

Влияние температуры на скорость превращения

Как нуклеация, так и рост зависят от температуры.

Нуклеация идет быстрее при переохлаждении; ее

скорость увеличивается с понижением температуры.

Наоборот, скорость роста возрастает с температурой

она определяется

соотношением Аррениуса:

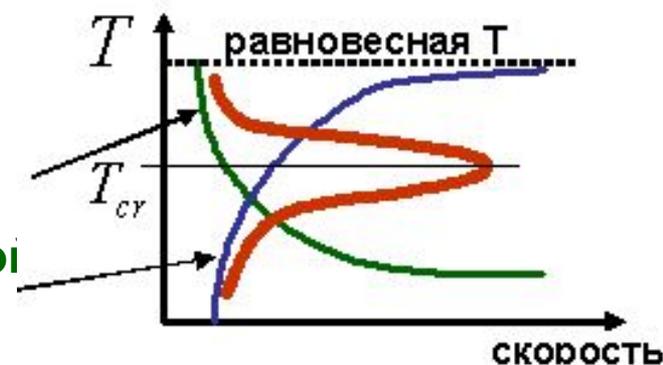
$$\frac{1}{\tau} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

$1/\tau$ - скорость превращения

Q - энергия активации реакции

A - константа

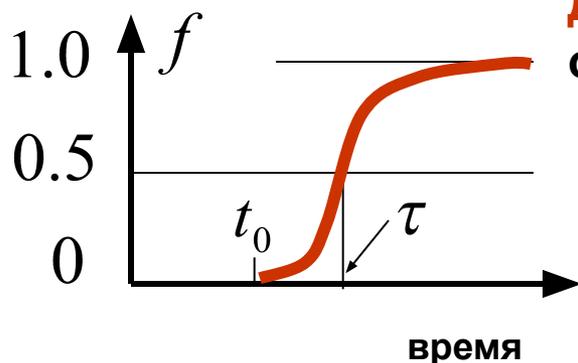
Общая скорость – это произведение скоростей нуклеации и роста (красная кривая). Видно, что существует некоторая промежуточная температура, при которой превращение происходит при наибольшей скорости (т.е. за наименьший промежуток времени)



Соотношение Аврами

Доля f трансформировавшегося в-ва в зависимости от времени определяется соотношением Аврами:

$$f = 1 - \exp(-ct^n)$$



t_0 - время инкубационного периода, требующегося для того, чтобы нуклеация началась

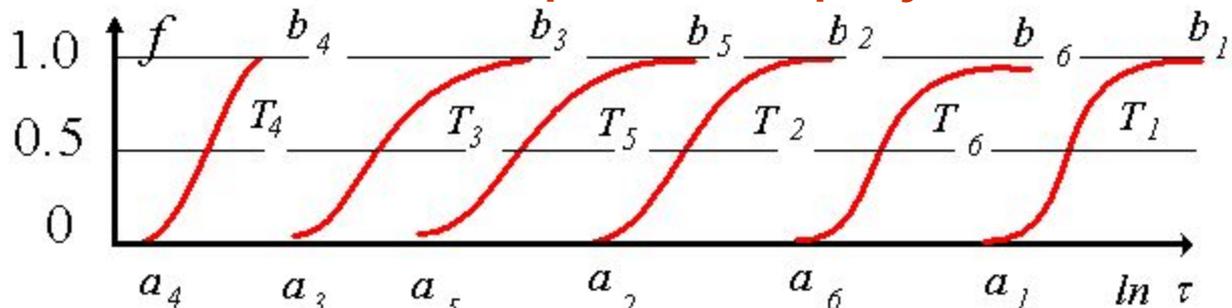
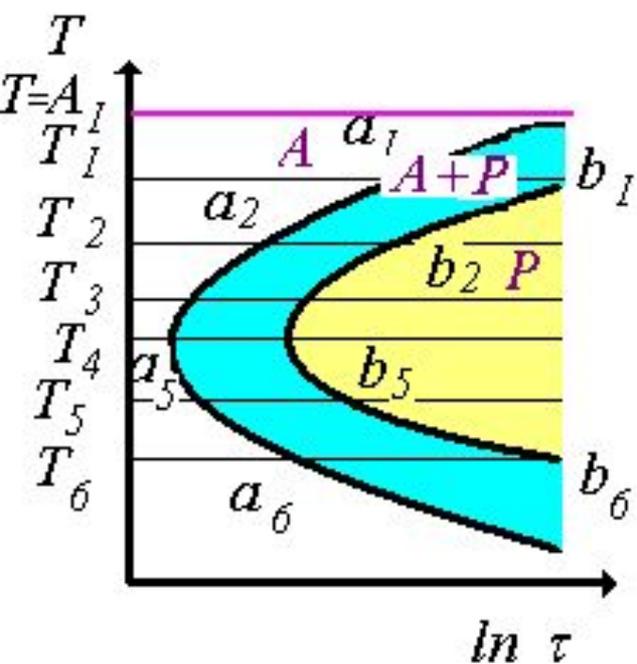
τ - здесь время 50% превращения.

c, n - константы

Построение диаграмм изотермического превращения (ДИП).

