ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Технология металлов **включает три основные вида:**

1) ***металлургия*** **– получение металла заданного состава;**
2) ***механическая обработка*** **– получение из металла изделий заданной формы;**
3) ***термическая обработка*** **– получение заданных свойств металла.**

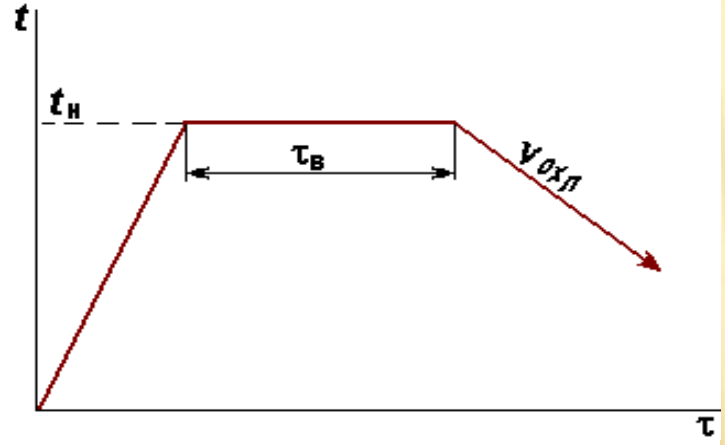
При термической обработке стали возможны четыре основных превращения.

- Превращение перлита в аустенит при нагреве
- Перлитное превращение при охлаждении
- Мартенситное превращение при охлаждении
- Превращение мартенсита при нагреве в феррито-карбидную смесь

Все эти превращения используются в различных операциях термической обработки стали:

Отжиг	*Нормализация*	*Закалка*	*Отпуск*

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ



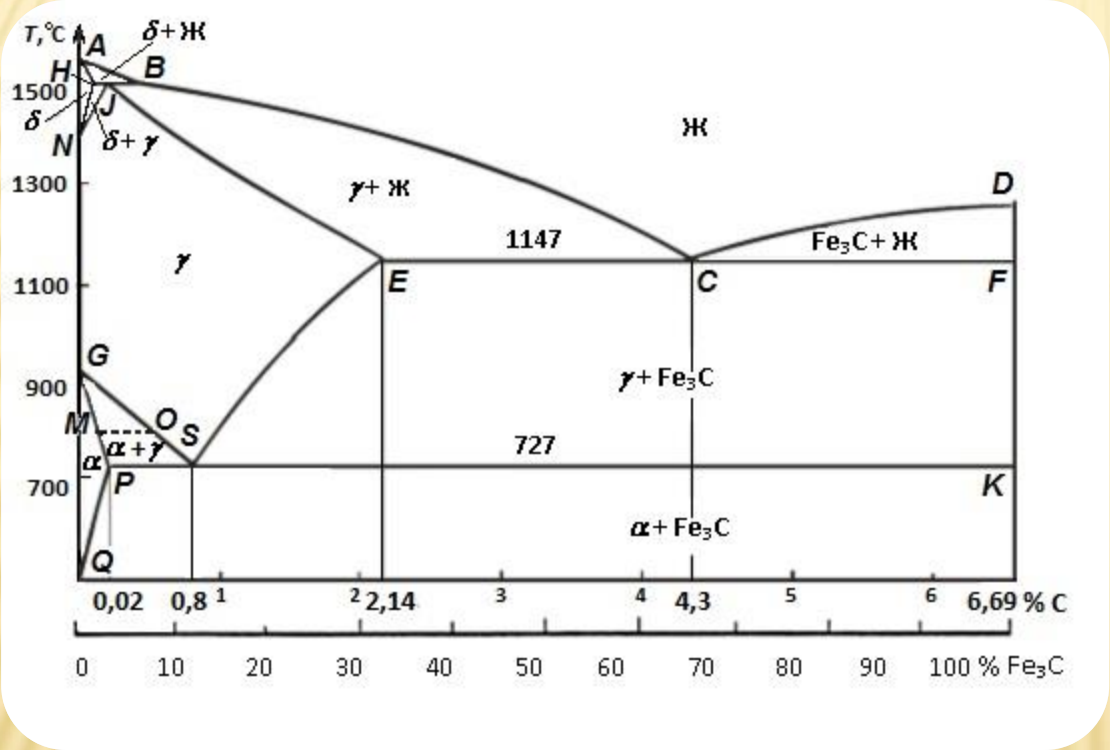
Графическое изображение режима термической обработки:
нагрев, выдержка, охлаждение

Термическая обработка – совокупность операций нагрева и охлаждения с целью изменить структуру и свойства сплава в нужном направлении.

Главные параметры, определяющие результат термической обработки, – *температура нагрева* $t_н$, *время выдержки* $\tau_в$ и *скорость охлаждения* $v_{охл}$.

Различают *упрочняющую* термическую обработку, при которой повышаются твёрдость, прочность и износостойкость, и *разупрочняющую* обработку, повышающую пластические свойства и вязкость, но снижающую твёрдость и сопротивление деформации и разрушению.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ



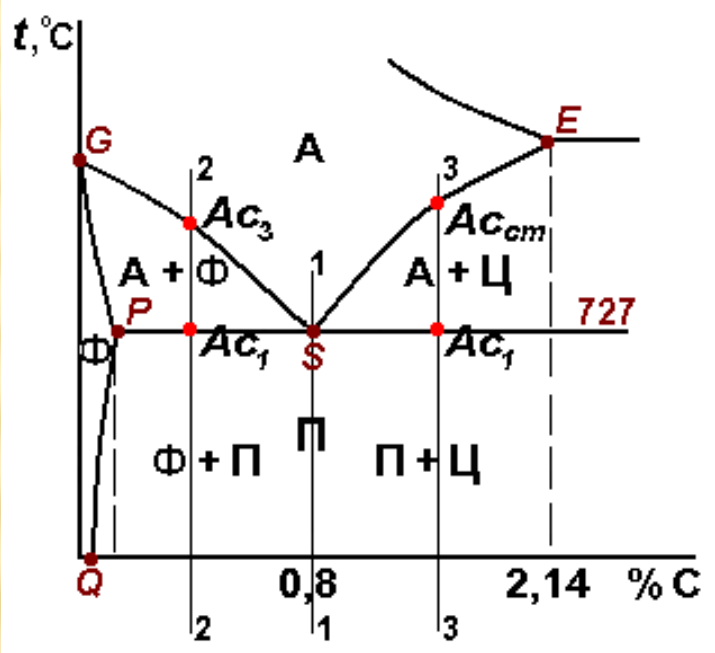
Производство стали в мире постоянно растёт и приближается к 2 млрд тонн в год. Это объясняется тем, что сталь является уникальным материалом: она сочетает высокую жёсткость (модуль упругости E = $2{,}1 \cdot 10^5$ МПа), статическую и циклическую прочность с достаточно высокой надёжностью работы конструкций.

Получать нужное сочетание механических свойств можно как за счёт изменения состава стали (содержания углерода и легирующих элементов), так и путём термической и химико-термической обработки.

Другие конструкционные материалы (сплавы алюминия, магния, титана, меди, полимеры) уступают стали по жёсткости, прочности, надёжности.

