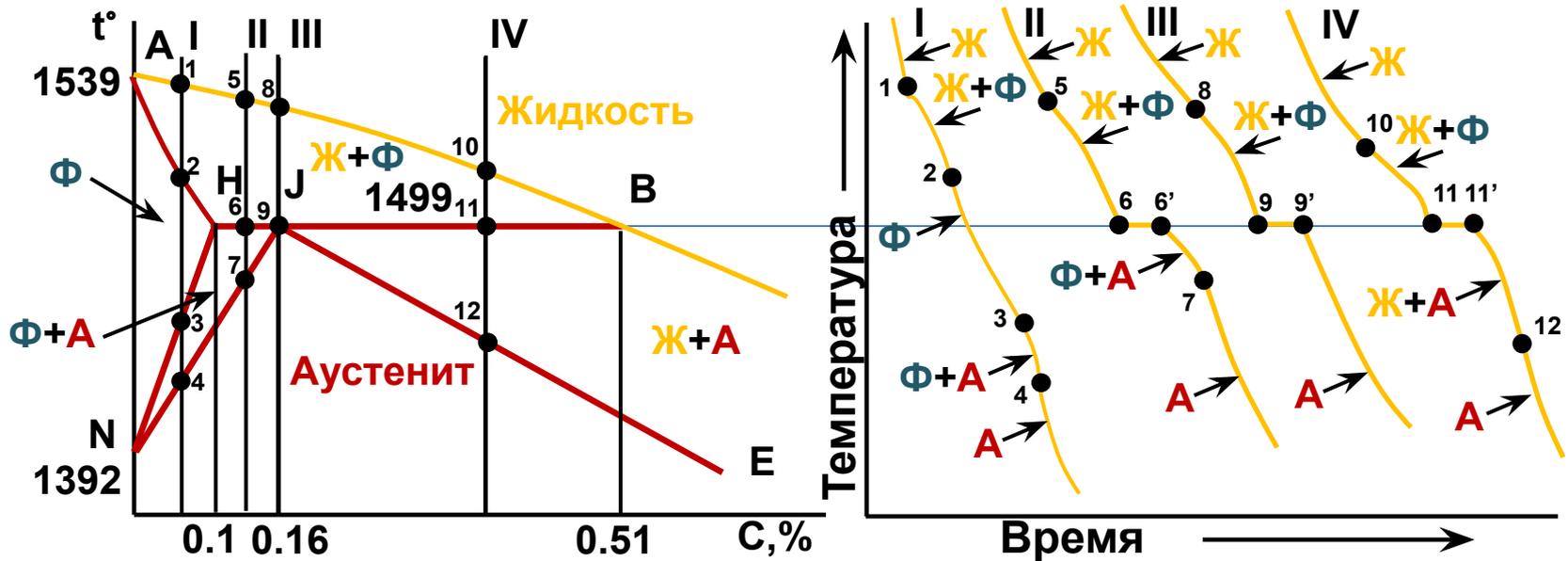
При нагреве или при охлаждении определяется критическая точка, к букве **A** добавляется индекс “с” при нагреве (от французского слова *chauffage* – нагрев) и индекс “r” (от французского слова *refroidissement* – охлаждение) при охлаждении с оставлением цифры, характеризующей данное превращение.

Так, критические точки, определенные при нагреве – **A_{c1}**, **A_{c3}**..., а при охлаждении – **A_{r1}**, **A_{r3}**...

Нагрев доэвтектоидной стали выше соответствующей точки на линии **GS** обозначается как нагрев выше точки **A_{c3}**. При охлаждении же этой стали первое превращение должно быть обозначено как **A_{r3}**, второе (на линии **PSK**) - как **A_{r1}**. Точку **A₃** для заэвтектоидных сталей обычно обозначают **A_{cm}**.

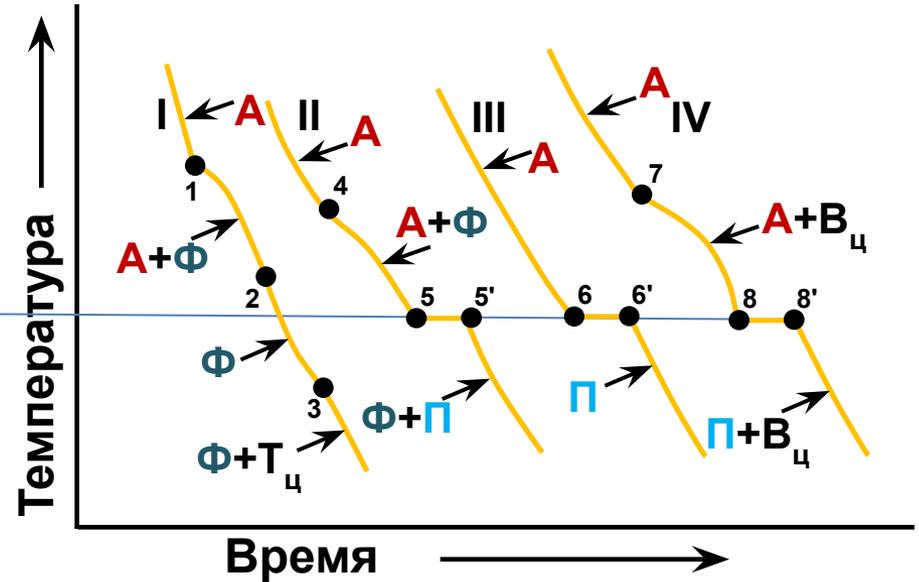
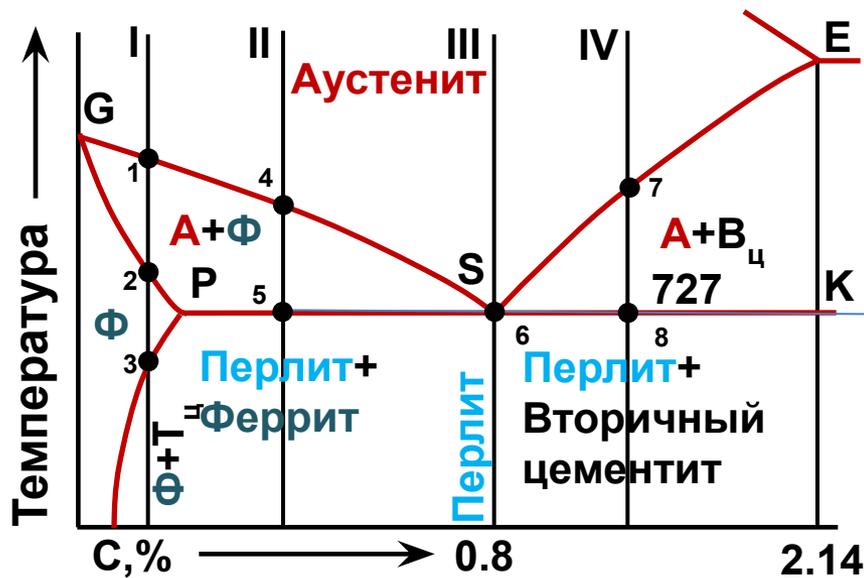
Кривые охлаждения для сталей с перитектическим превращением

Перитектическое превращение: $\text{Ж}_B + \Phi_H \xleftrightarrow{1499} \text{A}_J$



Кривые охлаждения для сталей с эвтектоидным превращением

Эвтектоидное превращение: $A_S \xleftrightarrow{727} \Phi_P + \text{Ц}$

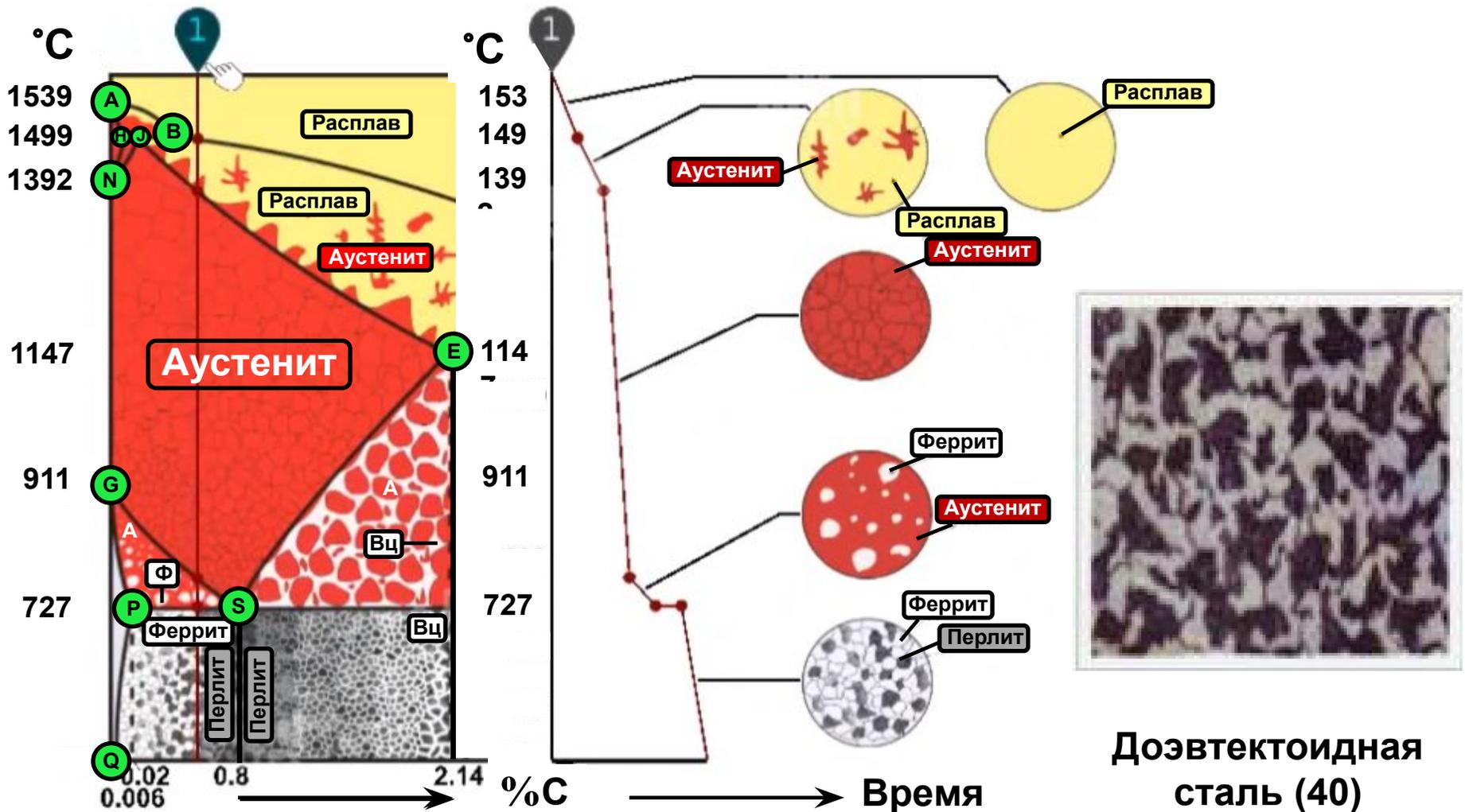


Т_ц – третичный цементит

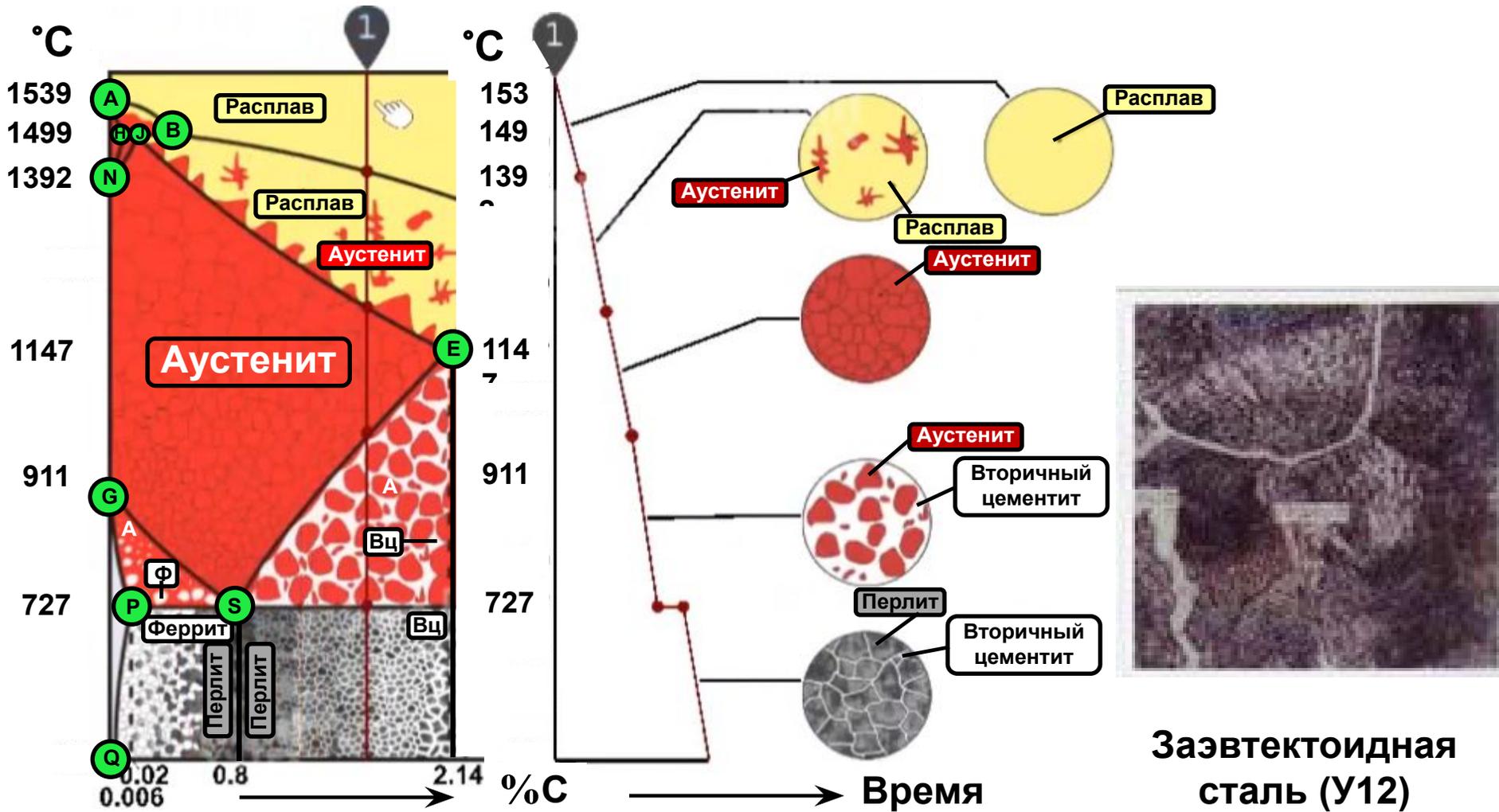


Эвтектоидная сталь (У8)

Кривые охлаждения и структура доэвтектоидной стали



Кривые охлаждения и структура заэвтектоидной стали



Заэвтектоидная сталь (У12)

Классификация видов термической обработки сталей

Термическая обработка



Основные виды термической обработки сталей: отжиг

Отжиг – термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла, находящегося в **неравновесном** состоянии в результате предшествующей обработки, и приводящая его в более **равновесное** состояние.