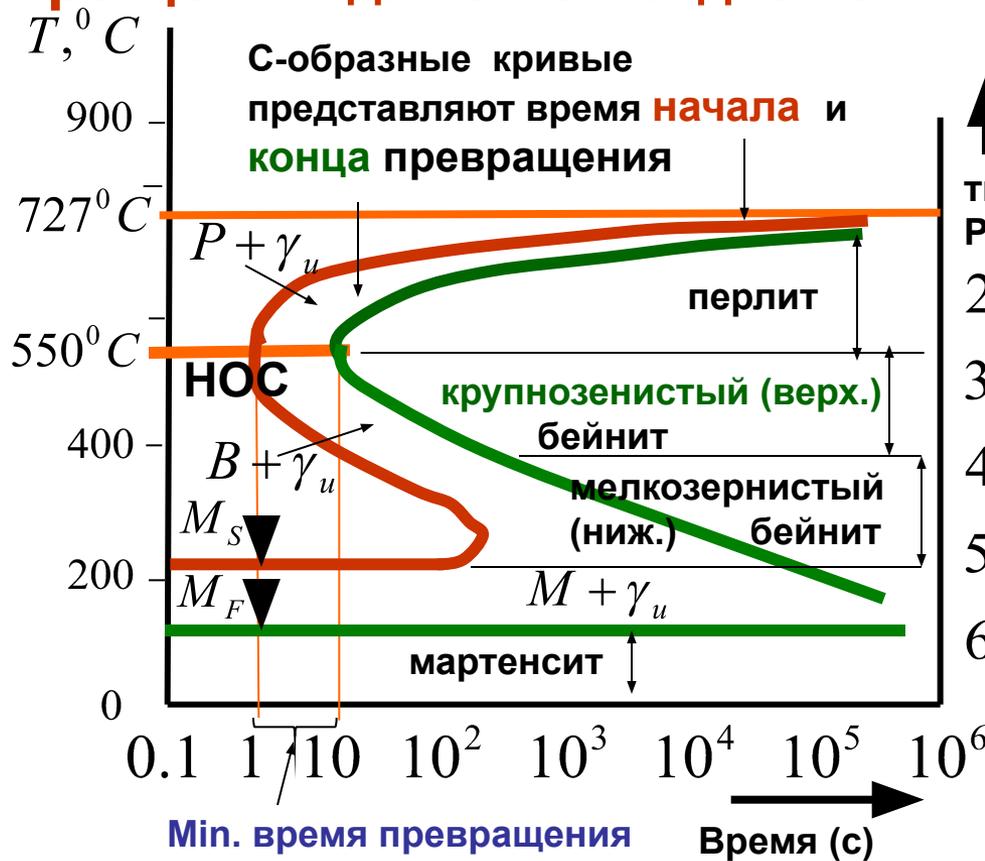
При тепловой обработке нужно знать, через какой промежуток времени при выдержке при данной температуре образуется то или иное соединение. Для этого по экспериментальным данным строят так называемые диаграммы изотермического превращения (ДИП).

Пусть исследуется распад аустенита при эвтектоидном составе (так называемое перлитное превращение). После измерения зависимости времени начала и конца превращения (точки (a) соответствуют примерно 1% перлита и (b) - 100% перлита при различных температурах $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5 > T_6$ получается ряд кривых, похожих на те, что изображены на рисунке.



По этим данным строится другая кривая, в координатах время (в логарифмическом масштабе) – температура. Тогда кривая, построенная по точкам a (левая с-образная кривая), соответствует началу образования перлита, а по точкам b – окончанию. Таким образом устанавливаются границы раздела областей аустенит (A) – аустенит+перлит (A+P) (голубая) – перлит (P) (желтая). Другие границы раздела определяют аналогичными измерениями. Фиолетовая изотерма соответствует эвтектоидной температуре A_1

Диаграммы перлитного и бейнитного изотермических превращений для эвтектоидной стали



Минимальное время превращения или максимальная скорость для эвтектоидной стали достигаются при **550°C (НОС)**

твёрдость по Роквеллу (шкала С)

20 **Образуются 2 типа микроструктур: перлит (P, образуется выше 550°) и бейнит (B, образуется при более низких температурах)**