Диаграмма состояния железо–углерод показывает, что у сплавов левее точки E (сталей) есть возможность изменения структуры и свойств в результате фазового превращения $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ при нагреве и обратного превращения $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ при охлаждении. Растворимость углерода в решётке Fe_α и Fe_γ отличается в сто раз, именно это позволяет получать очень значительное упрочнение за счёт операций термической обработки.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ



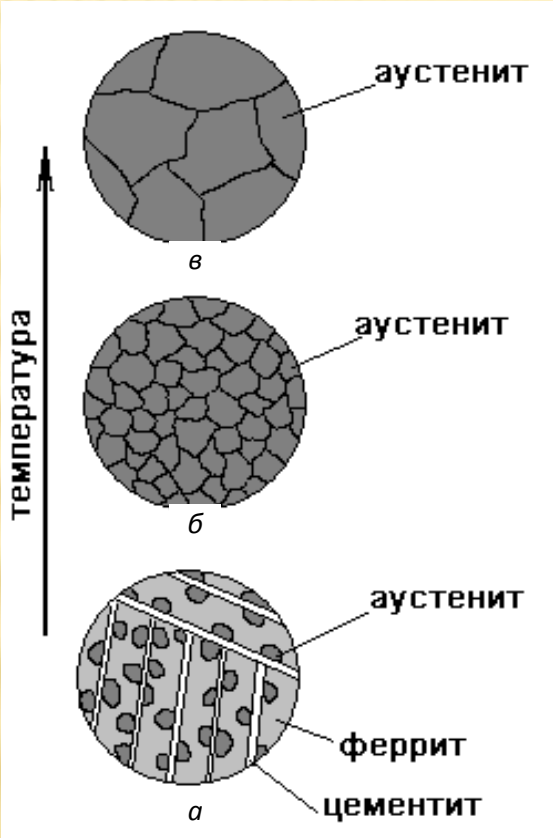
Критические точки при нагреве стали

Температуры превращений, или *критические точки*, при нагреве стали:
•начало превращения феррита в аустенит ($Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$) – Ac_1 (на линии *PSK*);
•завершение превращения феррита в аустенит ($Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$) – Ac_3 (на линии *GS*);
•окончание растворения цементита в аустените – Ac_{cm} (на линии *SE*).

Точки A_2 относятся к магнитному, а не фазовому превращению.

Внимание! Точки Ac_3 и Ac_{cm} – свои для каждой стали, а точка Ac_1 – одна для всех углеродистых сталей: 727 °С.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ: ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ

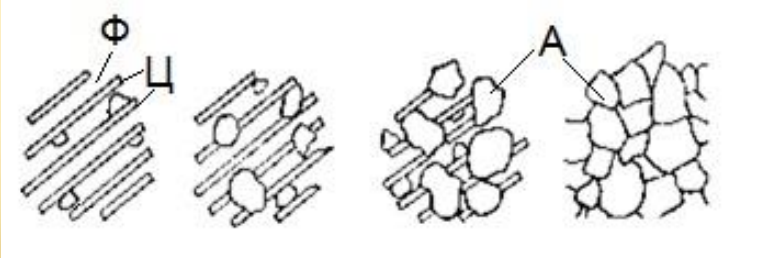


Изменение структуры стали при нагреве

Нагрев от комнатной температуры до линии *PSK* не приводит к изменениям структуры, она остаётся перлитной.

При достижении температуры Ac_1 = 727 °С начинается превращение перлита в аустенит. В ферритных участках, на границах между ферритом и цементитом, возникают зародыши новой фазы – аустенита *(а)*.

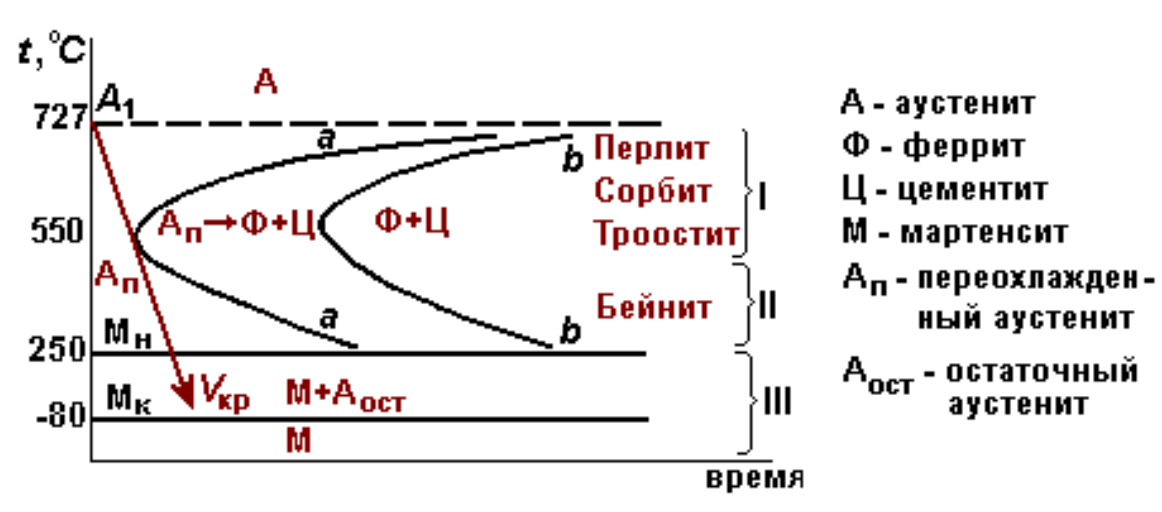
Дальнейший нагрев от Ac_3 до солидуса не приводит к фазовым превращениям *(б)*, но с ростом температуры растет зерно аустенита *(в)*.



Зарождение и рост кристаллов аустенита при температуре Ac_1

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ: ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ

Диаграмма изотермического превращения аустенита для стали с 0,8 % С
(С-образная диаграмма)



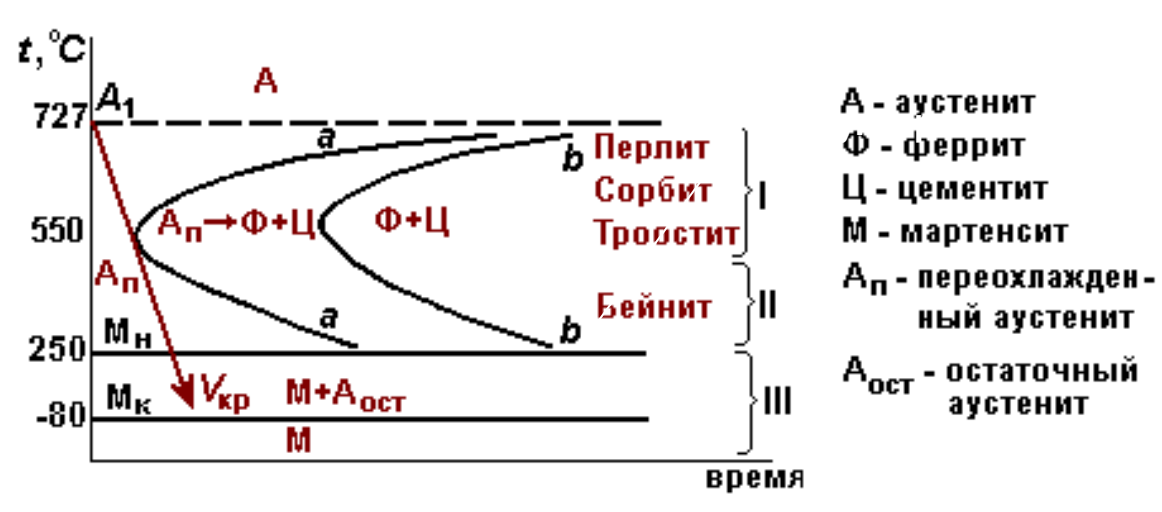
Две кривые, напоминающие по форме букву «С», показывают начало (кривая *a–a*) и окончание (кривая *b–b*) превращения аустенита в другие структуры.