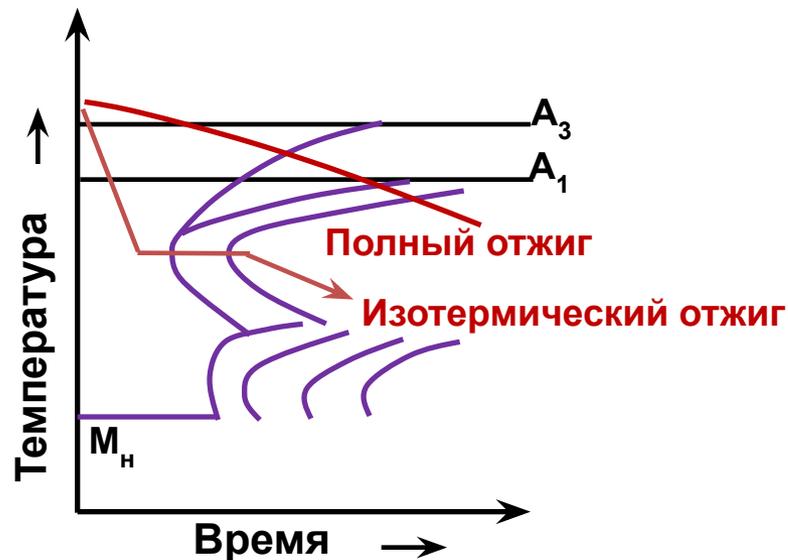
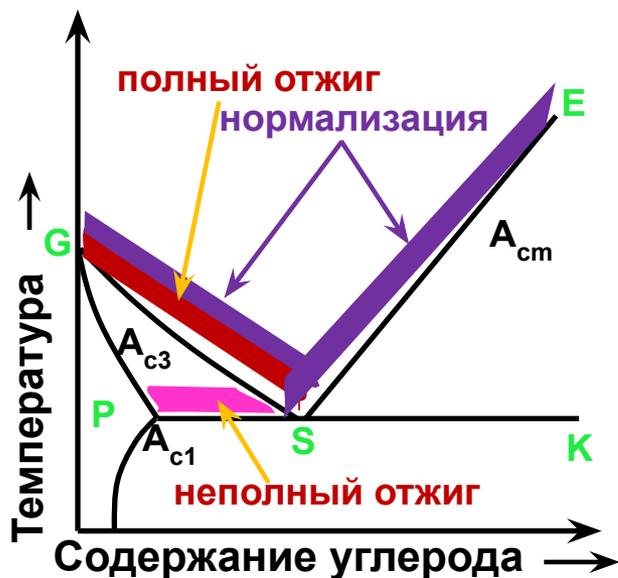
Охлаждение после отжига всегда **медленное** (с печью).

Различают:

- **Отжиг первого рода** – при котором нагрев проводится ниже температур фазовых превращений. Его цель – устранение химической неоднородности, уменьшение внутренних напряжений.
- **Отжиг второго рода** – при котором нагрев проводится выше температур фазовых превращений. Его цель – получение структурно равновесного состояния.

Отжиг II рода применяют для получения равновесной структуры в целях *снижения твердости, повышения пластичности и вязкости стали; улучшения обрабатываемости; измельчения зерна.*

Отжиг второго рода



Полный (рекристаллизационный) отжиг доэвтектоидных сталей:

Для углеродистых сталей:

аустенитизация при $t = A_{C3} + (30-50^\circ\text{C})$ + охлаждение со скоростью 150-200 град/час

Изотермический отжиг – разновидность полного отжига, применяется для

легированных сталей.

Аустенитизация + ускоренное охлаждение до $t = A_{C1} - (50-100^\circ\text{C})$ + выдержка до полного распада переохлажденного аустенита.

Неполный отжиг доэвтектоидных сталей:

нагрев в интервале $A_{C1}-A_{C3}$ + охлаждение по режиму полного отжига.

Нормализация – аустенитизация при $t = A_{C3} + (30-50^\circ\text{C})$ для доэвтектоидных сталей и $t = A_{cm} + (30-50^\circ\text{C})$ для заэвтектоидных сталей + ускоренное охлаждение на воздухе.

Основные виды термической обработки сталей: закалка

Закалка - это термическая обработка, состоящая из нагрева стали до температуры аустенитного состояния, выдержки при этой температуре и последующего **быстрого охлаждения со скоростью больше критической ($V > V_{кр}$)**.

Цель закалки - повышение твердости и прочности сталей за счет образования неравновесных закалочных структур.

В результате закалки подавляется распад аустенита на (Ф+Ц)-смесь и аустенит превращается **в мартенсит (М)**.

Мартенсит имеет не ОЦК-решетку, как феррит, а искаженную тетрагональную решетку (ОЦТ). Степень тетрагональности мартенсита определяется соотношением c/a ,

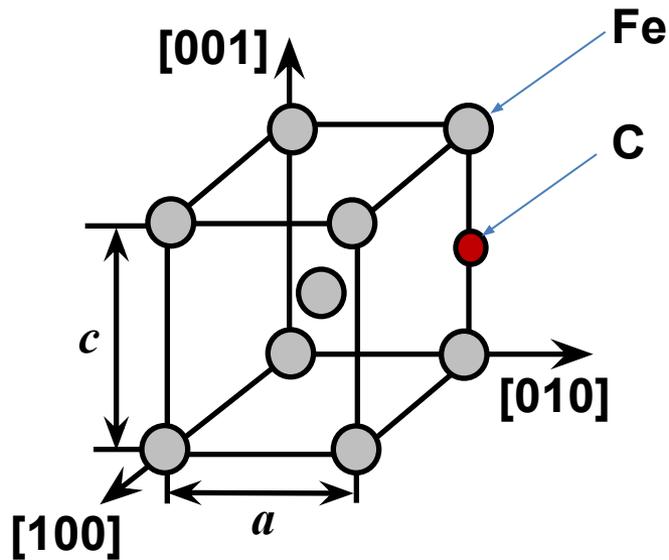
где a - наименьшее ребро,

c - наибольшее ребро искаженной кубической решетки мартенсита.

Степень тетрагональности (и твердость **М**) линейно увеличивается **с ростом содержания углерода** в стали до 0.8%.

Мартенситное превращение

При охлаждении нагретой под закалку стали со скоростью выше критической (для конструкционных сталей охлаждение в воду) вместо диффузионного превращения аустенита в перлит, происходит бездиффузионное мартенситное превращение.



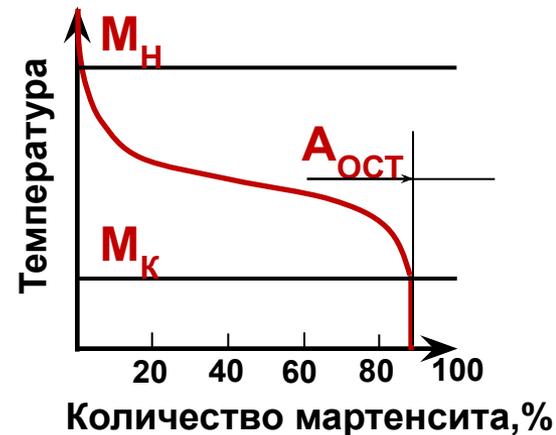
M_H и M_K – температуры начала и конца мартенситного превращения

A_{OCT} – остаточный аустенит

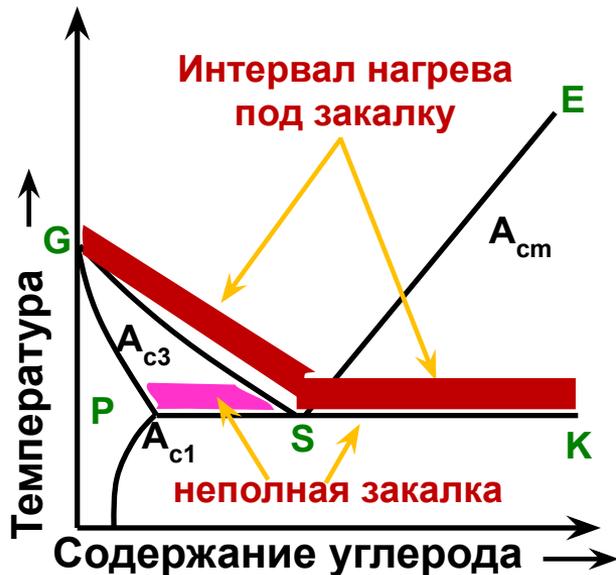
c/a – степень тетрагональности
решетки мартенсита

$$c/a = 1 + 0.046 \cdot C (\%)$$

Кривая мартенситного превращения



Закалка сталей



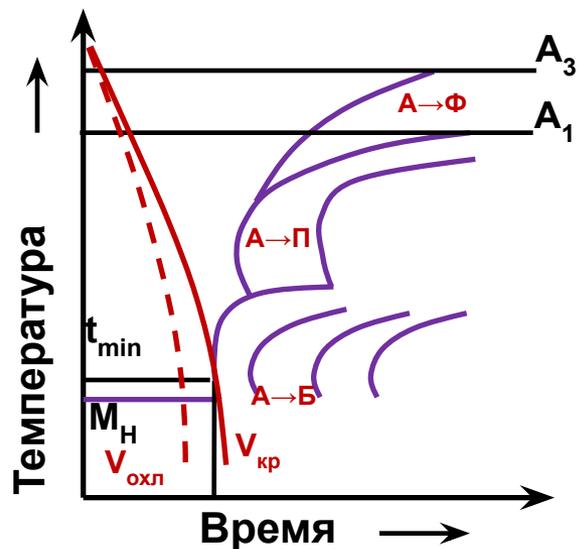
Температура нагрева сталей под закалку

-углеродистая доэвтектоидная

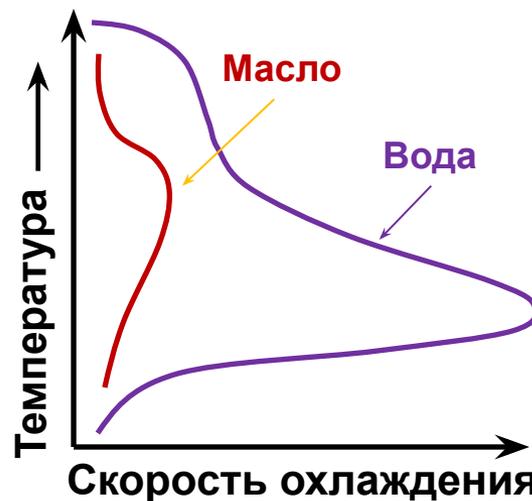
$$t_H = A_{c3} + (30-50^\circ\text{C})$$

-углеродистая заэвтектоидная

$$t_H = A_{c1} + (30-50^\circ\text{C})$$



Охлаждающая способность воды и масла



Основные превращения в сталях при термической обработке

- Превращение ферритно-карбидной структуры в аустенит при нагреве выше точки A_1
- Диффузионное (перлитное) превращение аустенита в ферритно-карбидную структуру при небольших переохлаждениях ниже точки A_1
- Бездиффузионное сдвиговое (мартенситное) превращение аустенита в мартенсит при больших переохлаждениях ниже точки A_1 .