60 **Перлитное превращение.**

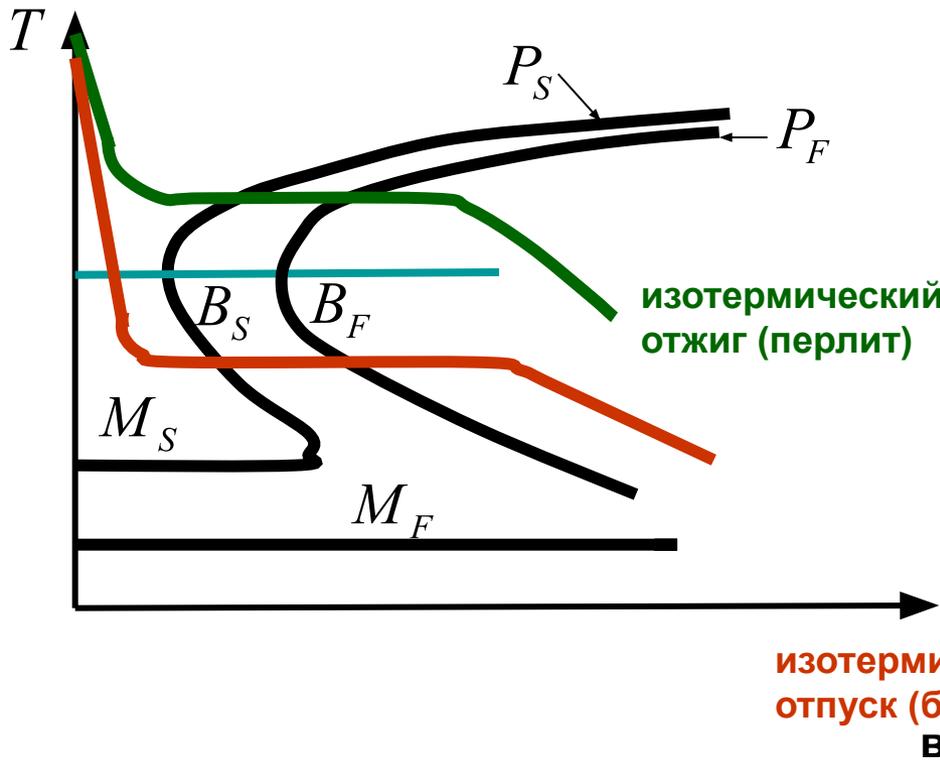
При высоких температурах диффузия как атомов углерода, так и железа достаточно сильна, и образуется пластинчатый перлит.

Бейнитное (промежуточное) превращение.

РОСТ БЕЙНИТА. При температурах ниже **550°** диффузия атомов железа уже отсутствует, а диффузия атомов углерода еще достаточно сильна. Вместо перлита формируется другая структура (перисто-игольчатая)- **бейнита**.

5 типов структур при перлитном и бейнитном превращениях

1. Выше носа образуется **перлит**. По мере понижения **T** структура перлита становится тоньше:



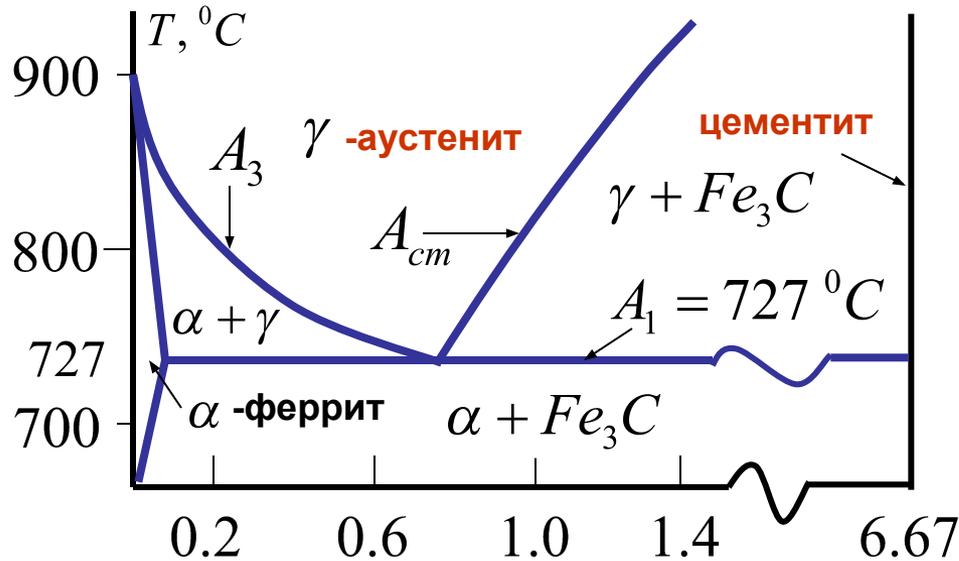
(выше 650 – собственно перлит,
от 590 до 640- сорбит,
от 550 до 580 – троостит).

2. При температуре ниже “носа” С-образной кривой вместо перлита образуется **бейнит**.

от 400 до 550 – верхний (перистый) бейнит
от 270 до 400 – нижний (игольчатый) бейнит

Термообработка до- и за-эвтектоидных сталей

При описании процессов термообработки используются специальные обозначения:



A₁ - эвтектоидная температура.