Слева от линии *a–a* расположена область переохлаждённого аустенита.

Справа от линии *b–b* – область продуктов превращения, равновесных при определённых температурах.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ: ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ

Диаграмма изотермического превращения аустенита для стали с 0,8 % С
(С-образная диаграмма)



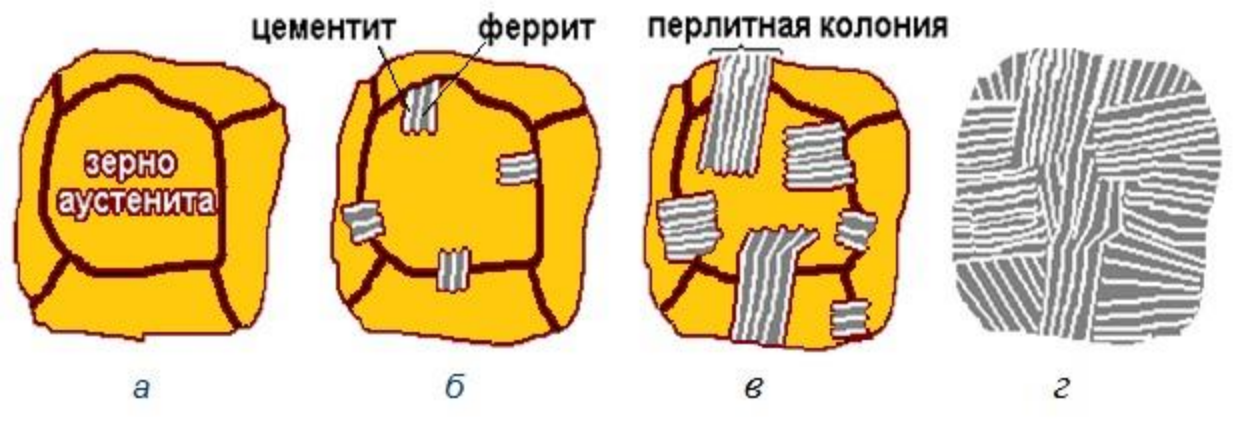
В диапазоне температур 727–550 °С (область I) процесс распада аустенита идёт *диффузионным* путём за счёт перераспределения атомов углерода в твёрдом растворе.

Ниже 250 °С, в области III, когда диффузия практически не идёт, превращение переохлаждённого аустенита происходит по *бездиффузионному* механизму: за счёт одновременного смещения всех атомов кристаллической решётки железа на расстояние меньше межатомного.

В диапазоне 500–250 °С (область II) происходит *промежуточное превращение*, которое начинается с диффузионных процессов, а затем продолжается бездиффузионно, как мартенситное.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ: *ДИФФУЗИОННОЕ (ПЕРЛИТНОЕ)* ПРЕВРАЩЕНИЕ

Зарождение и рост перлитных колоний в аустените



Образующиеся кристаллы феррита и цементита имеют пластинчатую форму и растут параллельно друг другу в обе стороны от границы зерна аустенита *(а)*. Одновременно зарождаются перлитные колонии в нескольких участках зерна аустенита *(б, в)*. Диффузионное превращение продолжается до полного исчезновения исходной фазы – аустенита *(г)*.

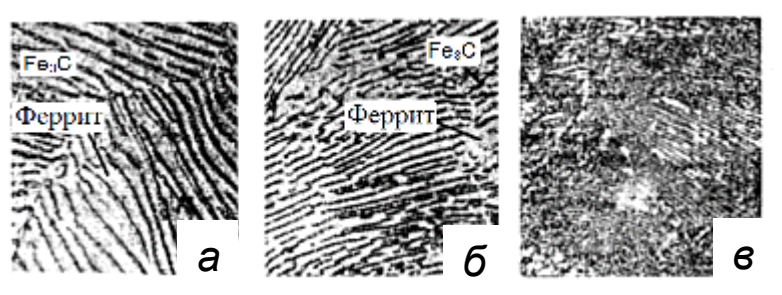
Коротко можно записать это превращение следующим образом:

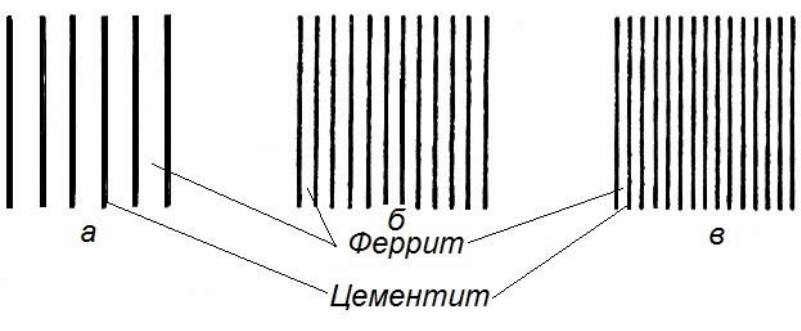
$$А_{0,8} \rightarrow Ф_{0,02} + Ц_{6,69}, \text{ или } А_{0,8} \rightarrow П_{0,8}.$$

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ: *ДИФФУЗИОННОЕ (ПЕРЛИТНОЕ)* ПРЕВРАЩЕНИЕ

Продукты диффузионного превращения аустенита

Структура	Температура образования, °С	Межпластиночное расстояние, мкм	Твёрдость, *HB*
перлит	> 670	0,5–0,7	170–230
сорбит	590–640	0,3–0,4	230–330
троостит	550–580	0,1–0,2	330–400

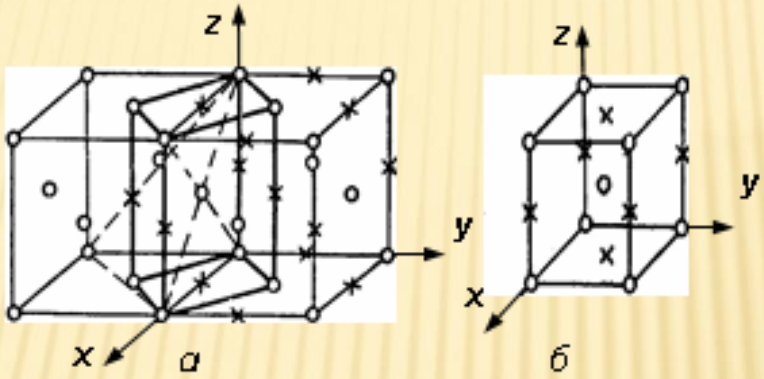




Микроструктуры и схемы структур: *а* – перлит, *б* – сорбит, *в* – троостит

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ: *БЕЗДИФФУЗИОННОЕ (МАРТЕНСИТНОЕ)* ПРЕВРАЩЕНИЕ

Схема превращения аустенита *(а)* в мартенсит *(б)*

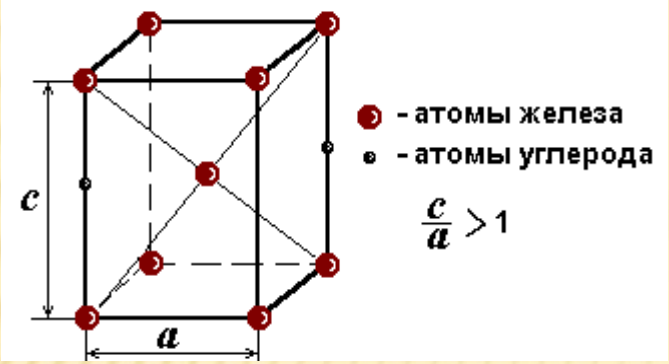


Превращение развивается по *сдвиговому* механизму: за счёт одновременного смещения всех атомов кристаллической решётки железа по определённым плоскостям на расстояние меньше межатомного. При этом меняется тип решётки, а соседние атомы так и остаются соседними. Весь углерод, растворённый в решётке γ-железа, остаётся после превращения в решётке α-железа.