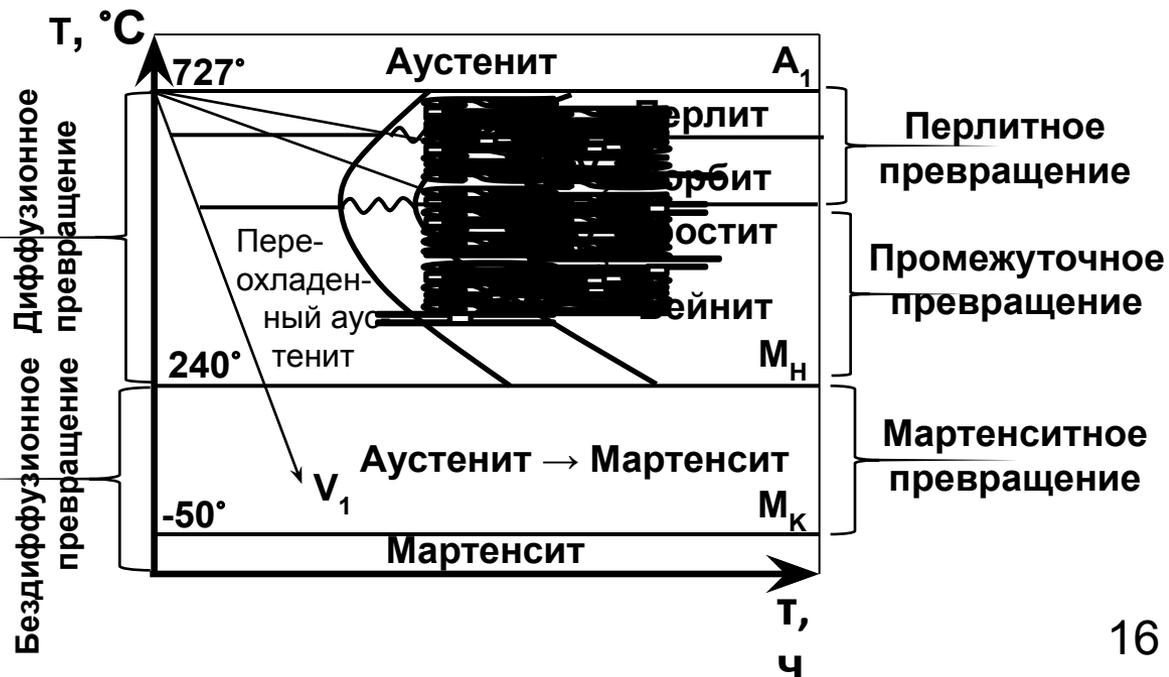
(**Мартенсит** – пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -Fe)

- Промежуточное (бейнитное) превращение аустенита в температурном интервале между

перлитным и мартенситным превращениями

- Превращение мартенсита в ферритно-карбидную структуру

при нагреве до температур ниже точки A_1



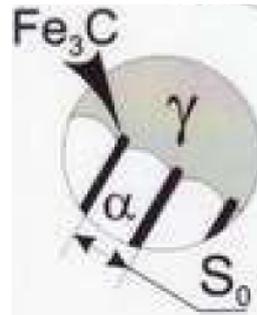
Основные превращения в сталях при термической обработке

Перлитная область в углеродистых сталях распространяется на интервал температур от точки A_1 до изгиба изотермической диаграммы ($\sim 550^\circ\text{C}$). При этих температурах происходит диффузионный распад аустенита с образованием структуры из феррита и цементита – **перлита**.

Промежуточное превращение протекает при температурах от изгиба кривой ($\sim 550^\circ\text{C}$) до точки M_n . Это превращение обладает рядом особенностей, присущих как перлитному (**диффузионному**), так и мартенситному (**бездиффузионному**) превращению. В результате превращения переохлажденного аустенита образуется **бейнит**.

Мартенситное превращение происходит по бездиффузионному механизму ниже точки M_n .

Свойства и строение продуктов превращения **аустенита** в перлитной области **зависят от температуры**, при которой происходил процесс его распада.



S_0 – межпластинчатое расстояние
Перлит ($700-650^\circ\text{C}$) $S_0=0.5-1.0$ мкм
Сорбит ($650-600^\circ\text{C}$) $S_0=0.2-0.4$ мкм
Троостит ($600-550^\circ\text{C}$) $S_0<0.1$ мкм

Основные превращения в сталях при термической обработке

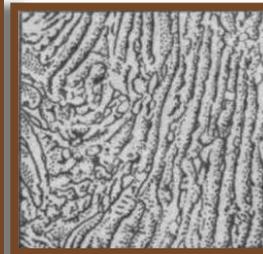
При высоких температурах, т. е. при малых степенях переохлаждения, получается достаточно грубая (легко дифференцируемая под микроскопом) смесь феррита и цементита. Эта смесь называется **перлитом**.

При более низких температурах и, следовательно, при больших степенях переохлаждения, дисперсность структур возрастает и твердость продуктов повышается. Такой более тонкого строения перлит получил название **сорбита**.

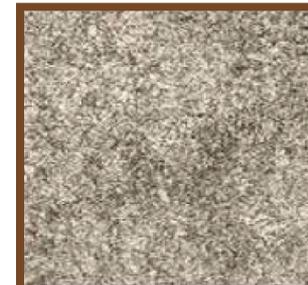
При еще более низкой температуре (что соответствует изгибу кривой) дисперсность продуктов еще более возрастает и дифференцировать под оптическим микроскопом отдельные составляющие ферритно-цементитной смеси становится почти невозможно, пластинчатое строение можно наблюдать лишь под электронным микроскопом. Такая структура называется **трооститом**.



Перлит



Сорбит



Троостит

Основные виды термической обработки сталей: отпуск

Отпуск - нагрев **закалённой** стали до температуры **ниже** фазовых превращений (ниже линии PSK) и последующее охлаждение в печи, воде или масле.

Отпуск является заключительной операцией термообработки.

Отпуск необходим для **снижения** вредного действия внутренних **напряжений в стали**, оставшихся после закалки, уменьшения её хрупкости, повышения вязкости, улучшения обрабатываемости резанием.

Отпуск **всегда** проводится **после закалки**. Он позволяет сформировать комплекс свойств, необходимый для многолетней надежной эксплуатации изделий.

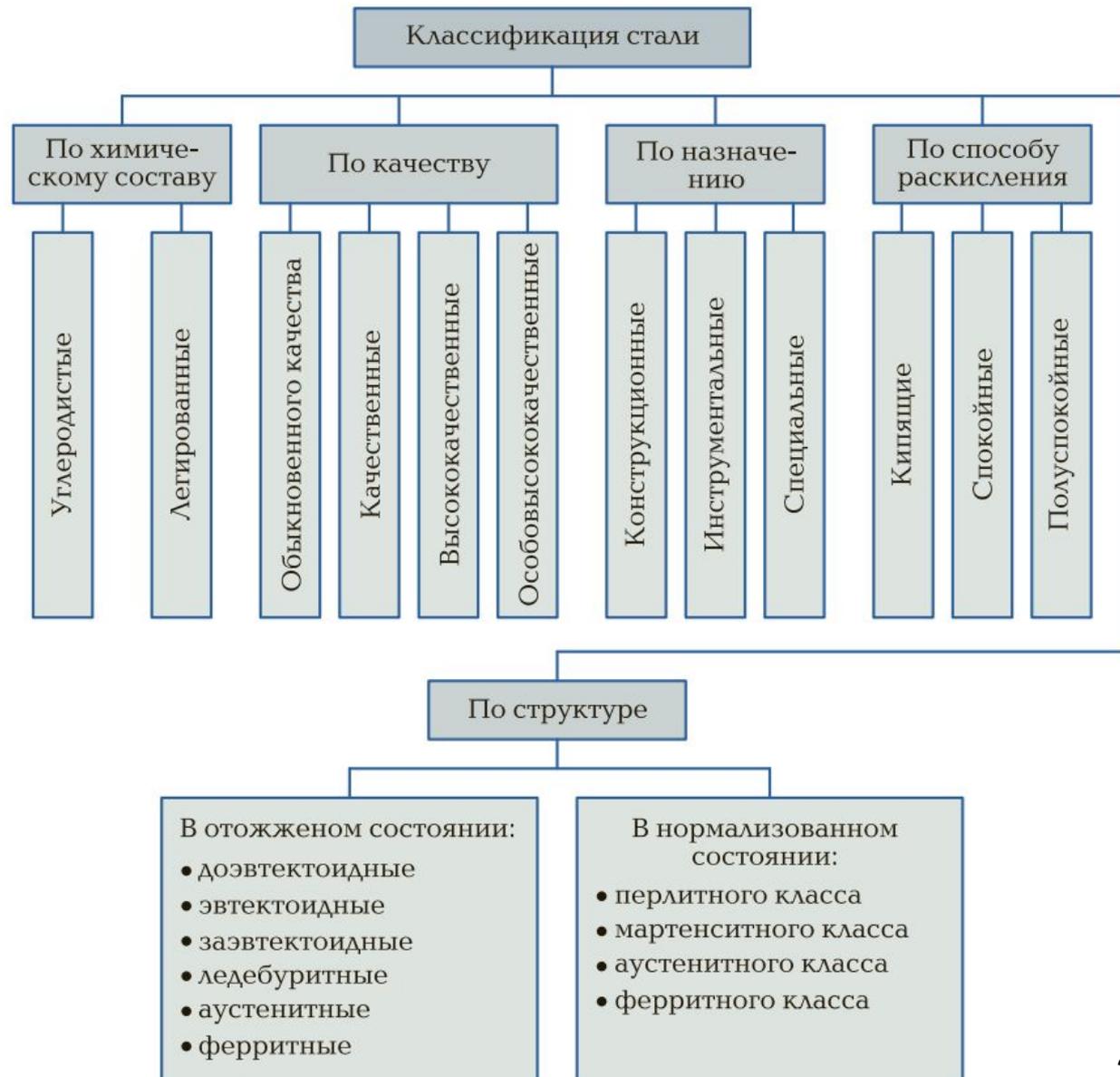
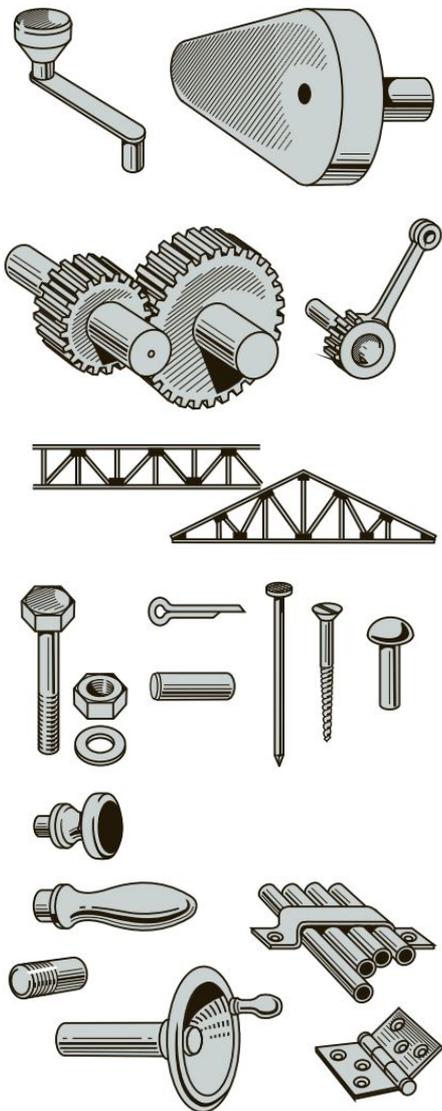
Виды отпуска сталей

В зависимости от температуры нагрева различают:

- **Низкий отпуск.** Нагрев до 150-200°С и медленное охлаждение в печи. При этом снижаются внутренние напряжения, но прочность и твердость остаются высокими (58-62 HRC). Применяется для режущего и мерительного инструмента.
- **Средний отпуск.** Нагрев до 350-500°С и медленное охлаждение в печи. Снимаются внутренние напряжения, твердость снижается (40-50 HRC). Этот отпуск обеспечивает высокий предел упругости и применяется после закалки рессор и пружин.
- **Высокий отпуск.** Нагрев до 550-680°С и охлаждение в масле. Обеспечивает высокий комплекс механических свойств (оптимальное соотношение прочности и пластичности, максимальная величина ударной вязкости). Применяется для деталей машин, подвергающихся динамическим и циклическим нагрузкам.
- **Улучшение.** Закалку в сочетании с высоким отпуском называют улучшением. Его назначение – измельчение структуры, повышение механических свойств и повышение обрабатываемости стали резанием.

Стали

Сталь – сплав железа с углеродом, в котором массовая доля углерода составляет до **2.14%**.



Общая классификация сталей

По химическому составу

• **Углеродистые стали** – в составе кроме железа и углерода содержатся постоянные примеси (0.3–0.8% **Mn**, до 0.6% **Si**, до 0.05% **S**, до 0.04% **P**), влияющие на свойства стали.

Углеродистые стали содержат в сумме до 2% всех легирующих элементов и примесей. Однако решающее влияние на формирование их структуры и свойств оказывает углерод.

Состав и свойства углеродистых сталей определяются стандартом **ГОСТ 380-2005**.

• **Легированные стали** – в состав для улучшения физико-химических и механических свойств специально вводят легирующие элементы (**Mn, Si, Ni, Cr, Mo, Co, W, V, Cu, Ti, Al**).

Полезными примесями являются марганец и кремний.

Марганец повышает прочность, не снижая пластичности, и резко снижает красноломкость стали, вызванную влиянием серы. Способствует уменьшению содержания сульфида железа FeS, так как образует с серой соединение сульфид марганца MnS.

Кремний, дегазируя металл, повышает плотность слитка. Кремний растворяется в феррите и повышает прочность стали, особенно повышается предел текучести, при этом наблюдается некоторое снижение пластичности.

Общая классификация сталей

Вредными примесями являются сера и фосфор.

Фосфор, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности и предел текучести, но снижает пластичность и вязкость. Располагаясь вблизи границ зерен, увеличивает температуру перехода в хрупкое состояние, вызывает хладноломкость (склонность растрескиваться и ломаться при холодной механической обработке). Повышение содержания фосфора на каждую 0.01% повышает порог хладноломкости на 20...25°C.

Сера попадает в сталь из чугуна. При взаимодействии с железом образует FeS, который, в свою очередь, дает с железом легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 988°C. При нагреве под прокатку или ковку эвтектика плавится, нарушаются связи между зернами. При деформации в местах расположения эвтектики возникают надрывы и трещины, заготовка разрушается – наблюдается явление **красноломкости** (повышение хрупкости при высоких температурах). Сера снижает механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность, а также предел выносливости. Она ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость. В зависимости от введенных элементов легированные стали делят на **хромистые, марганцовистые, хромоникелевые, хромокремнемарганцевые** и другие.