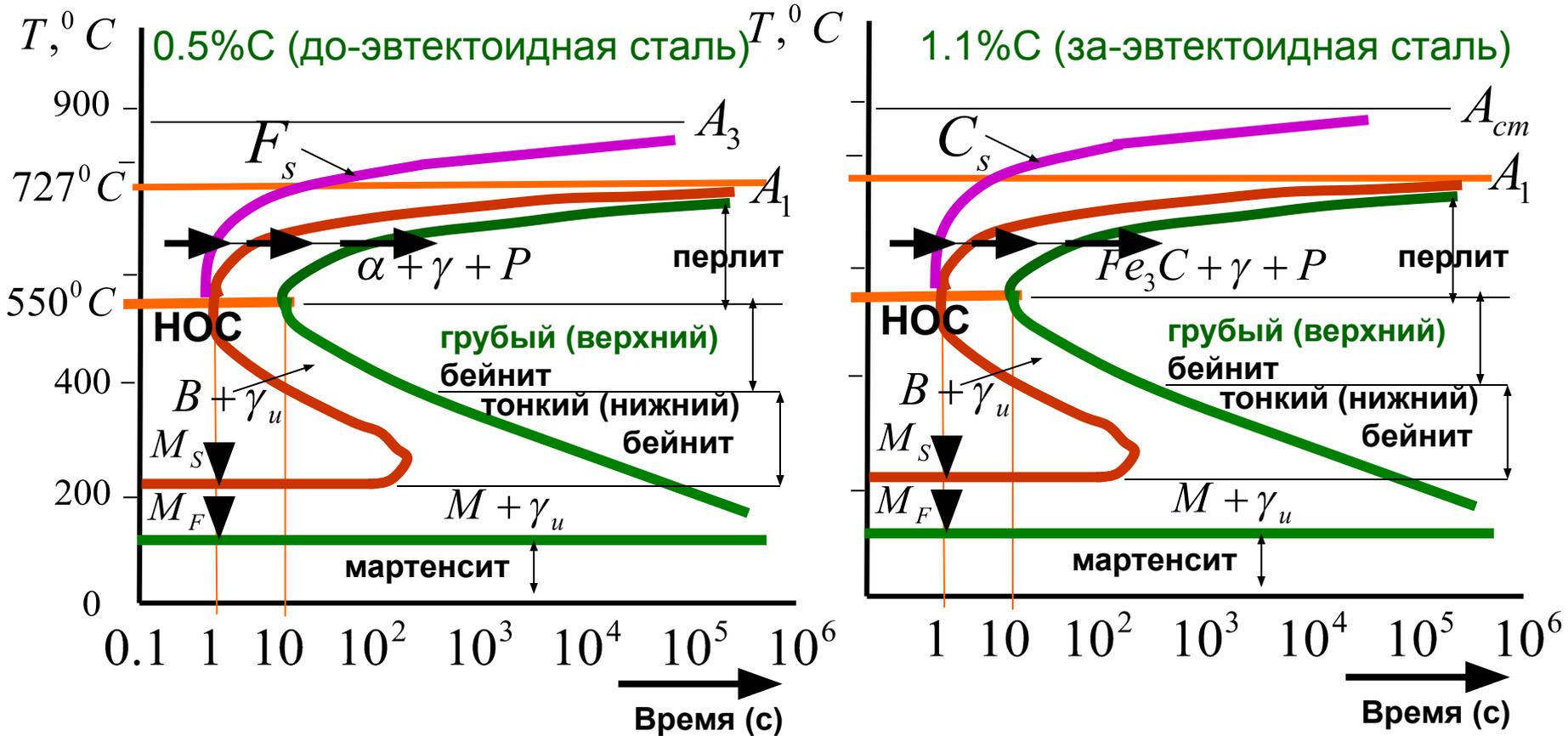
A₃ - температура, при которой при охлаждении начинает образовываться α - феррит

A_{cm} - температура, при которой начинает образовываться цементит.

Выбор вида тепловой обработки основывается на соответствующих ДИП.

В ДИП для до- и за-эвтектоидных сталей появляется еще одна область, соответствующая зарождению первичного феррита или цементита. Она называется «крылом».