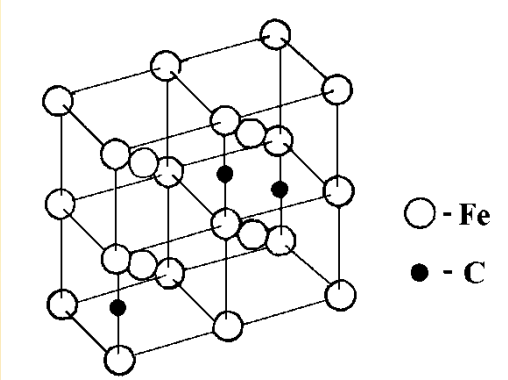
При превращении атомы железа смещаются на расстояния, меньшие межатомных; диффузии углерода нет. На рис. *а* показаны две элементарные ячейки аустенита (кружки – атомы железа). Атомы углерода растворены в аустените по типу внедрения. Они занимают октаэдрические пустоты на серединах рёбер и в центрах объёмов, которые отмечены крестиками. В ГЦК решетке аустенита можно мысленно выделить тетрагональную решётку мартенсита (на рисунке она показана жирными линиями).

Перестройка решётки аустенита происходит по кристаллографическим плоскостям, которые по строению и параметрам близки к определённым плоскостям решётки мартенсита.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ:
БЕЗДИФФУЗИОННОЕ (МАРТЕНСИТНОЕ) ПРЕВРАЩЕНИЕ



Элементарная ячейка мартенсита:
c/a – тетрагональность решётки



Расположение атомов углерода
в решётке мартенсита

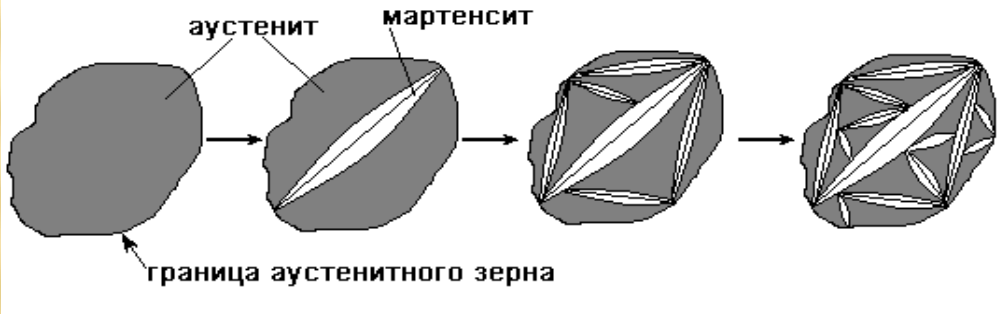
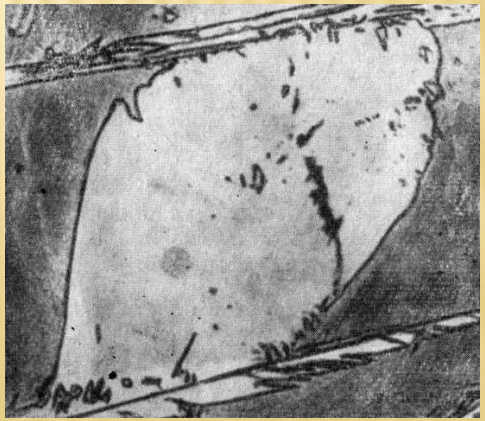


Схема образования пластин мартенсита

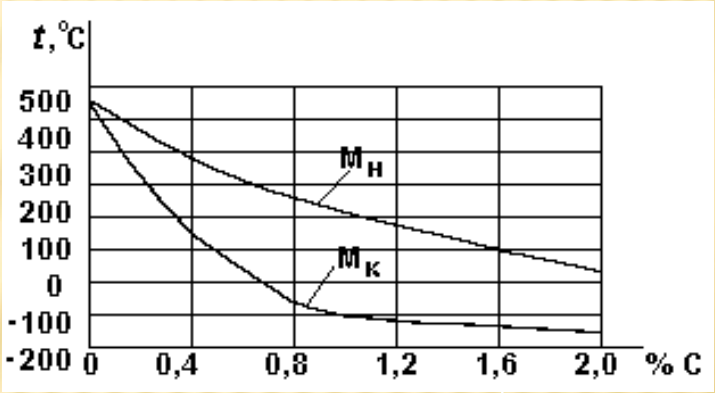


Фотография пластины мартенсита

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ: *БЕЗДИФФУЗИОННОЕ (МАРТЕНСИТНОЕ)* ПРЕВРАЩЕНИЕ

Зависимость твёрдости мартенсита от содержания углерода

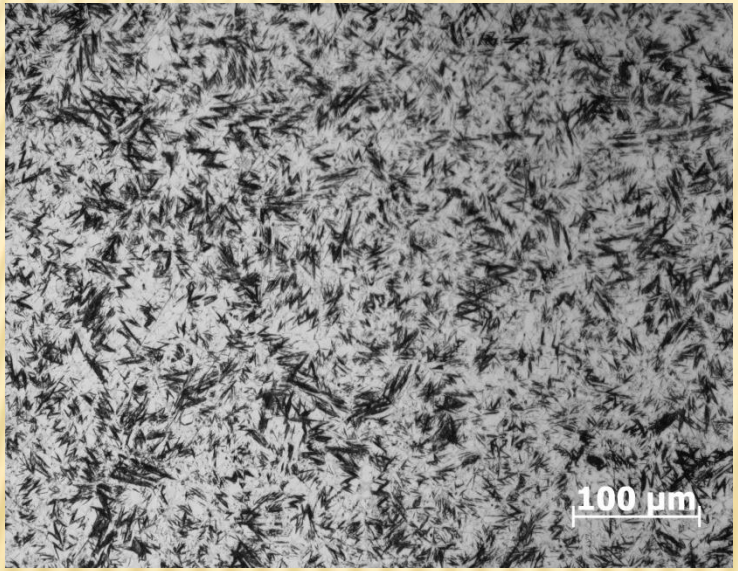
Содержание углерода в мартенсите, %	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Твёрдость, *HRC*	40	48	55	59	62	65	66



Зависимость температур начала и окончания мартенситного превращения от содержания углерода в стали