Общая классификация сталей

По содержанию углерода

▪ **Низкоуглеродистые стали** (**менее 0.3% C**) пластичны, хорошо свариваются и штампуются. Их производят в виде тонкого листа для изготовления деталей сложной формы методом холодной штамповки с глубокой вытяжкой.

Для увеличения поверхностной прочности изделия из них подвергают **цементации** (насыщение поверхностного слоя углеродом), при этом резко возрастает износостойкость изделий, а сердцевина остается пластичной и вязкой.

▪ **Среднеуглеродистые стали** (**0.3-0.7% C**) имеют повышенную прочность, но меньшую пластичность и вязкость. После упрочняющей термической обработки эти стали применяют для изготовления небольших валов, шатунов, зубчатых колес и деталей, испытывающих циклические нагрузки.

▪ **Высокоуглеродистые стали** (**свыше 0.7% и до 1.3% C**) используют для изготовления пружин, рессор и других изделий с высокой упругостью и износостойкостью.

Общая классификация сталей

По качеству (в зависимости от содержания в них вредных примесей):

- **Стали обыкновенного качества** (не более **0.07% P** и **0.06% S**);
 - **Качественные стали** (не более **0.035% P** и **0.035% S**);
 - **Высококачественные стали** (не более **0.025% P** и **0.025% S**);
 - **Особовысококачественные стали** (не более **0.025% P** и **0.015% S**).
- Стали обыкновенного качества выплавляют **только углеродистыми**, качественные и высококачественные – **углеродистыми и легированными**, особовысококачественные – **только легированными**.

По назначению:

- **Конструкционные** – предназначены для изготовления строительных конструкций, арматуры железобетонных конструкций, деталей машин и приборов.
- **Инструментальные** – стали для режущего и измерительного инструмента, штампов холодного и горячего деформирования.
- **Специальные стали** – жаростойкие, жаропрочные, коррозионностойкие (нержавеющие), износостойкие, электротехнические и другие.

Общая классификация сталей

По способу раскисления:

Раскисление – это процесс удаления из жидкого металла самой вредной примеси – кислорода, присутствующего в стали в виде FeO.

- **Спокойные стали** – раскисляют в процессе плавки **марганцем (до 0.8%)** и **кремнием (до 0.35%)**. Затвердевают без газовыделения.
- **Кипящие стали** – раскисляют только **марганцем (0.8%)**. Кислород взаимодействуя с углеродом выделяется в виде CO. Выделение пузырей CO создаёт впечатление кипения стали, с чем и связано это название.
- **Полуспокойные стали** – содержат **до 0.8% P** и **0.17% S** и занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

Легированные стали производят **спокойными**,
углеродистые - **спокойными**, **полуспокойными** и **кипящими**.

Маркировка сталей

Углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-94)

Маркировка: буквы Ст и цифры 0, 1, 2...6, определяющие условный номер марки

В конце марки указывается **способ раскисления:**

кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная

По гарантиям при поставке существует три группы сталей: **А, Б и В**. Для сталей группы А при поставке гарантируются **механические свойства**, в обозначении индекс группы А не указывается. Для сталей группы Б гарантируется **химический состав**. Для сталей группы В при поставке гарантируются и **механические свойства, и химический состав**

Буква Г обозначает сталь с повышенным содержанием марганца

В **Ст** **3** **Г** **сп**

Группа В

Сталь

Номер 3 (содержание углерода 0.14-0.22%)

Повышенное содержание марганца

Спокойная

Б **Ст** **2** **пс**

Группа Б

Сталь

Номер 2 (содержание углерода 0.09-0.15%)

Полуспокойная

Свойства сталей

Область применения и механические свойства углеродистых сталей обыкновенного качества

Марка стали	Механические свойства			Массовая доля углерода, %	Назначение
	σ_T , МПа, *	σ_B , МПа	δ_5 , %, *		
Ст 0 Ст1кп	- 195	≥ 300 305-390	18 35	≤ 0.23 0.06-0.12	Листовой и сортовой прокат для строительных конструкций
Ст1пс Ст1сп	205	315-410	34	0.06-0.12	Ограждения, арматура, анкерные болты, сварные неотъемлемые соединения
Ст2пс Ст2сп	225	335-430	32	0.09-0.15	Заклёпки, листы, трубы неотъемлемые, топочные устройства.
Ст3сп Ст3пс Ст3кп	245 235	370-480 360-460	23 24	0.14-0.22	Детали и нормали, воспринимающие небольшие нагрузки (арматура, болты, гайки, тяги, оси и др.)
Ст4кп Ст4пс Ст4сп	255 265	400-510 410-530	22 21	0.18-0.27	Для строительных и других конструкций
Примечание – Массовая доля других элементов в спокойной стали Mn-0.25 (Ст1) – 0.8 (Ст6) %; Si от 0.05 (Ст1) до 0.30 (Ст6) %; P не более 0.04 %, S не более 0.05 %; * - не менее, при толщине проката ≤ 20 мм					

σ_T - предел текучести, МПа;

σ_B - предел прочности (временное сопротивление), МПа;

δ_5 - относительное удлинение коротких образцов, %

Маркировка сталей

Углеродистые качественные стали (ГОСТ 1050-74)

Маркировка: буквы Сталь и две цифры, указывающие среднее содержание углерода в сотых долях – 08, 10, 15, ...70

Качество определяется содержанием вредных примесей - серы и фосфора не более 0,035%

Сталь марки 10 (спокойная)

10

Среднее содержание углерода 0.1%

Сталь марки 08пс

08 **пс**

Среднее содержание углерода 0.08%
Полуспокойная

Свойства сталей

Область применения и механические свойства низкоуглеродистых качественных сталей

Марка стали	Массовая доля углерода, %	Назначение	Механические свойства, не менее			
			σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	НВ, не более
08	0.05-0.12	Для холодной штамповки различных изделий. Без термической обработки в горячекатаном состоянии их используют для шайб, прокладок, кожухов и других деталей, изготавливаемых холодной деформацией и сваркой	320	196	33	225
10	0.07-0.14		330	205	31	
15	0.12-0.19		370	225	27	
20	0.17-0.24		410	245	25	
25	0.22-0.30		450	275	23	
Примечание – Массовая доля Si – 0.17-0.37 %; Mn – 0.35-0.65 % (сталь марок 08-20); Cr не более 0.10 % (сталь 08); 0.15 % (сталь 10); 0.25 % (сталь 15, 20, 25); 0.50-0.80 % (сталь 25)						

Маркировка сталей

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435-74)

Маркировка: буква У и число, показывающее среднее содержание углерода в десятых долях %

Буква А в конце маркировки (**У10А**) показывает, что данная сталь **высококачественная**, т. е. в ней содержится меньше серы и фосфора

У 7

Инструментальная углеродистая сталь
Среднее содержание углерода 0.7%

У 13 А

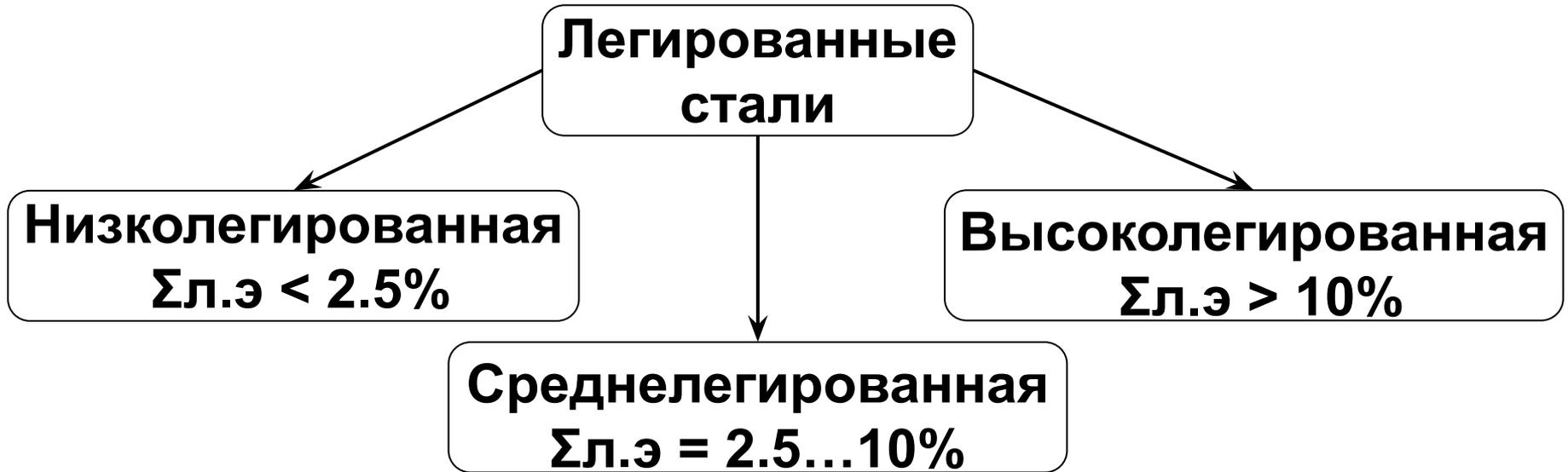
Инструментальная углеродистая сталь
Среднее содержание углерода 1.3%
Высококачественная

Свойства сталей

Область применения и механические свойства углеродистых инструментальных сталей

Марка стали	Массовая доля углерода, %	Назначение	Механические свойства, не менее			
			σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	НВ, не более
У7, У7А	0.65-0.74	Инструмент: слесарно-монтажный – молотки, кувалды, отвертки, бородки, кернеры, комбинированные плоскогубцы, кусачки, кузнечные штампы	630	390	21	187
У8, У8А	0.75-0.84		600	-	-	
У9, У9А	0.85-0.94			-	-	-
У10, У10А	0.95-1.04	Инструмент: штампы для холодной штамповки, калибры простой формы и пониженных классов точности, напильники, шаберы, холодно-высадочные пуансоны, штемпели	-	-	23	-
У11, У11А	1.05-1.14		-	-	-	-
У12, У12А	1.15-1.24		600-700	350-450	28	212
У13, У13А	1.25-1.35	Инструмент, обладающий повышенной износостойкостью при умеренных нагрузках – напильники, бритвы, хирургический инструмент, шаберы, граверы	-	-	-	-

Маркировка сталей



Легированные стали имеют **буквенно-цифровую** маркировку

Углерод определяется числом в начале марки – если число двузначное, то в сотых %, однозначное – десятых %

Буква определяет легирующий элемент (см. таблицу), число после буквы количество элемента в целых %

При содержании **элемента меньше 1%** число не ставится

V, W, Ti, Nb, B, N содержатся в сотых долях и маркируются

А	Б	В	Г	Д	К	Н	М	Ю	Р	С	Т	Х	Ф
N	Nb	W	Mn	Cu	Co	Ni	Mo	Al	B	Si	Ti	Cr	V

Маркировка сталей

Легированные стали

Буква А в конце маркировки показывает, что сталь **высококачественная**

Буква А в начале маркировки показывает, что сталь автоматная

Буква Ш в конце маркировки показывает, что сталь **особовысококачественная**

Буква Ш в начале маркировки показывает, что сталь **шарикоподшипниковая**

Буква Р в маркировке показывает, что сталь **быстрорежущая**

12 X 18 H 10 T

Содержание углерода – 0.12%

Хром

Содержание хрома – 18%

Никель

Содержание никеля -10%

Титан (содержание менее 1%)

Маркировка сталей

Легированные стали

4 X 12 Н 8 Г 8 М Ф Б

Содержание углерода – 0.04%

Хром

Содержание хрома – 12%

Никель

Содержание никеля – 8%

Марганец

Содержание марганца – 8%

Молибден

Ванадий

Ниобий

12 X 2 Н 4 А

Содержание углерода – 0.12%

Хром

Содержание хрома – 2%

Никель

Содержание никеля – 4%

Высококачественная

18 X Г Т

Содержание углерода – 0.18%

Содержание хрома – 1-1.3%

Содержание марганца – 0.8-1.1%

Содержание титана – 0.03-0.09%

Влияние легирующих элементов на свойства стали

Элемент	Прочность, σ_B	Пластичность	Стойкость к коррозии	Жаропрочность
Mn	Повышает	Мало влияет*	Практически не изменяет	Практически не изменяет
Si	Повышает	В массовой доле более 2,5 % резко снижает	Повышает	Несколько повышает
Cr	Повышает	Незначительно снижает	Повышает	Повышает
Ni	Повышает	**	Повышает	Повышает
Mo	Повышает	***	Понижает	Значительно повышает
Ti	Мало влияет	Несколько повышает вязкость	Повышает	****

* - При содержании Mn до 2% пластичность низко и среднеуглеродистой стали не снижает, в высокоуглеродистой стали снижает;

** - Пластичность незначительно снижает в низко и среднеуглеродистых сталях перлитного класса и сильно снижает в сталях мартенситного класса. Ударная вязкость конструкционных никелевых сталей перлитного класса после термической обработки выше, чем у других сталей;

*** - В сталях перлитного класса понижает. Однако после термической обработки это снижение очень мало, а ударная вязкость выше, чем углеродистой и некоторых других сталей при равной прочности;

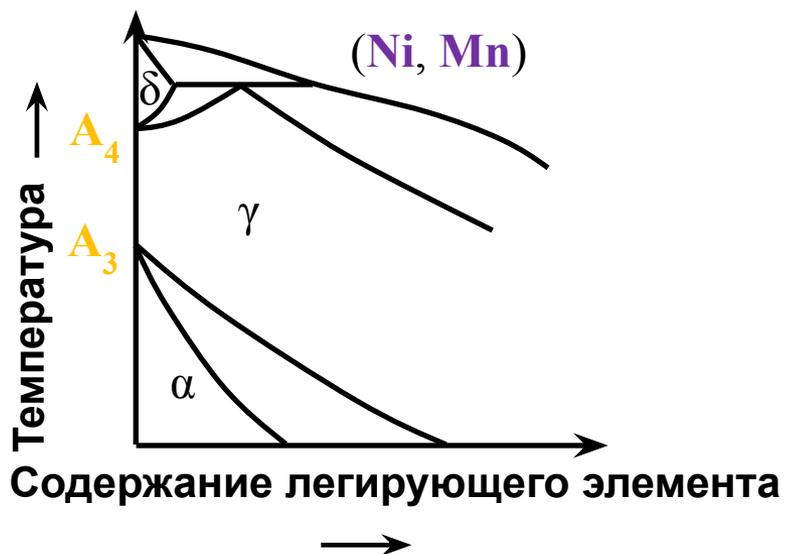
**** - Повышает, но оказывается полезным в сталях сложного состава.