ДИП для до- и за-эвтектоидной стали



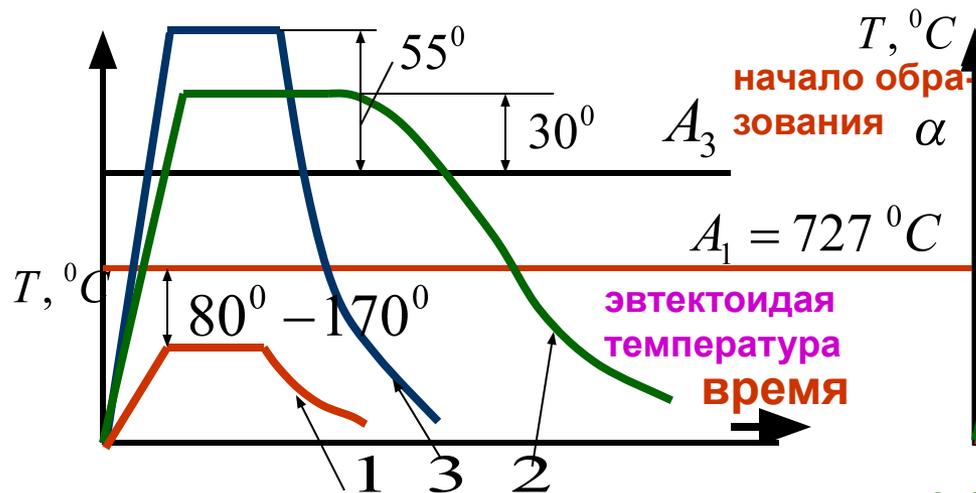
“Крыло” (сиреневое) появляется, начиная с “носа”, и асимптотически стремится к A_3 (для **до-эвтектоидной** стали) и к A_{cm} (для **за-эвтектоидной** стали). Эта кривая представляет собой время начала превращения для **феррита** F_s или **цементита** C_s . В интервале температур от A_1 до “носа” зарождается первичный **феррит** (или **цементит**) и растет до тех пор, пока не достигнет равновесного содержания. Остаток аустенита затем превращается в **перлит**. Ниже “носа” образуется только **бейнит**.

Для до- и за- эвтектоидных сталей существует много видов термообработки.

Мы рассмотрим только 4 вида простой тепловой обработки таких сталей, имеющих важное значение для улучшения их свойств:

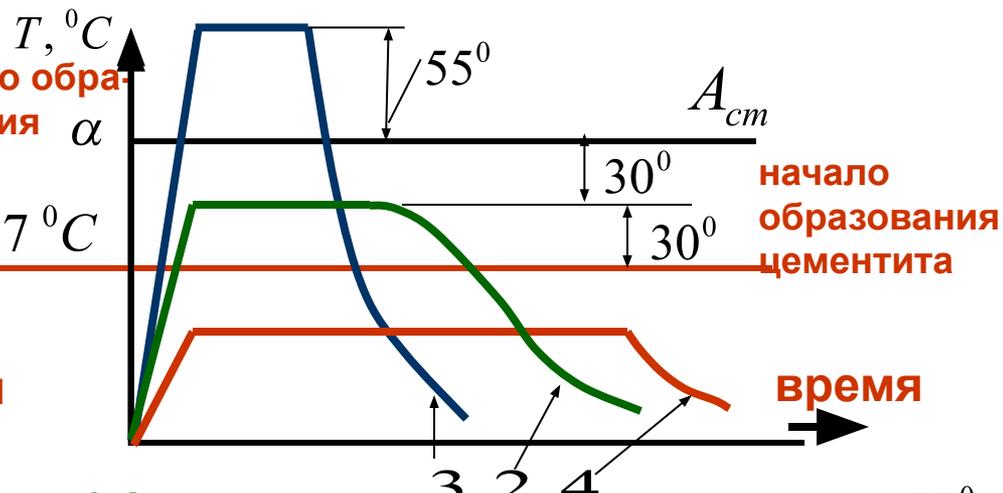
- 1. Низкотемпературный отжиг (отпуск);**
- 2.Высокотемпературный отжиг;**
- 3.Нормализацию;**
- 4.Сфероидизирующий отжиг.**

Для до-эвтектоидной стали:



- Отпуск** - это низкотемпературный нагрев для устранения результатов холодной обработки, который производится ниже A_1 (обычно на $80^\circ - 170^\circ$).
- При **отжиге** сталь сначала нагревается на 30° выше A_3 , чтобы образовался однородный аустенит. Этот шаг называется **аустенизацией**. Затем сталь очень медленно охлаждается в печи, образуя грубозеренный перлит.
- При **нормализации** сталь нагревается на 55° выше A_3 для **аустенизации** и затем охлаждается в воздухе более быстро, чем при отжиге, образуя тонкий перлит.

Для за-эвтектоидной стали:



- Аустенизацию проводят при t -ре на 30° выше A_1 , производя аустенит и цементит. Это предотвращает образование хрупкой пленки цементита на границах зерен, которая образуется при медленном охлаждении γ -аустенита. И для до-, и для за-эвтектоидной стали медленное охлаждение в печи дает низкую прочность и высокую пластичность.
- Сфероидизация** используется для высокоуглеродистых сталей, которые плохо поддаются машинной обработке. Она заключается в выдержке в течение нескольких часов на 30° ниже A_1 (кривая 4). При этом цементит вырастает в виде больших сферических зерен в матрице мягкого феррита.