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ: *БЕЗДИФФУЗИОННОЕ (МАРТЕНСИТНОЕ)* ПРЕВРАЩЕНИЕ

Микроструктура мартенсита



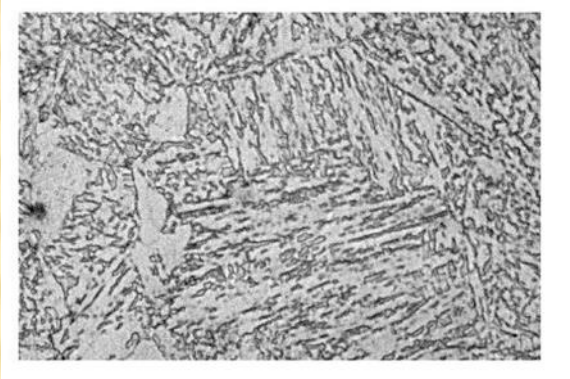
а

б

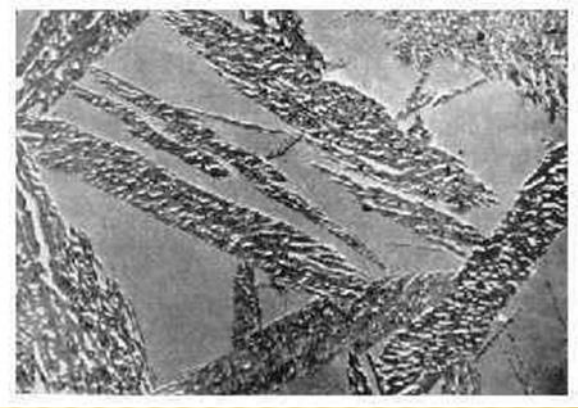
Игольчатый мартенсит в высокоуглеродистой стали *(а)* и реечный в среднеуглеродистой стали *(б)*

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ: *ПРОМЕЖУТОЧНОЕ (БЕЙНИТНОЕ)* ПРЕВРАЩЕНИЕ

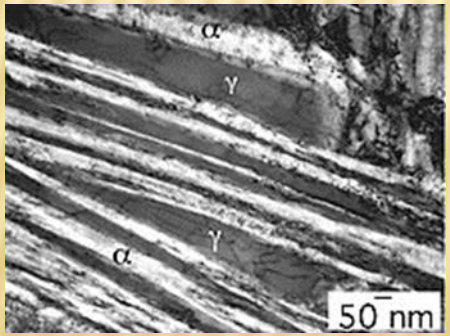
Микроструктура бейнита



а) Верхний бейнит имеет перистое строение ×500



б) Нижний бейнит имеет игольчатое строение, похож на мартенсит × 10000

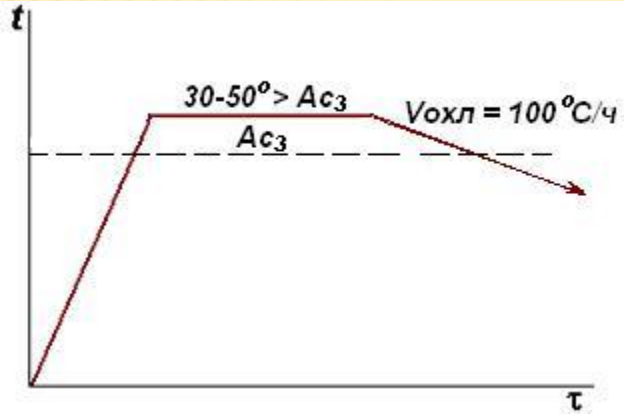


Ферритная фаза в бейните является пересыщенным раствором углерода в α-железе. Карбидная фаза в верхнем бейните – цементит, а в нижнем бейните – ε-карбид, который заменяется цементитом с увеличением времени выдержки.

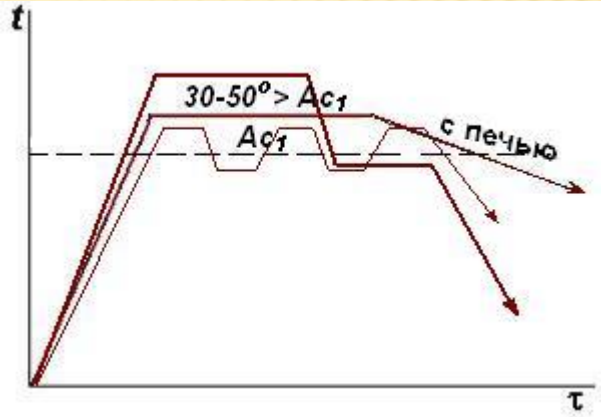
Структура нижнего бейнита в электронном микроскопе: видны пластинки α-фазы с мельчайшими частицами карбида и переохлаждённый аустенит, ещё не прошедший фазовое превращение

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Отжиг



Режим полного отжига



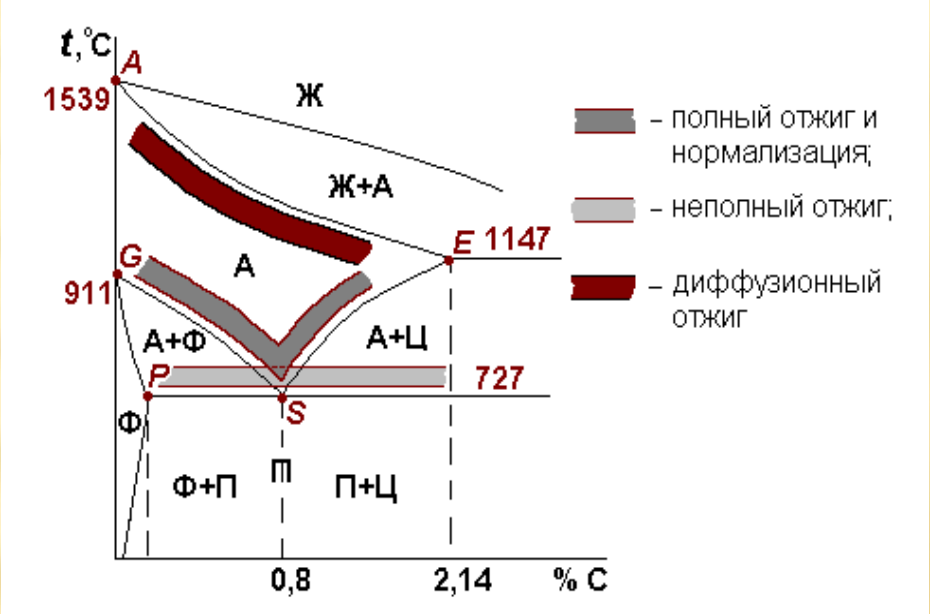
Режимы неполного отжига

Полный отжиг доэвтектоидных (конструкционных) сталей выполняется с целью полной фазовой перекристаллизации. Сталь нагревают на 30–50° выше критической точки Ac_3 (линии *GS*) и после небольшой выдержки медленно охлаждают. Практически детали охлаждаются вместе с печью со скоростью 30–100 °С/ч. Структура – феррит и перлит.

Неполный отжиг заэвтектоидных (инструментальных) сталей выполняется с целью получения структуры зернистого перлита. Для этого сталь нагревают на 30–50° выше критической точки Ac_1 (линии *PSK*). Применяют несколько различных режимов. Структура – зернистый перлит.