Взаимодействие легирующих элементов с железом

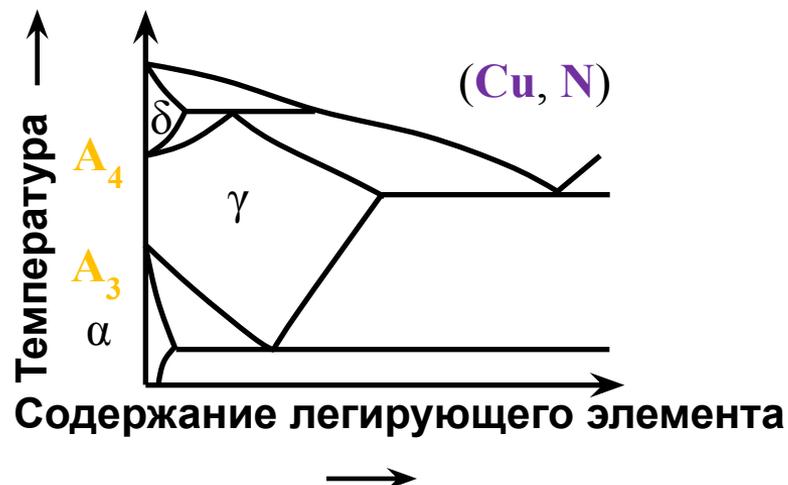
Первая группа

Легирующие элементы, расширяющие γ -область (понижают точку A_3 и повышают точку A_4 железа)

а) Элементы, неограниченно растворимые в γ -железе



б) Элементы, образующие с железом сплавы, в которых гомогенная область ограничивается гетерогенной областью



Взаимодействие легирующих элементов с железом

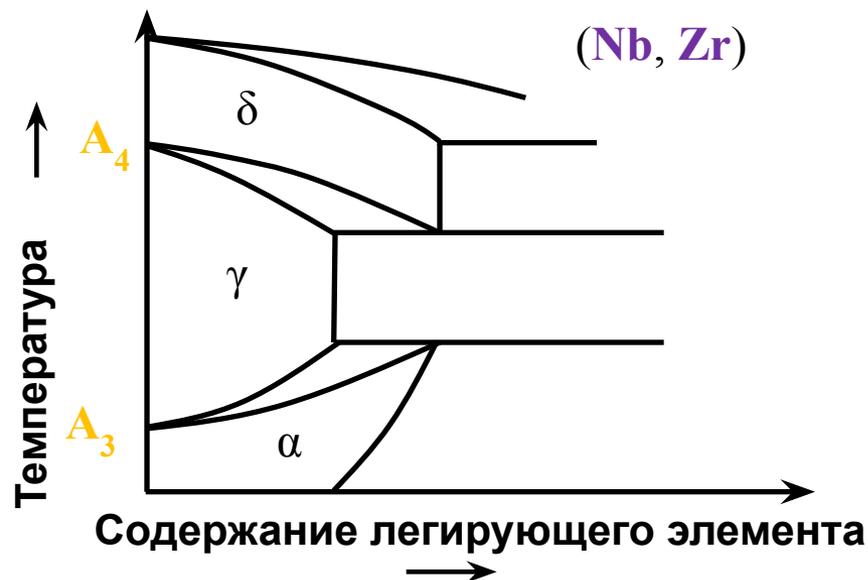
Вторая группа

Легирующие элементы, сужающие γ -область (повышают точку A_3 и понижают точку A_4 железа)

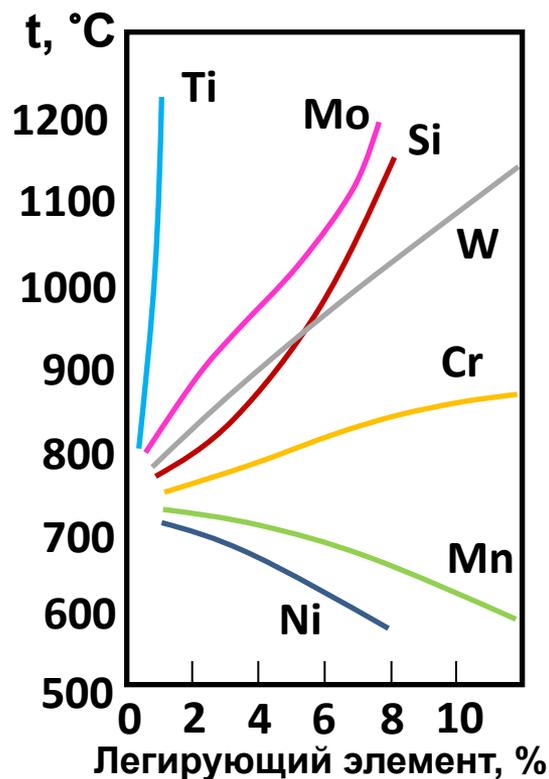
а) Элементы, полностью замыкающие γ -область и образующие гомогенную α -область



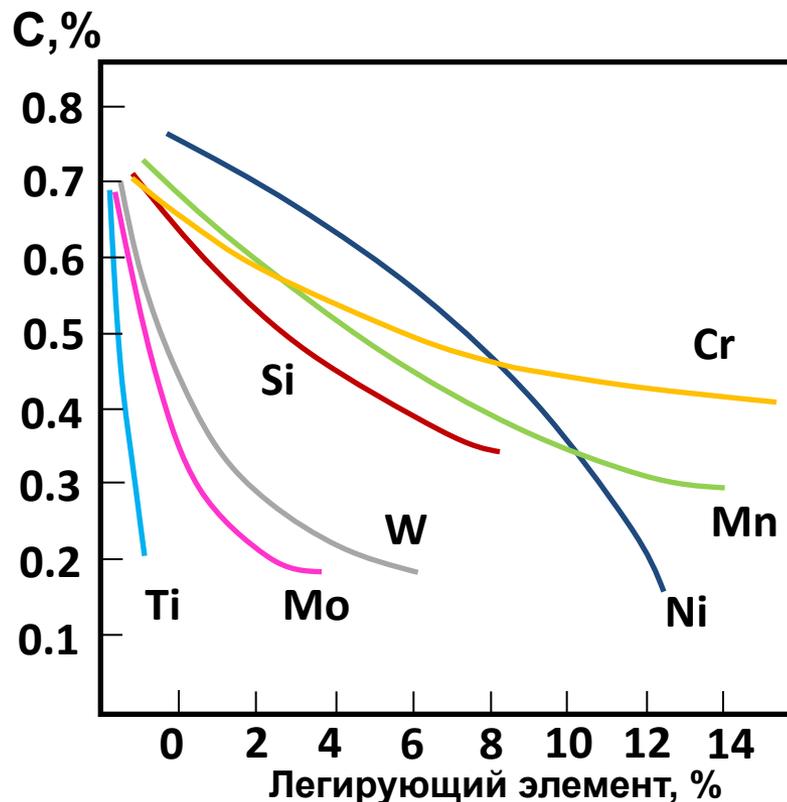
б) Элементы, образующие с железом сплавы, в которых γ -область ограничивается гетерогенной областью



Легирующие элементы влияют на температуры фазовых превращений сталей при нагреве и на состав точек S и E диаграммы



Влияние легирующих элементов на температуру A_1



Влияние легирующих элементов на содержание C в эвтектоиде

Влияние легирующих элементов на критические точки стали

Взаимодействие легирующих элементов с железом

Первая группа

Некарбидообразующие элементы:

Al, Si, Ni, Co, Cu

Вторая группа

Карбидообразующие элементы:

Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Zr, Ti

карбидообразующая способность →

Элементы Mn, Cr, Mo, W, растворяясь в цементите, образуют легированный карбид $(Fe, M)_3C$ или M_3C

Специальные карбиды:

карбиды хрома $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3

карбиды молибдена и вольфрама MoC, WC, Mo_2C , W_2C или MC, M_2C

карбиды ванадия, ниобия и титана VC, NbC, TiC или MC

Общие правила определения количества элементов в стали по ее маркировке

- Буквы Ст в начале марки указывают, что химический состав по марке не определяется: **Ст3**.

Определение содержания углерода в стали по маркировке

- Две цифры в начале марки показывают сотые доли процента углерода: **50**.
- Одна цифра в начале марки или цифры после начальной буквы У показывают десятые доли процента углерода: **5ХНСВ, У13**.
- Отсутствие цифр в начале марки (кроме марок, начинающихся с буквы У) указывает на наличие около одного процента углерода: **Х**.

Определение содержания легирующих элементов в стали по маркировке

- Отсутствие цифр после букв легирующих элементов указывает на наличие около одного процента легирующих элементов: **40ХС**.
- Цифры после букв легирующих элементов показывают целые единицы процента легирующих элементов: **Х13**.

Расшифровка марок сталей

Примеры чтения маркировок сталей

- **45** – сталь **углеродистая** (нет букв легирующих элементов), **конструкционная** (марка начинается с двух цифр), **качественная** (нет букв Ст в начале, а в конце нет буквы А). В стали примерно **0.45%** углерода (две цифры в начале марки).
- **У8А** – сталь **углеродистая** (нет букв легирующих элементов), **инструментальная** (в начале марки нет цифр), **высококачественная** (в конце марки буква А). В стали примерно **0.8%** углерода (одна цифра в начале марки).
- **30ХГС** – сталь **легированная** (есть буквы легирующих элементов), **конструкционная** (марка начинается с двух цифр), **качественная** (в начале нет букв Ст, а в конце нет буквы А). В стали примерно **0.3%** углерода (две цифры в начале марки), до **1%** хрома (Х), марганца (Г), кремния (С), на что указывает отсутствие цифр после букв легирующих элементов.
- **Ст5** – сталь **углеродистая** (нет букв легирующих элементов), **конструкционная** (марка начинается с букв Ст), **обыкновенного качества** (в начале есть буквы Ст). Химический состав по марке не определяется (буквы Ст в начале марки).

Международная маркировка сталей

В ряде стран разработаны оригинальные принципы маркировки сталей в соответствии с **национальными стандартами**.

Стали, выпускаемые в США по стандартам **ASTM** (American Society for Testing and Materials) и **SAE** (Society Automotive Engineers), имеют цифровую систему маркировки, в которую иногда добавляют буквы.

Стали производства Германии имеют буквенно-цифровую систему маркировки по степени легирования и режимам термической обработки. Национальный стандарт Германии **DIN** (Deutsche Industrienorm) предполагает маркировку сталей двумя способами.

Стали Японии маркируют по национальным стандартам **JIS** (Japanese Industrial Standard) с помощью нескольких букв и цифр.

Примеры международной маркировки сталей

Европа (EN)	Германия (DIN)	США (AISI)	Япония (JIS)	СНГ (GOST)
1.4000	X6Cr13	410S	SUS 410 S	08X13
1.4006	X12CrN13	410	SUS 410	12X13
1.4021	X20Cr13	(420)	SUS 420 J1	20X13
1.4028	X30Cr13	(420)	SUS 420 J2	30X13
1.4031	X39Cr13		SUS 420 J2	40X13
1.4034	X46Cr13	(420)		40X13
1.4016	X6Cr17	430	SUS 430	12X17
1.4510	X3CrTi17	439	SUS 430 LX	08X17T
1.4301	X5CrNi18-10	304	SUS 304	08X18H10
1.4303	X4CrNi18-12	(305)	SUS 305	12X18H12
1.4306	X2CrNi19-11	304 L	SUS 304 L	03X18H11
1.4541	X6CrNiTi18-10	321	SUS 321	08X18H10T
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316 Ti	SUS 316 Ti	10X17H13M2T

Чугуны

Основные положения

Чугуны – сплавы железа с углеродом, содержащие **от 2.14% до 6.67%** углерода.

Чугун содержит те же примеси, что и углеродистая сталь - **Mn, Si, S** и **P**, но в большем количестве. Эти примеси существенно влияют на условия **графитизации** и, следовательно, на структуру и свойства чугуна.