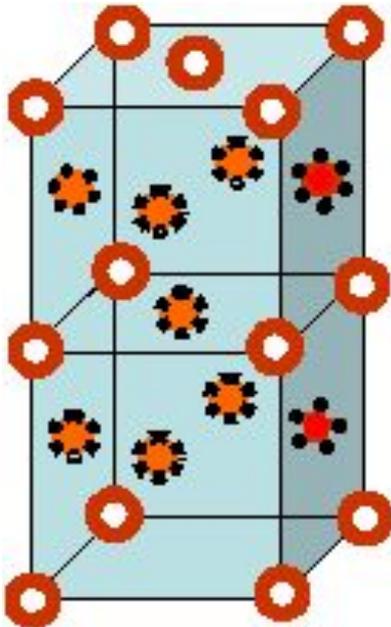
Мартенситное превращение

Мартенсит – метастабильная фаза, образующаяся в стали и ряде других металлов путем бездиффузионного сдвигового превращения. **Мартенсит образуется в стали с высоким содержанием углерода. При этом ГЦК структура аустенита превращается в пересыщенную ОЦТ (объемно-центрированную тетрагональную) структуру мартенсита.** Атомы сдвигаются на расстояния порядка постоянной решетки. Поскольку диффузия отсутствует, то мартенситное превращение происходит очень быстро. **Скорость превращения достигает скорости звука (несколько км/с).**

Решетки аустенита и мартенсита

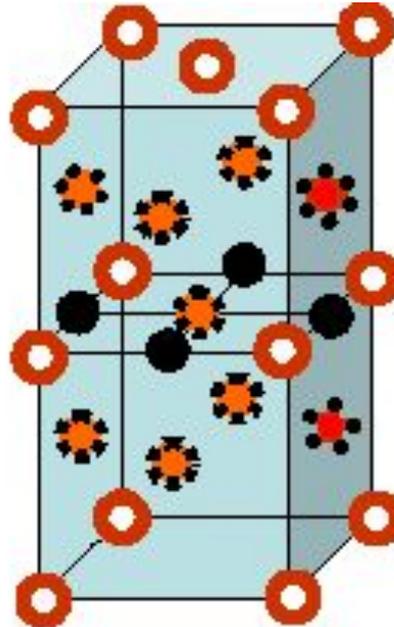
1. Атомы железа в

ГЦК аустените



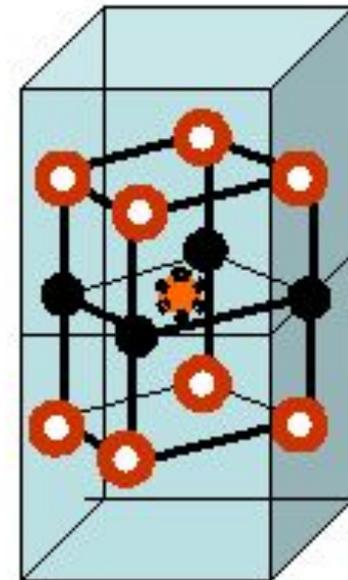
2. Возможные положения

атомов углерода



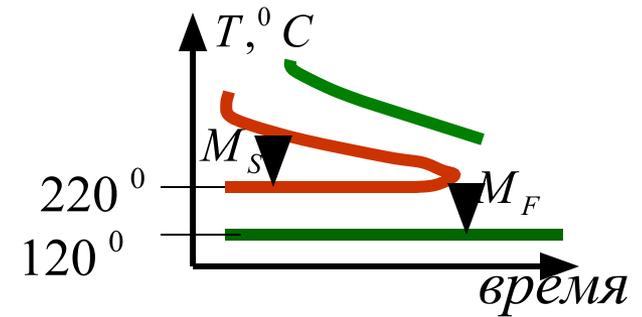
3. ОЦТ

мартенсит

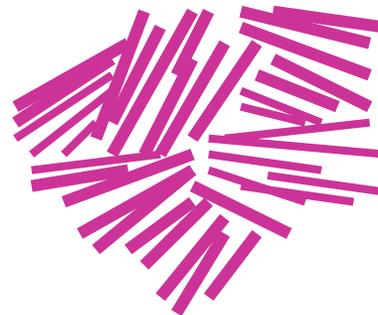
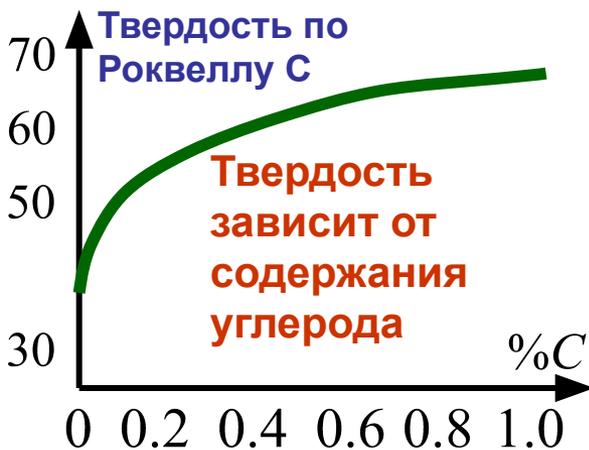


Для получения **мартенсита** аустенит должен быть **закален** (т.е. быстро охлажден), для предотвращения образования **перлита** или **бейнита**.