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Отжиг и нормализация



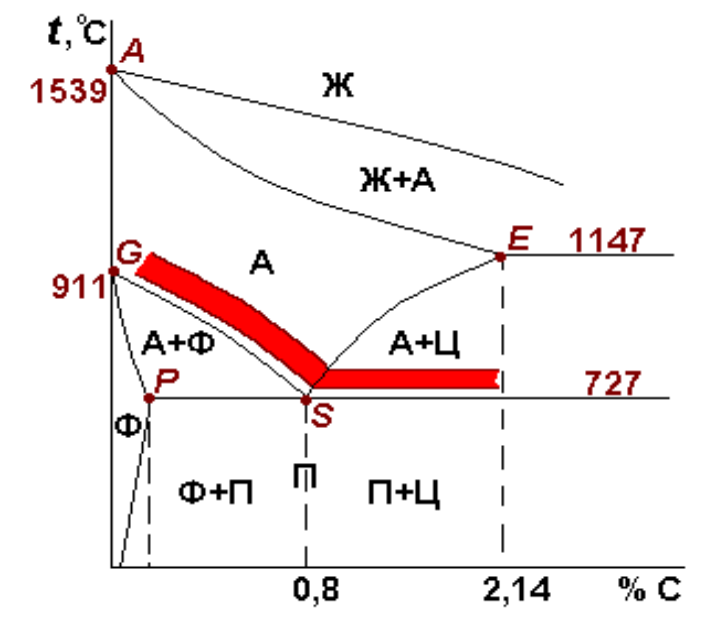
Температурные интервалы нагрева стали при отжиге

Диффузионный отжиг стальных отливок и поковок выполняют с целью устранения неоднородности литой или деформированной структуры. Устранение микроликвации достигается за счёт диффузионных процессов.

Нормализация заключается в нагреве стали до температур на 50–70° выше линии *GSE* и в охлаждении на воздухе после небольшой выдержки. Поэтому при нормализации получается более мелкое зерно, чем при полном отжиге: тонкопластинчатый перлит или сорбит.

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Закалка



Температурные интервалы нагрева стали под закалку

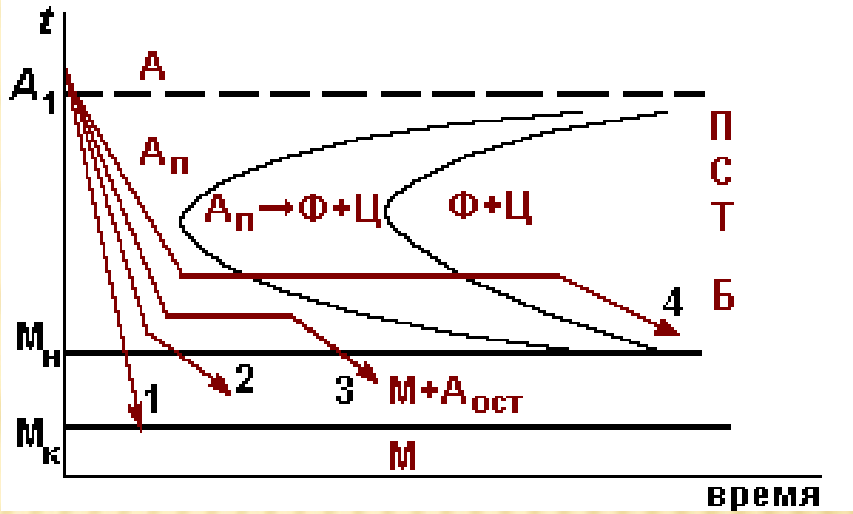
Закалка заключается в нагреве стали выше температуры фазового превращения с последующим достаточно быстрым охлаждением (со скоростью больше критической).

Цель: получение неравновесной структуры – пересыщенного твёрдого раствора углерода в α-железе – мартенсита. Практическая цель – получение максимальной твердости для данной марки стали.

Доэвтектоидные стали подвергают полной закалке, заэвтектоидные – неполной.

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Закалка



Разновидности закалки по способу охлаждения:

1) Непрерывная закалка *(закалка в одной среде)* (кривая 1).
2) Закалка в двух средах, или *прерывистая закалка* (кривая 2).
3) Ступенчатая закалка (кривая 3), при которой нагретую деталь погружают в жидкую среду с температурой на 20–30° выше точки $M_н$.
4) Изотермическая закалка (кривая 4). Она существенно отличается от других способов. Здесь выдержка в охлаждающей среде при температуре бейнитного превращения продолжается до полного распада аустенита.

Во всех предыдущих случаях при закалке происходит образование мартенситной структуры, а при изотермической закалке образуется *бейнит*.

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Закалка

Закалка осуществляется быстрым охлаждением ($v_{охл} > v_{кр}$) в закалочных жидкостях (вода, водные растворы, минеральные масла)

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Закалка

Охлаждающая среда	Температура, °С		Относительная интенсивность охлаждения в интервале температур пузырькового кипения
	охлаждающая среда	пузырьковое кипение	
Вода	20	400-100	1,0
	40	350-100	0,7
	80	250-100	0,2
1 % раствор NaCl в воде	20	500-100	1,5
10 % раствор NaCl в воде	20	650-100	3,0
Раствор NaOH в воде:			
10 %-ый	20	650-100	2,5
50 %-ый	20	650-100	2,0
Масло минеральное	20-200	500-250	0,3

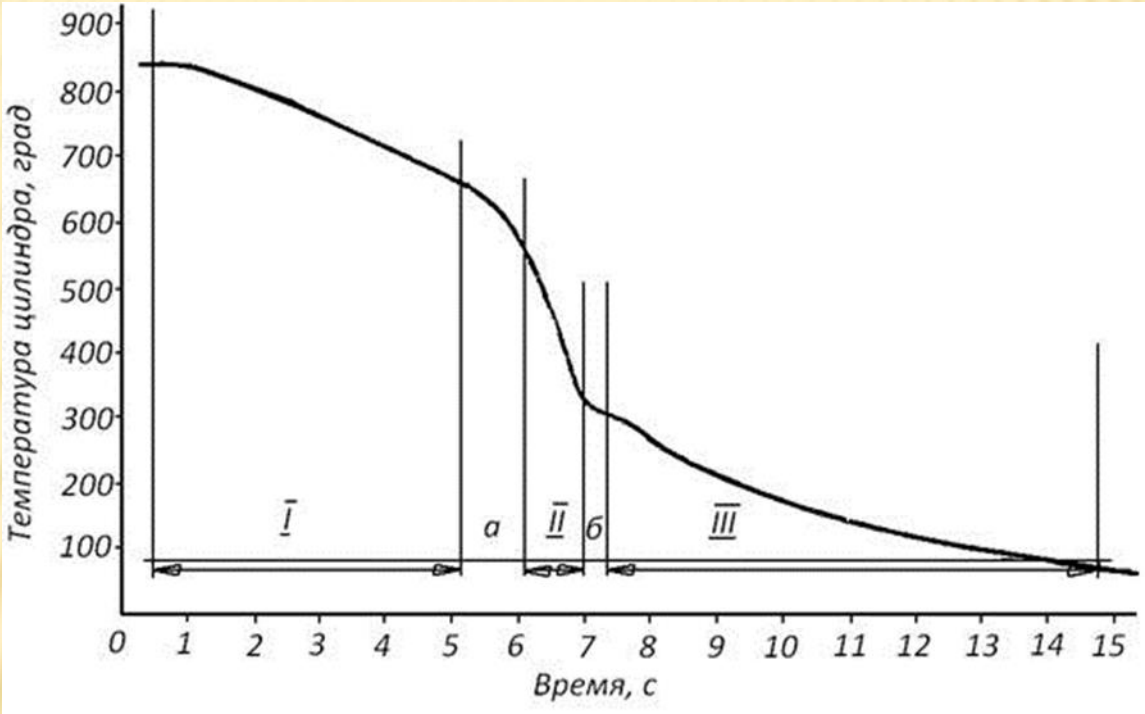
Охлаждающая способность закалочных жидкостей (вода, водные растворы, минеральное масло)

В закалочной жидкости происходит

1) плёночное кипение («паровая рубашка» на поверхности стали), $v_{охл}$ мала;
2) пузырьковое кипение – $v_{охл}$ велика, идёт быстрый отвод теплоты;
3) конвективный теплообмен (t ниже $t_{кипения}$ жидкости), $v_{охл}$ наименьшая.