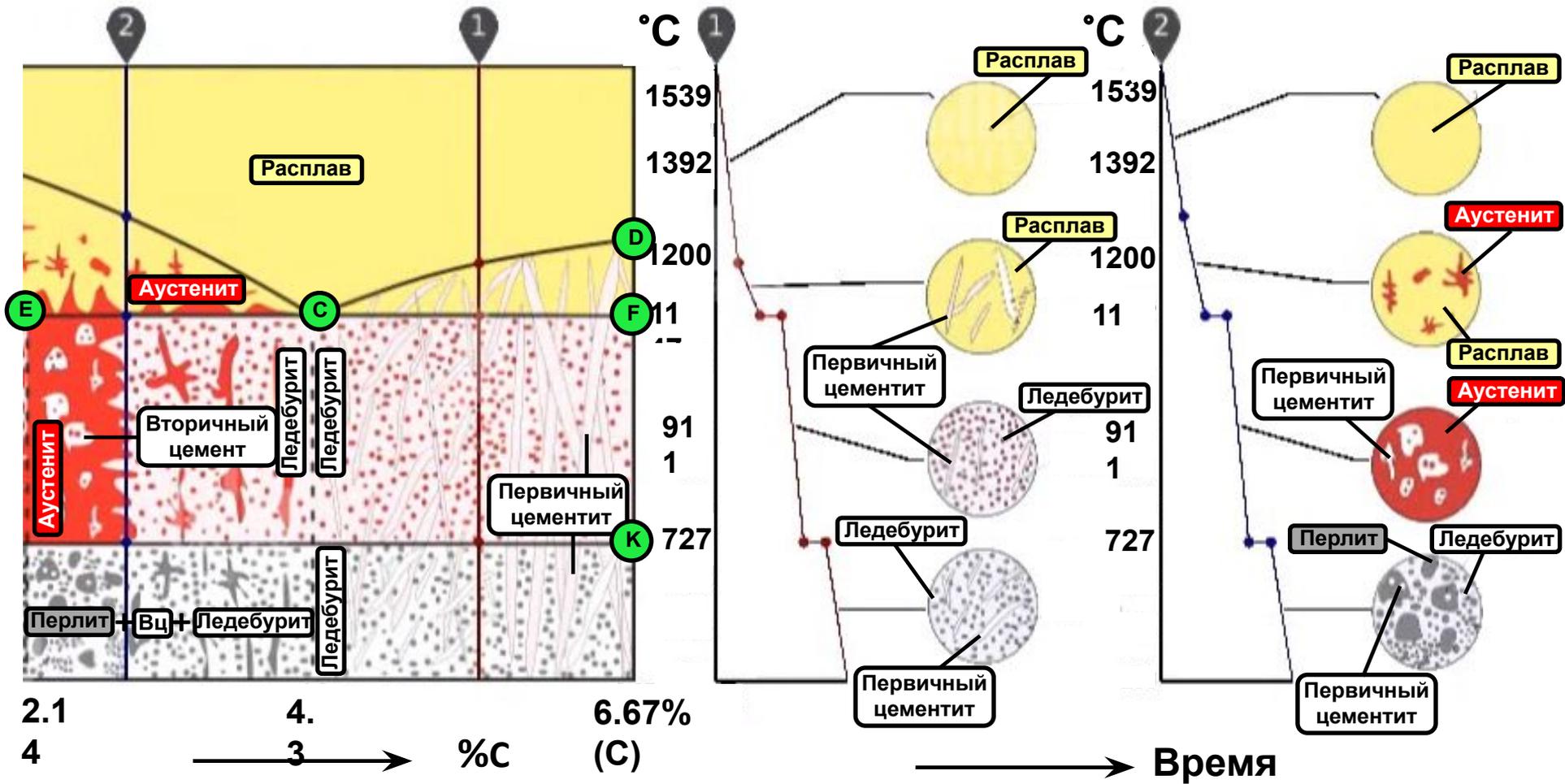
В сравнении со сталью:

- имеют более высокое содержание углерода;
- заканчивают кристаллизацию образованием эвтектики;
- обладают низкой способностью к пластической деформации;
- обладают высокими литейными свойствами.



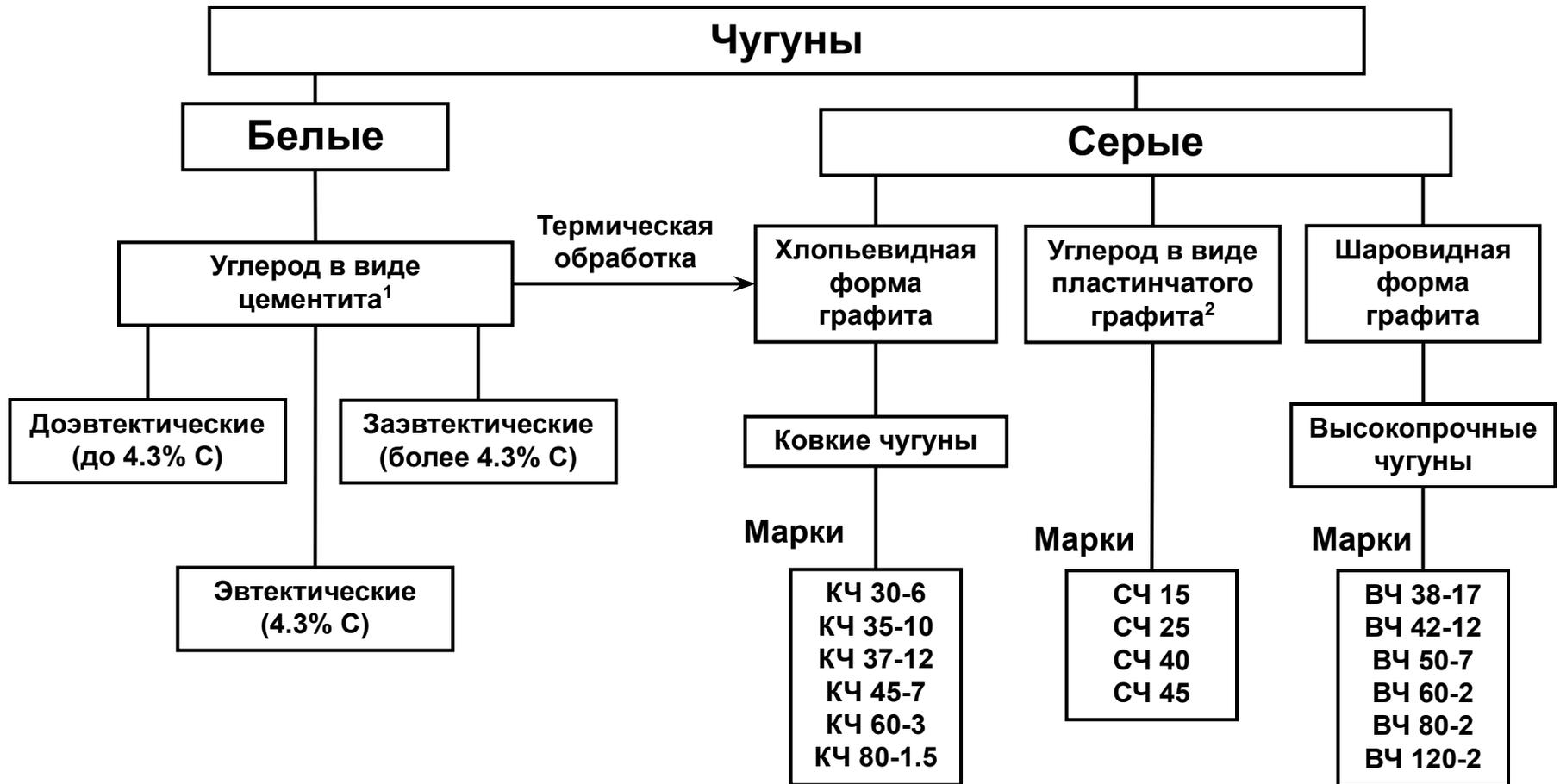
Получил широкое распространение в качестве литейного материала благодаря **хорошей жидкотекучести** и **малой усадке**, что позволяет получать качественные отливки сложной формы даже при малой толщине стенок.

Диаграмма состояния Fe-Fe₃C



Виды чугунов

В зависимости от формы выделения углерода в чугуне различают:



¹Цементит – карбид железа F_3C (сплав железа с углеродом)

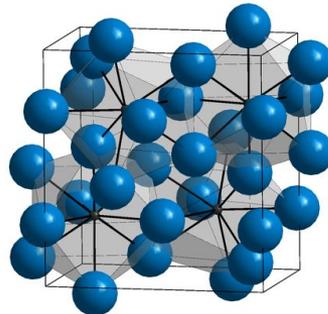
²Графит – углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии.

Белый чугун

Белый чугун – получил такое название благодаря цвету излома и характерному блеску. В нем углерод химически связан с железом в виде **цементита (Fe_3C)**. Белый чугун обладает высокой твёрдостью, хрупкостью и плохой обрабатываемостью резанием. Основная масса белого чугуна не подвергается механической переработке и идёт на переделку в **сталь** или в **ковкий чугун**.



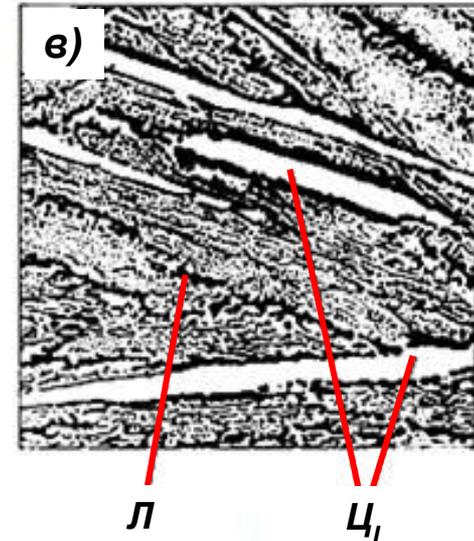
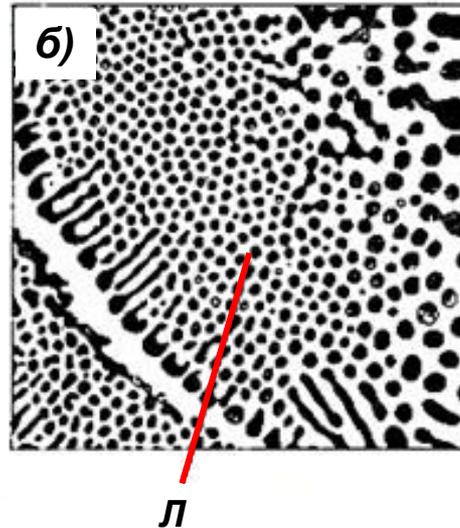
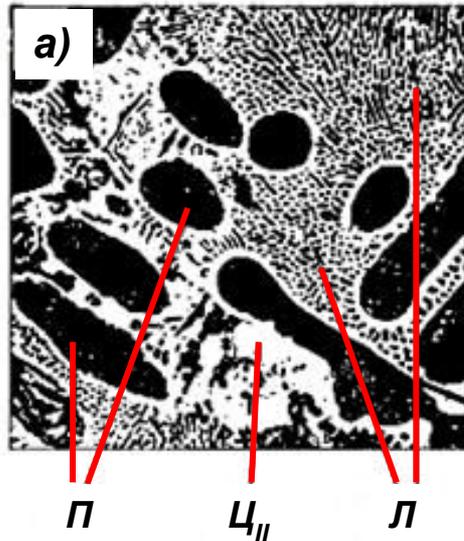
Цементит (на диаграмме Ц) – химическое соединение углерода с железом (карбид железа Fe_3C). Является структурной составляющей железоуглеродистого сплава, содержащей 6.67% углерода. Имеет сложную ромбическую решётку. Цементит очень твёрд (НВ 800) и хрупок ($\alpha_H = 0$).



Белый чугун

По структуре белые чугуны делятся на:

- *Доэвтектические (а)* – концентрация углерода **не превышает 4.3%** (структура: перлит + цементит вторичный + ледебурит превращенный);
- *Эвтектические (б)* – концентрация углерода **составляет 4.3%** (структура: ледебурит превращенный);
- *Заэвтектические (в)* – концентрация углерода **превышает 4.3%** (структура: цементит первичный + ледебурит превращенный).



Серый чугун

Серый чугун – как и белый чугун получил название благодаря цвету излома. В нем углерод **находится в свободном состоянии в виде графитовых включений**, а содержание углерода в связанном состоянии в виде цементита составляет не более 0.8 %. Серый чугун отличается от белого меньшей твёрдостью и хрупкостью, а также хорошей обрабатываемостью резанием.

По химическому составу серые чугуны разделяют на обычные (**нелегированные**) и **легированные**. По структуре металлической основы серый чугун может быть ферритным, перлитным или перлитно-ферритным.

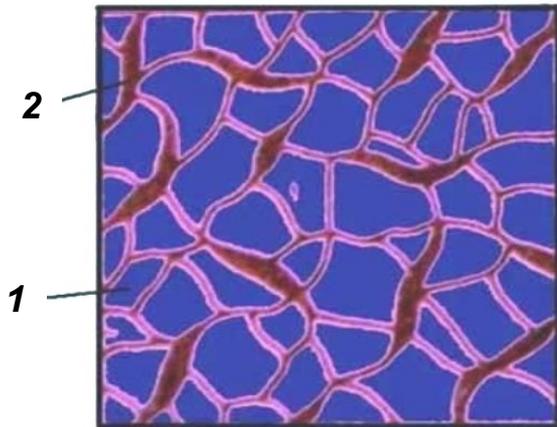
Для повышения механических свойств производится модифицирование серого чугуна путем добавления алюминия или кальция.