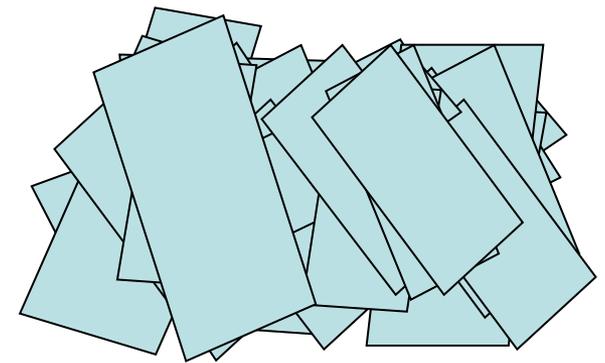
Мартенситное превращение начинается после охлаждения ниже $M_S = 220^\circ C$ (см. ДИП). Количество мартенсита возрастает по мере понижения температуры. При $M_F = 120^\circ C$ закаленная сталь содержит 100% мартенсита.



Свойства мартенсита: он очень твердый и хрупкий. ОЦТ решетка не имеет плотноупакованных граней скольжения, по которым могли бы двигаться дислокации. **Мартенсит сильно пересыщен углеродом.** Обычно железные сплавы содержат до **0.0218%** углерода при комнатной температуре, но мартенсит содержит все количество углерода, присутствующее в стали. Мартенсит имеет тонкую зеренную структуру с еще более тонкой субструктурой.



низкоуглеродистая сталь содержит "планки" и "пучки"



высокоуглеродистая сталь содержит "пластинки". Ее твердость много выше.

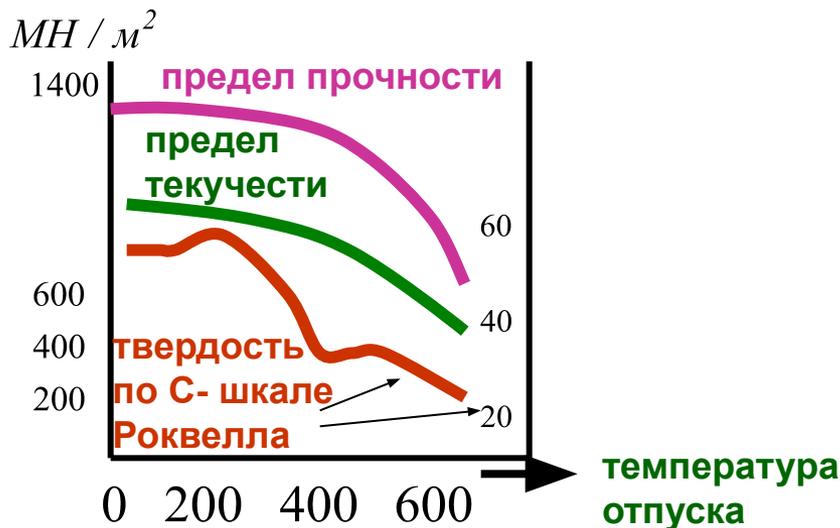
Отпуск стального мартенсита

Отпуск мартенсита - это **низкотемпературная обработка**, используемая для управления **прочностью и пластичностью** сплава путем разложения мартенсита на равновесные фазы.

Различают **2 вида отпуска**:

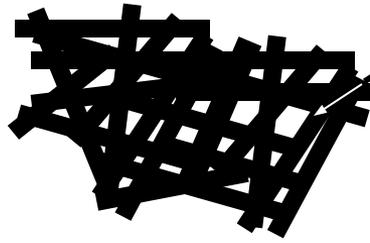
При **низких температурах** отпуска мартенсит может образовать **2 переходные фазы: низкоуглеродистый мартенсит и неравновесный карбид железа ϵ** . Тогда сталь **получается достаточно прочная, хрупкая и даже более твердая, чем до отпуска**.

При **высоких температурах** отпуска образуются стабильные **α и Fe_3C** сталь становится более мягкой и пластичной. Разложение мартенсита при высоких температурах отпуска понижает прочность и твердость, но **повышает пластичность и ударопрочность**.



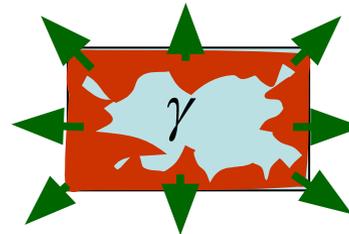
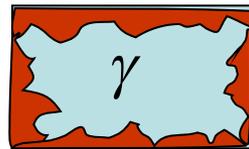
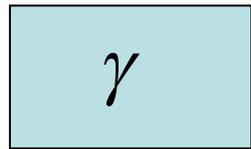
Выбором подходящей температуры отпуска получают стали с широким выбором свойств.

Сложные виды закалки мартенсита: ступенчатая закалка на мартенсит .