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Закалка

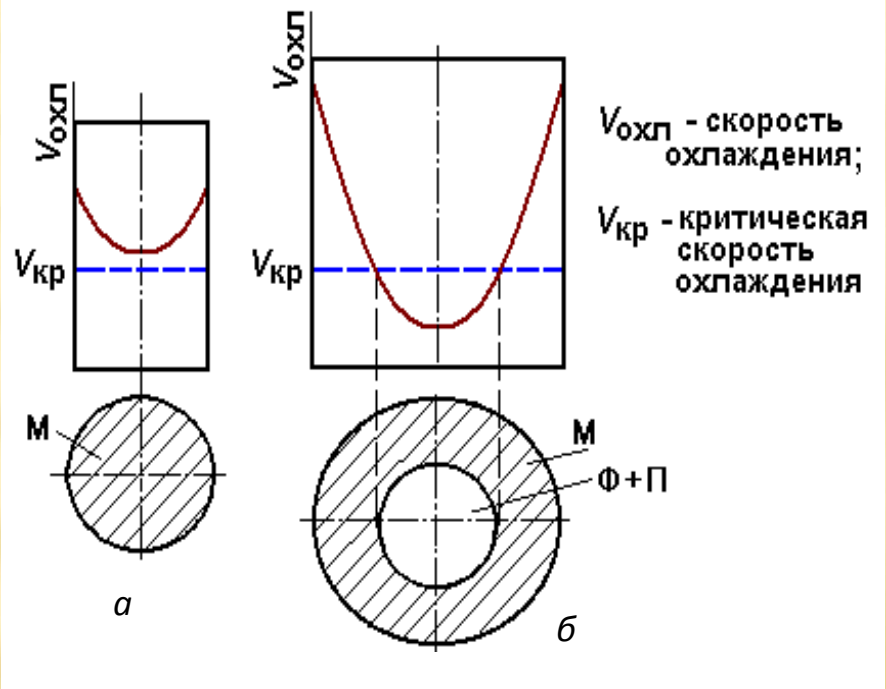


Кривая охлаждения металла в закалочных средах

Участок I – плёночное кипение («паровая рубашка» на поверхности стали), $v_{охл}$ мала; участок II – пузырьковое кипение – $v_{охл}$ велика, идёт быстрый отвод теплоты; участок III – конвективный теплообмен (t ниже $t_{кипения}$ жидкости), $v_{охл}$ наименьшая.

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Закалка



Закаливаемость – это способность стали получать высокую твёрдость при закалке. Закаливаемость зависит от содержания углерода в стали и характеризуется максимальной возможной твёрдостью (*HRC*) для данной марки.

Прокаливаемость – это способность стали получать закалённый слой определённой глубины. Скорость охлаждения уменьшается от поверхности детали к центру, поэтому при большой толщине детали может оказаться, что в её сердцевине скорость охлаждения меньше критической (рис. *б*). В этом случае на мартенсит закалится только поверхностный слой детали, а сердцевина будет незакалённой, с мягкой феррито-перлитной структурой.

Характеристика прокаливаемости стали – *критический диаметр.* Это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в конкретной охлаждающей среде.

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Закалка

Закалка в масле цельнолитого броневого корпуса

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Отпуск

Отпуск – это нагрев закалённой стали до температур ниже критических с последующим охлаждением, обычно на воздухе.

Цель отпуска – создание требуемого комплекса эксплуатационных свойств стали, получение более устойчивой структуры, чем после закалки, уменьшение внутренних напряжений.

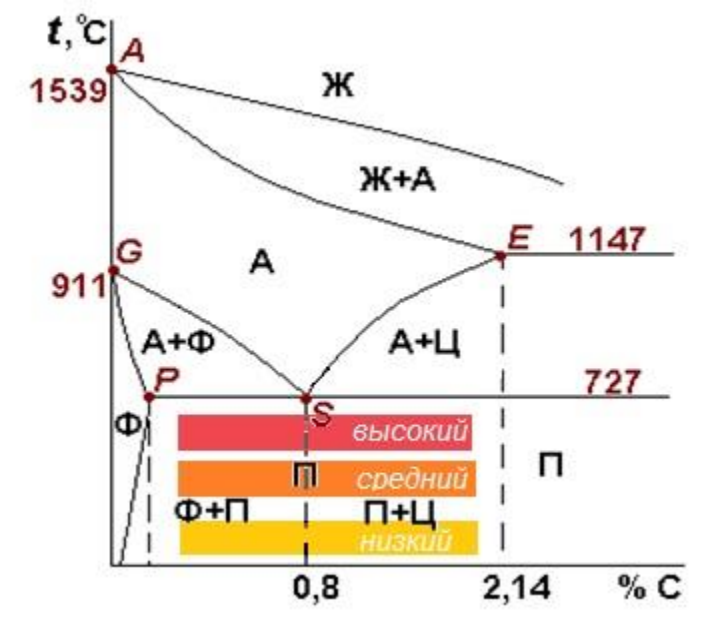
Отпуск – последняя операция в технологической цепочке термообработки стали, поэтому полученная при отпуске структура должна обеспечивать свойства, необходимые при работе детали.

В результате отпуска, при нагреве мартенсита, происходит выделение углерода из твёрдого раствора. Образуются равновесные фазы: феррит и цементит. Коротко можно записать это превращение следующим образом: $М_{0,8} \rightarrow Ф_{0,02} + Ц_{6,69}$.

Но при распаде мартенсита образуются зернистые структуры, а не пластинчатые, как при охлаждении аустенита.

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Отпуск



Температурные интервалы нагрева стали при отпуске

По температуре нагрева отпуск подразделяется на 3 вида: низкий, средний и высокий.

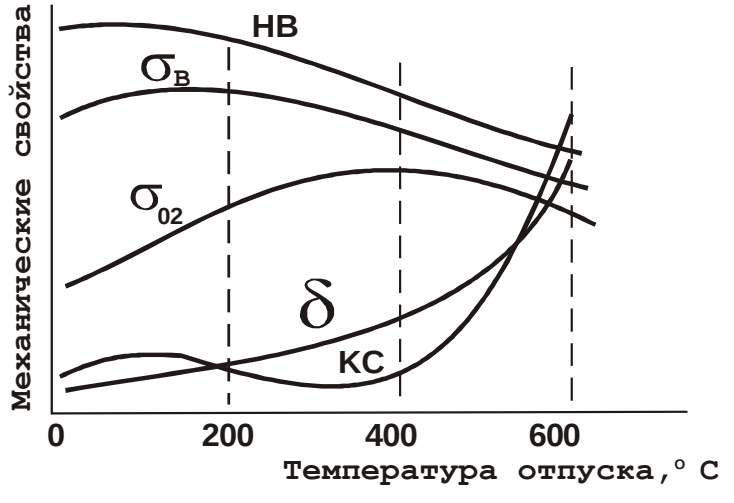
При *низкотемпературном* (или *низком*) *отпуске* (150-200 °С) из мартенсита выделяется часть избыточного углерода с образованием мельчайших карбидных частиц. Структура – *отпущенный мартенсит.*