Состав серых чугунов	
– углерод (C) 2.5-3.6%	– фосфор (P) 0.02-0.4%
– кремний (Si) 1.1-2.9%	– сера (S) 0.02-0.15%
– марганец (Mn) 0.2-1.4%	– хром (Cr) 0.15-0.3%
– никель (Ni) до 0.5%	

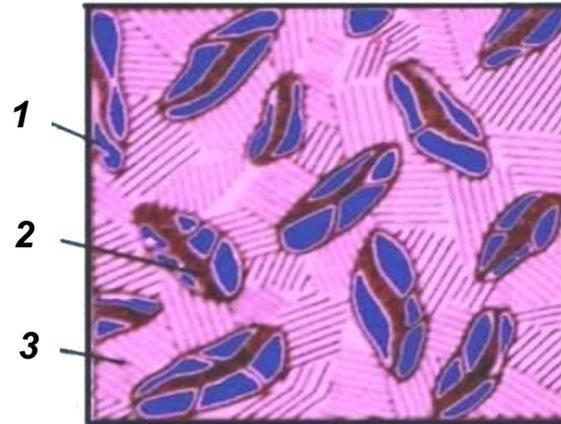
Серый чугун

Микроструктура серого чугуна:

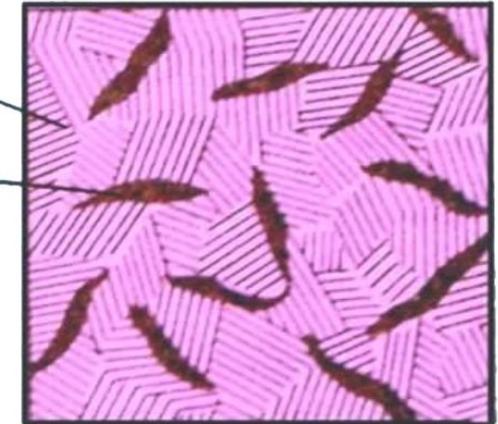
1 – феррит; 2 – пластинчатый графит; 3 – перлит



ферритный



перлитно-ферритный



перлитный

Феррит (на диаграмме Ф) – твердый раствор углерода в α -железе с предельной концентрацией углерода 0.02% при температуре 727°C. Феррит имеет малую твердость и высокую пластичность.

Перлит (на диаграмме П) – механическая смесь (эвтектоид) феррита и цементита, образующаяся при эвтектоидном распаде аустенита (0.8% С). Обладает повышенными прочностью и твердостью.

Маркировка серых чугунов

ГОСТ 1412-85 предусматривает следующие серого чугуна: СЧ 10, СЧ 15, СЧ 20, СЧ 25, СЧ 30, СЧ 35.

Химический состав серых чугунов колеблется в следующих пределах: 3.2-3.8% углерода, 1-5% кремния, 0.5-0.8% марганца, 0.2-0.4% фосфора, до 0.12% серы. Иногда в чугуне присутствуют в небольшом количестве медь, никель, хром, которые попадают из руды.

СЧ 18 Серый чугун
Предел прочности на растяжение (кгс/мм²)

Марки чугуна	Прочность при растяжении σ_B , МПа (кгс/мм ²)	Углерод	Кремний	Марганец	Фосфор	Сера
					Не более	
СЧ 10	100 (10)	3.5-3.7	2.2-2.6	0.5-0.8	0.3	0.15
СЧ 15	150 (15)	3.5-3.7	2.0-2.4	0.5-0.8	0.2	0.15
СЧ 20	200 (20)	3.3-3.5	1.4-2.4	0.7-1.0	0.2	0.15
СЧ 25	250 (25)	3.2-3.4	1.4-2.2	0.7-1.0	0.2	0.15
СЧ 30	300 (30)	3.0-3.2	1.3-1.9	0.7-1.0	0.2	0.12
СЧ 35	350 (35)	2.9-3.0	1.2-1.5	0.7-1.1	0.2	0.12

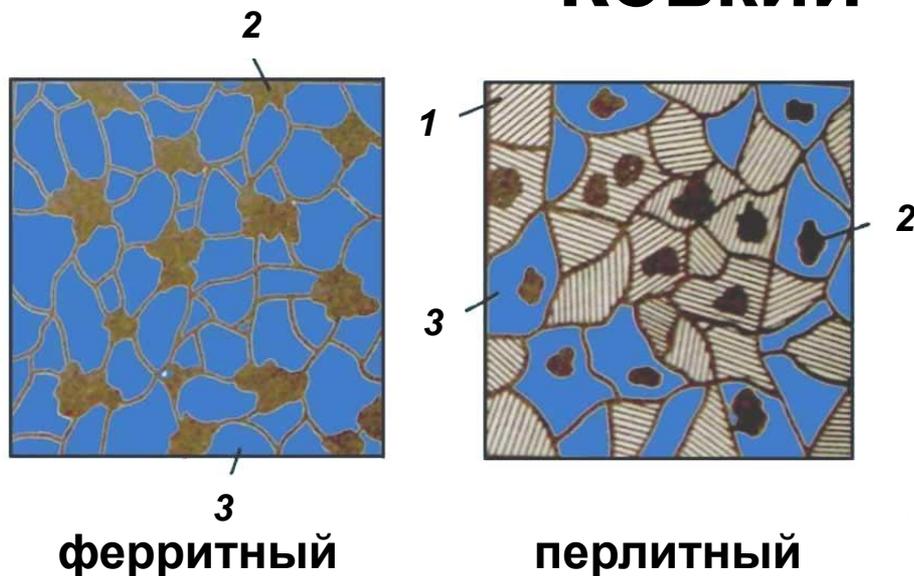
Ковкий чугун

Ковкие чугуны получают из белых чугунов путем термической обработки (**отжига**), при которой углерод переходит в свободное состояние в виде **хлопьевидного графита**, который также может называться **графит отжига**. Такой графит в отличие от пластинчатого меньше снижает механические свойства металлической основы, поэтому ковкие чугуны обладают более высокими прочностью и пластичностью по сравнению с серыми.

По структуре металлической основы, которая определяется режимом отжига, ковкие чугуны бывают **ферритными** или **перлитными**.

Состав ковких чугунов	
– углерод (C) 2.2-3.1%	– фосфор (P) до 0.18%
– кремний (Si) 0.7-1.5%	– сера (S) 0.12%
– марганец (Mn) 0.3-0.6%	– хром (Cr) 0.2%

Ковкий чугун



Микроструктура ковкого чугуна:

1 – перлит; 2 – графит отжига;
3 – феррит.

Феррит (на диаграмме Ф) – твердый раствор углерода в α -железе с предельной концентрацией углерода 0.02% при температуре 727°C. Феррит имеет малую твердость и высокую пластичность.

Перлит (на диаграмме П) – механическая смесь (эвтектоид) феррита и цементита, образующаяся при эвтектоидном распаде аустенита (0.8% С). Обладает повышенными прочностью и твердостью.

Маркировка ковких чугунов

ГОСТ 1215-79 устанавливает 11 марок ковкого чугуна: КЧ 30-6; КЧ 33-8; КЧ 35-10; КЧ 37-12 ферритного класса, характеризующегося ферритной или ферритно-перлитной структурой металлической основы и КЧ 45-7; КЧ 50-5; КЧ 55-4; КЧ 60-3; КЧ 65-3; КЧ 70-2; КЧ 80-1.5 перлитного класса (в основном с перлитной структурой металлической основы).

КЧ **30** - **6**

Ковкий чугун

Предел прочности на растяжение (кгс/мм²)

Относительное удлинение (%)

Марки чугуна	Углерод	Кремний	Марганец	Фосфор	Сера
				Не более	
КЧ 30-6	2.6-2.9	1.0-1.6	0.4-0.6	0.18	0.2
КЧ 37-12	2.4-2.7	1.2-1.4	0.2-0.4	0.12	0.06
КЧ 45-7	2.5-2.8	1.1-1.3	0.3-1.0	0.1	0.2
КЧ 60-3	2.5-2.8	1.1-1.3	0.3-1.0	0.1	0.2
КЧ 80-1.5	2.4-2.7	1.2-1.4	0.3-1.0	0.1	0.06

Высокопрочный чугун

Высокопрочными называют чугуны, в которых **графит имеет шаровидную форму**. Их получают модифицированием сплавом магния с никелем, который вводят в жидкий чугун.

По структуре металлической основы высокопрочный чугун может быть ферритным, перлитным или перлитно-ферритным

Высокопрочный чугун применяется в различных отраслях техники при изготовлении прокатных станов, кузнечно-прессового оборудования, деталей турбин и других ответственных деталей.

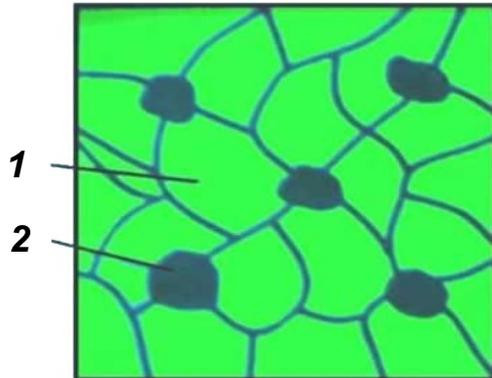
Состав высокопрочных чугунов	
– углерод (C) 2.7-3.6%	– фосфор (P) до 0.1%
– кремний (Si) 1.0-3.8%	– сера (S) до 0.14%
– марганец (Mn) 0.4-0.9%	– хром (Cr) до 0.1%
– никель (Ni) 0.2-0.8%	

(Магний уходит в шлак)

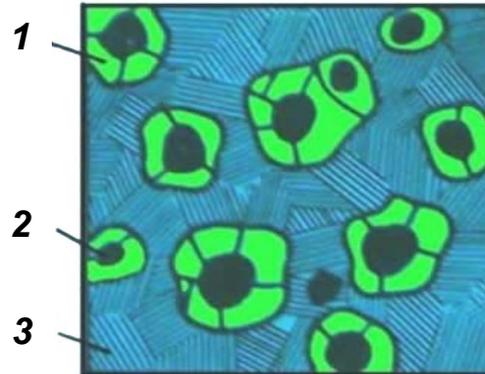
Высокопрочный чугун

Микроструктура высокопрочного чугуна:

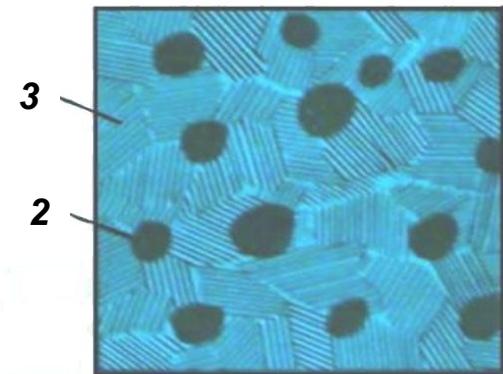
1 – феррит; 2 – шаровой графит; 3 – перлит.



ферритный



перлитно-ферритный



перлитный

Феррит (на диаграмме Ф) – твердый раствор углерода в α -железе с предельной концентрацией углерода 0.02% при температуре 727°C. Феррит имеет малую твердость и высокую пластичность.

Перлит (на диаграмме П) – механическая смесь (эвтектоид) феррита и цементита, образующаяся при эвтектоидном распаде аустенита (0.8% С). Обладает повышенными прочностью и твердостью.

Маркировка высокопрочных чугунов

ГОСТ 7293-85 предусматривает следующие марки чугуна с шаровидным графитом (серого чугуна): ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100.

ВЧ 35

Высокопрочный чугун

Предел прочности на растяжение (кгс/мм²)

Марки чугуна	Углерод	Кремний	Марганец	Фосфор	Сера	Хром	Другие
				Не более			
ВЧ 35	3.3-3.8	1.9-2.9	0.2-0.6	0.1	0.2	0.05	-
ВЧ 40	3.3-3.8	1.9-2.9	0.2-0.6	0.1	0.2	0.1	-
ВЧ 45	3.3-3.8	1.9-2.9	0.3-0.6	0.1	0.2	0.1	-
ВЧ 50	3.2-3.7	1.9-2.9	0.3-0.7	0.1	0.2	0.15	-
ВЧ 60	3.2-3.6	2.4-2.6	0.4-0.7	0.1	0.2	0.15	0.3 Cu 0.4 Ni
ВЧ 70	3.2-3.6	2.6-2.9	0.4-0.7	0.1	0.015	0.15	0.4 Cu 0.6 Ni
ВЧ 80	3.2-3.6	2.6-2.9	0.4-0.7	0.1	0.01	0.15	0.6 Cu 0.6 Ni
ВЧ 100	3.2-3.6	3.0-3.8	0.4-0.7	0.1	0.01	0.15	0.6 Cu 0.8 Ni

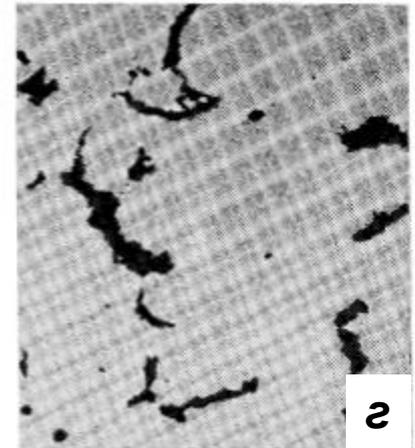
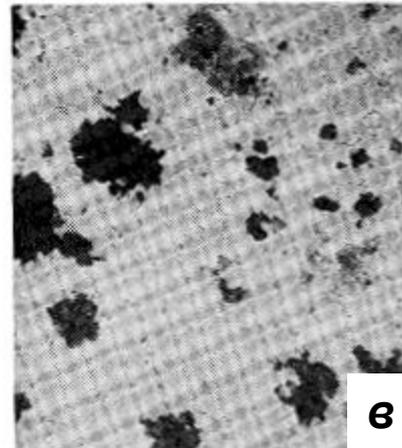
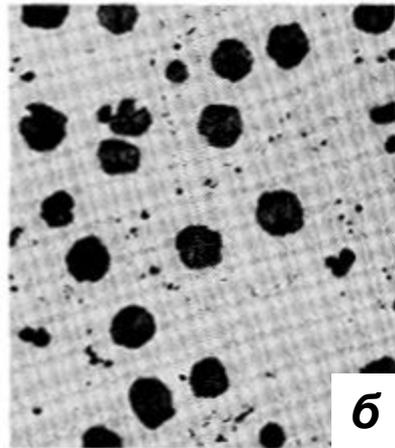
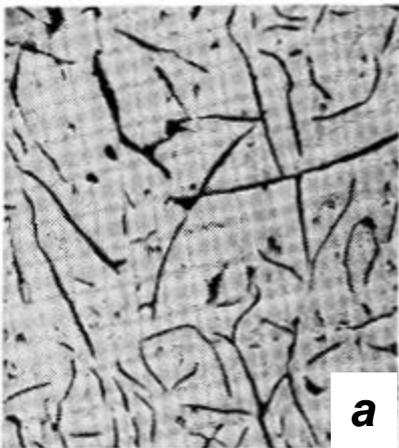
Общая классификация чугунов

1) По способу производства:

- *Предельный чугун* – используется для изготовления стали (**белый чугун**)
- *Литейный чугун* – используется для изготовления отливок (**высокопрочный и ковкий чугун**)

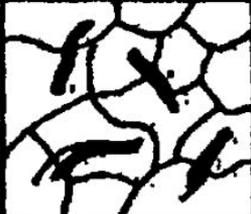
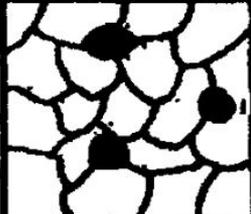
2) По форме графитных включений:

- *Чугун с пластинчатым графитом* (**серый чугун**) – **а**
- *Чугун с шаровидным графитом* (**высокопрочный чугун**) – **б**
- *Чугун с хлопьевидным графитом* (**ковкий чугун**) – **в**
- *Чугун с вермикулярным (червеобразным) графитом* – **г**



Общая классификация чугунов

3) По типу структуры металлической основы: ферритный, перлитный и ферритно-перлитный чугун;

Металлическая основа	Форма графитных включений			
	Пластинчатая	Хлопьевидная	Шаро-дидная	Вермикулярная
Феррит				
Феррит + перлит				
Перлит				

Общая классификация чугунов

4) По состоянию углерода (химически связанный или структурно свободный):

- *Белый чугун*
- *Серый чугун*
- *Половинчатый (отбеленный) чугун* – углерод содержится в нём **частично в свободном состоянии в виде графита и частично в связанном** – в виде цементита (более 0.8%). Такой чугун имеет структуру перлита, ледебурита и пластинчатого графита, обладает высокой износостойкостью, но плохо обрабатывается резанием. Применяется в качестве фрикционного материала, а также для изготовления деталей повышенной износостойкости.