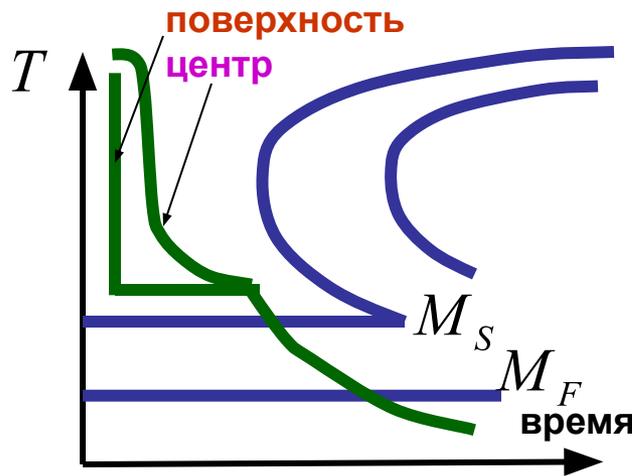


Мартенсит имеет более низкую плотность, чем аустенит. Образование мартенсита приводит к **большому объемному расширению**. Оставшийся аустенит остается между мартенситными иглами (черными).

Вследствие изменения объема возникают **остаточные напряжения**. При закалке поверхностные слои охлаждаются быстрее и раньше превращаются в мартенсит. Когда потом начинается превращение γ -аустенита в центре, твердая поверхность будет находиться в напряжении. В результате на поверхности возникают **трещины**.

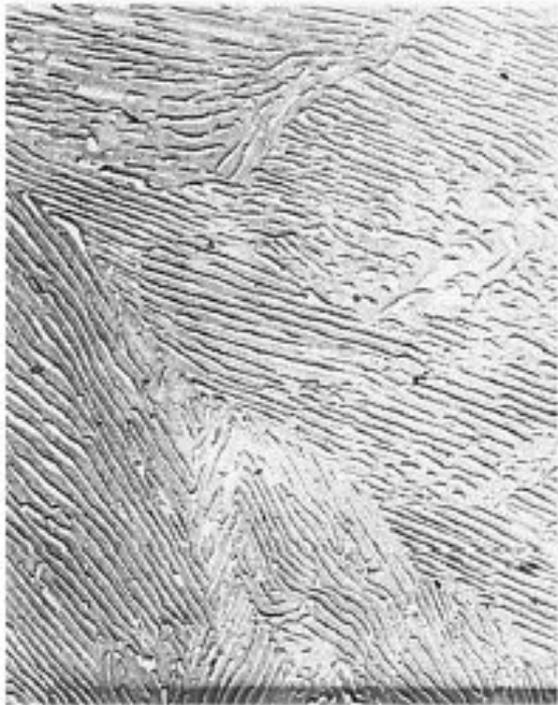


мартенсит



Чтобы избежать образования трещин, необходимо охладить сталь только до температуры чуть выше M_S и поддерживать ее постоянной до тех пор, пока температура центра и поверхности не сравняется. После этого при охлаждении до температуры M_F происходит образование мартенсита одновременно по всему объему. При таком охлаждении трещины не образуются. Такой режим называется **ступенчатой закалкой на мартенсит**.

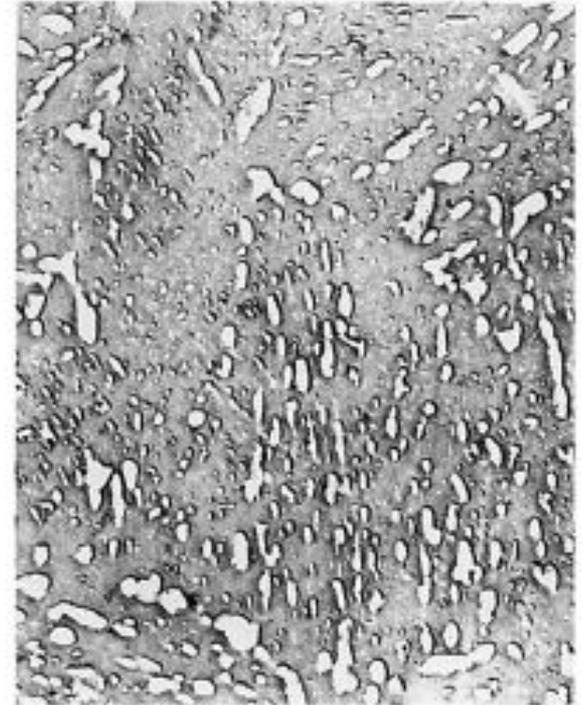
Микрофотографии (а) перлита, (b) бейнита и (c) отпущенного мартенсита (увеличение 7500). (*From The Making, Shaping, and Treating of Steel, 10th Ed. Courtesy of the Association of Iron and Steel Engineers.*)



(a)



(b)



(c)

Эффект памяти формы мартенситных структур

Для сплавов Ni-50%Ti и некоторых сплавов на основе меди специальной термо-механической обработкой можно получить мартенситную структуру.

Мартенситные структуры обладают эффектом памяти формы. В конце обработки сплав деформируют при той же самой температуре, придавая ему другую форму. Однако после нагревания металл возвращается к первоначальной форме.

Пример 1: Соединение труб



Пример 2: Ангиопластика (пластика сосудов)