Среднетемпературный (или *средний*) *отпуск* проводится при более высоких температурах – 300-450 °С. При этом из мартенсита выделяется весь избыточный углерод с образованием цементитных частиц. Структура – *троостит отпуска.*

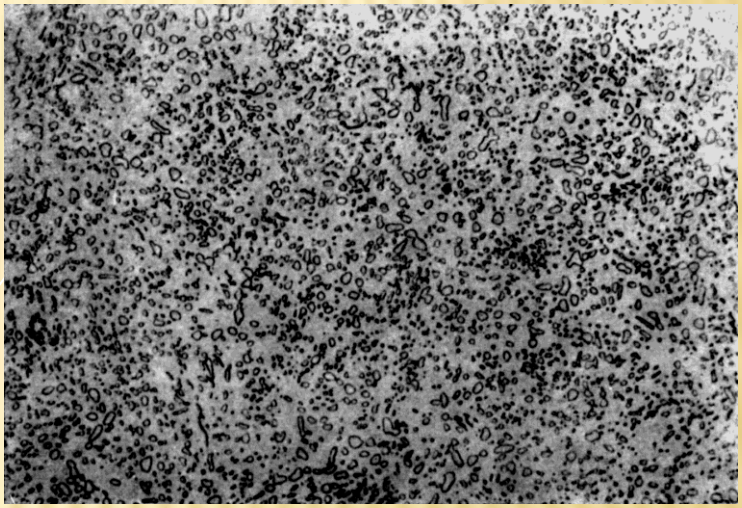
Высокотемпературный (или *высокий*) *отпуск* проводится в интервале 500-650 °С. Образуется феррито-цементитная смесь с более крупными, сферической формы, зёрнами цементита. Структура – *сорбит отпуска.*

ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Отпуск



Зависимость механических характеристик стали от температуры отпуска

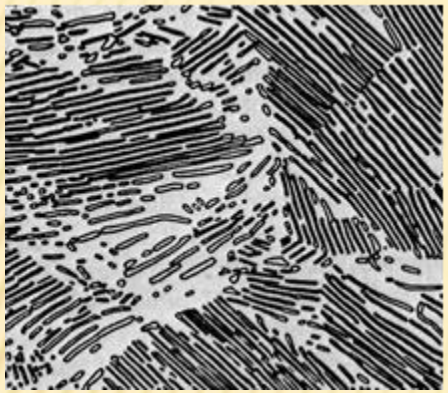


Микроструктура отпущенной стали (сорбит отпуска)

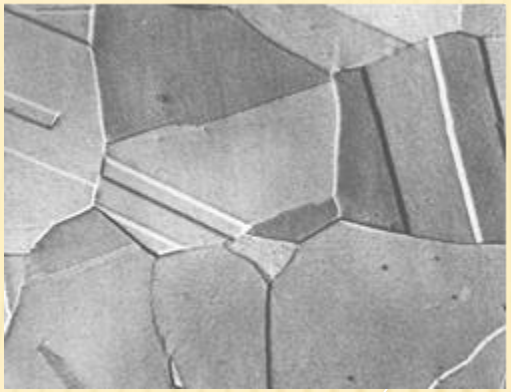
В зависимости от температуры различают *низкий отпуск* (150–200 °С), *средний отпуск* (300–450 °С) и *высокий отпуск* (500–650 °С).

С повышением температуры и продолжительности отпуска увеличиваются пластические свойства стали и ударная вязкость, но снижаются ее твёрдость и прочность.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

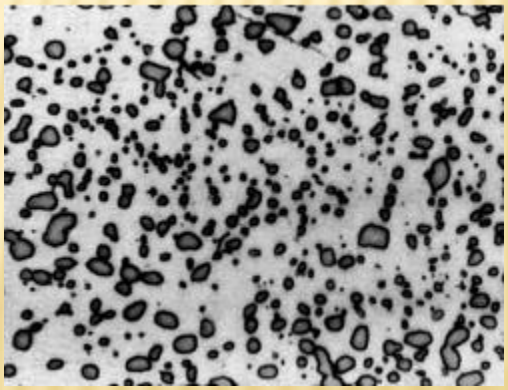


Отожжённая сталь: *перлит*



Сталь, нагретая выше критической температуры: *аустенит*

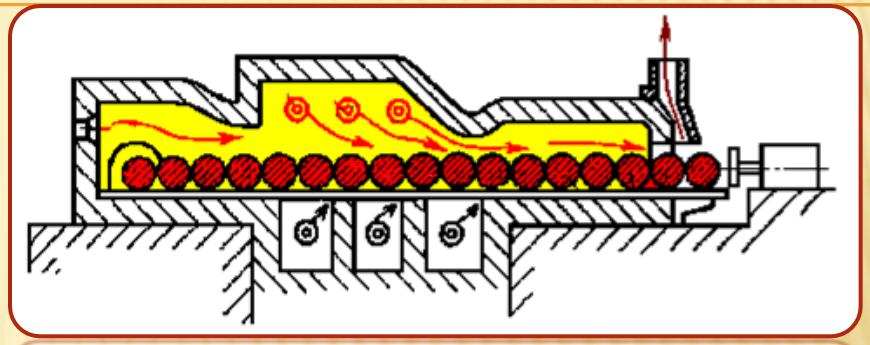
Закалённая сталь**:** *мартенсит*



Отпущенная сталь: феррит и карбиды (цементит)

ПЕЧИ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК

Камерная печь

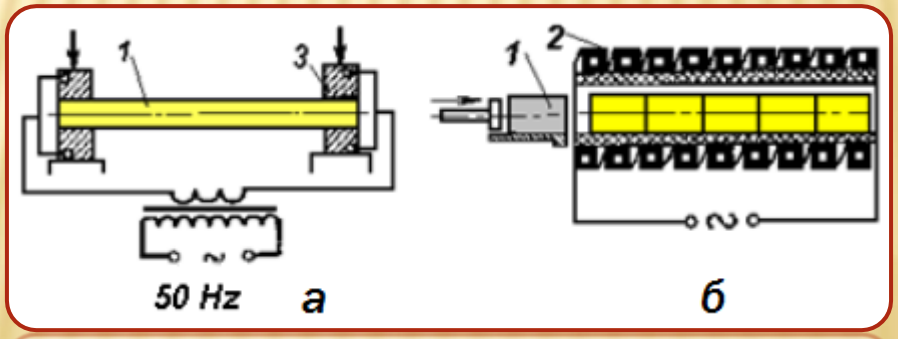


Методическая печь

Камерная пламенная печь имеет одинаковую температуру во всём рабочем пространстве. Источник тепла – факел, получаемый при сгорании природного газа или мазута.

Методическая пламенная печь состоит из нескольких зон с постепенно повышающейся температурой. Заготовки в печи продвигаются с помощью толкательных механизмов или конвейера.

Электрические печи сопротивления имеют нагреватели в виде лент или спиралей вдоль всего рабочего пространства. Температурный режим поддерживается автоматически. По конструкции они могут быть как камерными, так и методическими. Окалины в них образуется меньше, чем в пламенных печах.



Электроконтактное *(а)* и индукционное *(б)* нагревательные устройства:
1 – заготовка; *2* – индуктор; *3* – медный контакт

ПЕЧИ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК

Методическая печь

Камерная печь

а

б

Электронагревательные устройства: индукционное *(а)* и контактное *(б)*