5) По назначению:

- *Конструкционный чугун общего назначения (серый, высокопрочный, ковкий);*
- *Чугун со специальными свойствами (антифрикционный, износостойкий, коррозионностойкий, жаростойкий, жаропрочный).*

Общая классификация чугунов

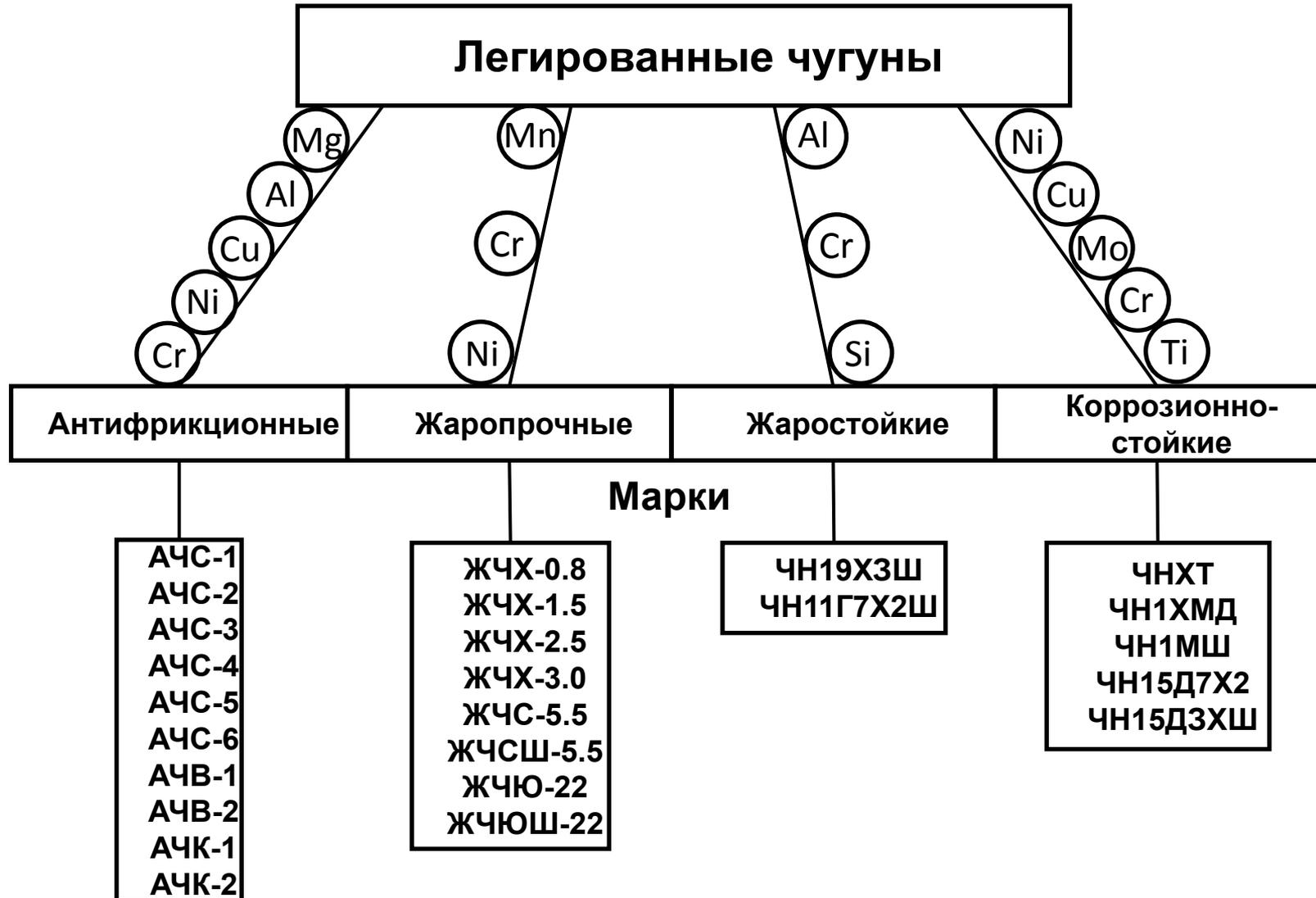
6) По технологии получения:

- *Обычный чугун* (не модифицированный);
- *Модифицированный чугун* – чугун, в расплав которого было добавлено небольшое количество специальных добавок – модификаторов, которые способствуют измельчению пластинок графита или получению графита в форме шара. В результате модифицирования механические свойства чугуна улучшаются: возрастает прочность, пластичность и вязкость.

7) По химическому составу: *легированный и нелегированный чугун.*

Легированный чугун – сплав железа с углеродом, обычно содержащий определенное количество кремния и марганца, а также дополнительно один или несколько таких элементов, как хром, никель, медь, алюминий и др.

Легированные чугуны

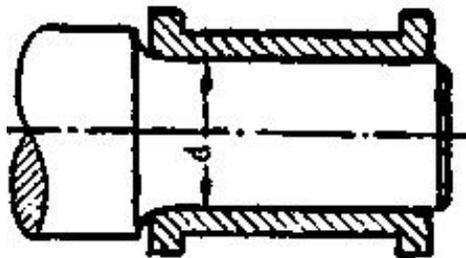


Антифрикционный чугун

Антифрикционные чугуны используются для изготовления деталей, работающих в условиях трения скольжения. Их получают на основе серых, высокопрочных и ковких чугунов:

- Серые чугуны легируют: **хромом** (0.2-0.4%), **никелем** (0.2-0.4%), **медью** (0.3-2%), **алюминием** (0.4-0.8%);
- Высокопрочные чугуны легируют: **медью** (0.7%), **магнием** (0.03%);
- Ковкие чугуны легируют **медью** (1-1.5%).

Маркировка антифрикционных чугунов проводится согласно **ГОСТ 1585-79**.



Подшипник скольжения
из антифрикционного
чугуна

АЧ **С** - **1**

АЧ **В** - **2**

АЧ **К** - **2**

Антифрикционный чугун

Серый / высокопрочный / ковкий

Номер марки

Жаропрочный, жаростойкий и коррозионно-стойкий чугуны

Жаропрочный чугун предназначен для эксплуатации при температуре **до 600°C**. Получается легированием **никелем, хромом, марганцем**.

Жаростойкий чугун обладает способностью противостоять окислению при повышенных температурах: **от 600 до 1100°C**. Получается легированием **хромом, кремнием, алюминием**.

Коррозионно-стойкий чугун сохраняет свойства при работе в газовых средах, водных растворах. Получается легированием **хромом, титаном, молибденом, медью, никелем**.

Маркировка этих чугунов проводится согласно **ГОСТ 7769-82**.

Ч Н 15 Д 3 Х Ш

Ч Н 1 Х М Д

Чугун

Легирующие элементы

Приблизительная молекулярная масса легирующего элемента (%)

Графит имеет шаровидную форму

Если после легирующего элемента отсутствует значение, то это означает, что его содержание меньше 1%.

Список использованной литературы

1) Кузнецов В.В., Рубцов Э.Р., Шкуряков Н.П. Материаловедение. Железоуглеродистые сплавы. Строение. Структура. Свойства: учебное пособие. СПб, СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. 80 с.

(http://etu.chemdm.ru/МТКМ_1.pdf)

2) Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

(https://cloud.mail.ru/public/6d4a8f6d1371/materialovedenie_1990_laxtin.rar)

3) Микроструктура чугунов: Методические указания по дисциплине «Материаловедение» /Составители: В.И. Астащенко, Г.Ф. Мухаметзянова, Н.Н. Западнова – Набережные Челны: НЧИ (ф) КФУ, 2016. 24 с.

(https://kpfu.ru/portal/docs/F_150402882/Mikrostruktura.chugunov.pdf)

4) Парфенов В.Д., Структура и механические свойства чугунов: Методические указания. М.: МИИТ, 2011. 51 с.

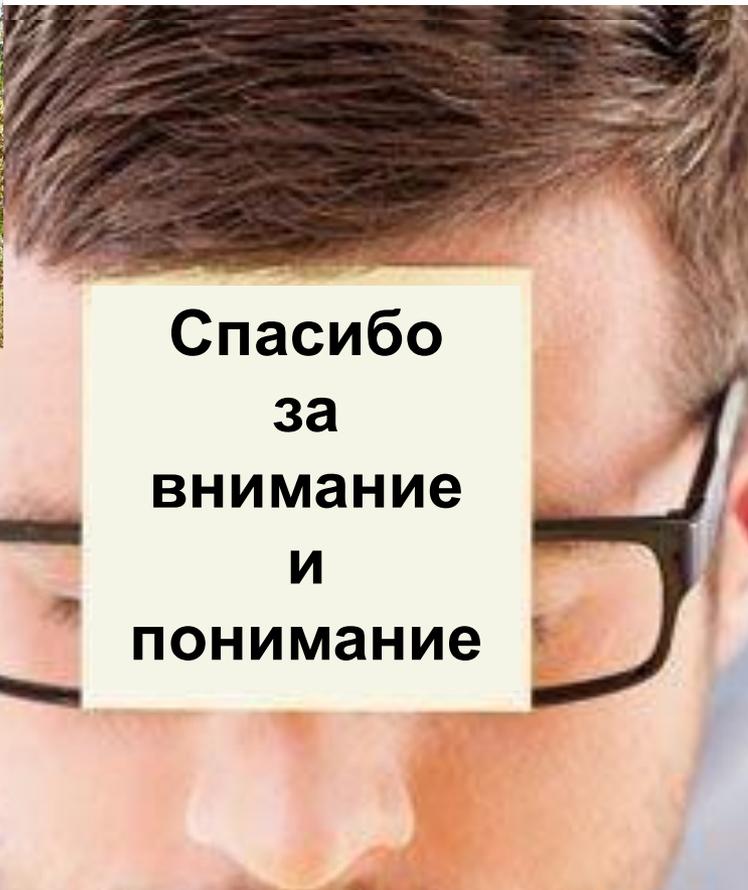
(http://library.miit.ru/methodics/31_05_2012/metodics/03%20-%2040839.pdf)

5) Парфенов В.Д., Классификация и маркировка сталей: Методические указания. М.: МИИТ, 2009. 28 с.

(http://library.miit.ru/methodics/22_08_2012/03_17918.pdf)



**Чугунный мост
через Северн
(1779 г.)**



**Спасибо
за
внимание
и
понимание**



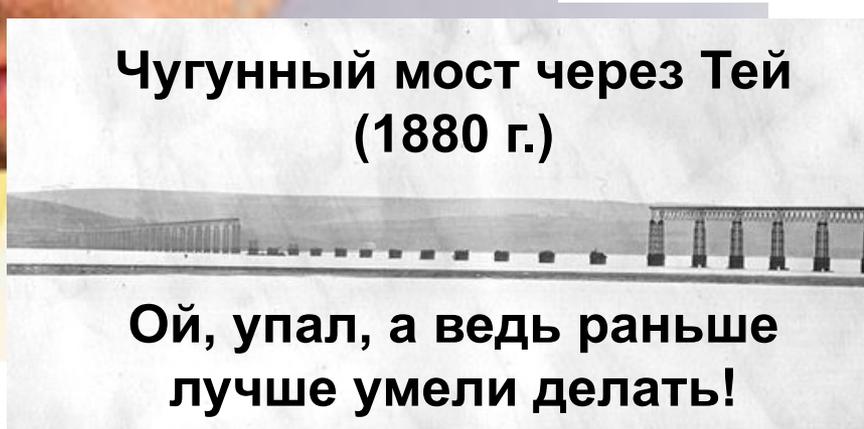
**Чугунная дверь
в лучший мир
(1890 г.)**



**Чугунный мост через Тей
(1878 г.)**



**Чугунный мост через Тей
(1880 г.)**



**Ой, упал, а ведь раньше
лучше умели делать!**