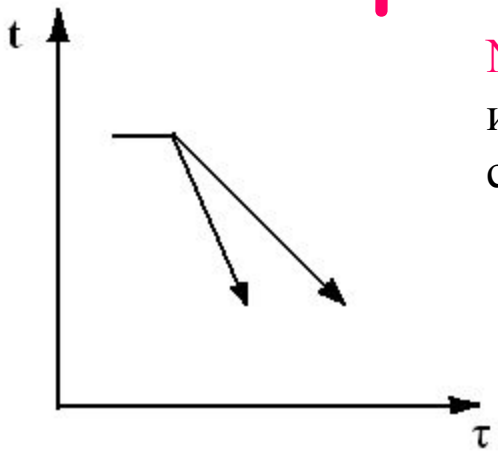
Теоретическое и прикладное материаловедение

Классификация видов термической обработки

Термическая обработка



NB! Вид термообработки определяется не характером изменения температуры во времени, а типом фазовых и структурных изменений в металле.

Бочвар Андрей Анатольевич

- Термическая обработка
  - Собственно термическая
    - Отжиг 1-го рода
    - Отжиг 2-го рода
    - Закалка без полиморфного превращения
  - Термомеханическая
    - Закалка с полиморфным превращением
    - Закалка с плавлением поверхности
  - Химико-термическая
    - Старение
    - Отпуск

Термическая обработка сплавов

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры.

Цель термообработки – придание сплавам таких свойств, которые требуются в процессе эксплуатации изделий.

Основные виды термической обработки: **отжиг, закалка, отпуск и старение.**

Все операции термообработки разделяются на ***разупрочняющие*** (отжиг) и ***упрочняющие*** (закалка с отпуском или старением).

Разупрочняющая термообработка

Отжиг – термическая обработка, в результате которой металлы или сплавы приобретают структуру, близкую к равновесной. Отжиг вызывает разупрочнение металлов, сопровождающееся повышением пластичности и снятием остаточных напряжений.

Отжиг заключается в нагреве изделий до определенной температуры, выдержке их при данной температуре с последующим медленным охлаждением вместе с печью. При этом заготовки или изделия получают устойчивую структуру без остаточных напряжений.

Цели отжига – снятие внутренних напряжений, устранение структурной и химической неоднородности, снижение твердости и улучшение обрабатываемости, подготовка к последующей операции термообработки.

Упрочняющая термообработка

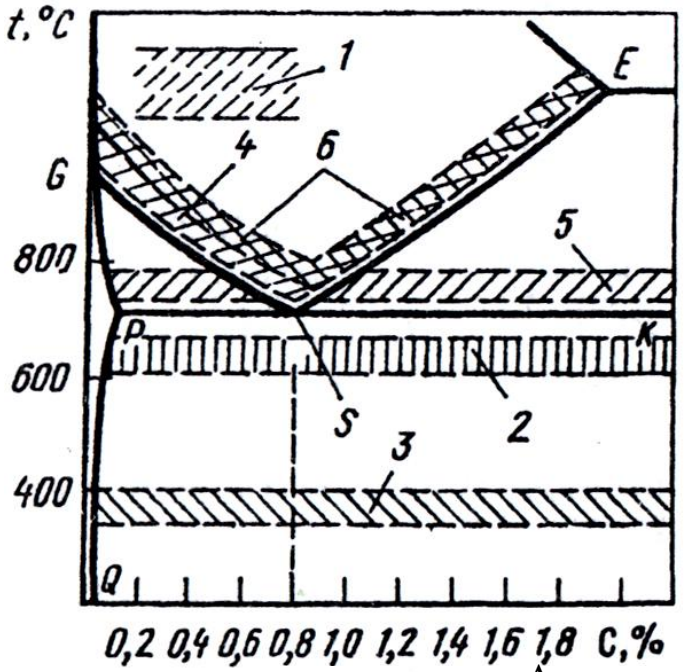
Закалка – ТО, в результате которой в сплавах образуется неравновесная структура пересыщенного твердого раствора.
Сплав нагревают выше температуры фазового превращения в твердом состоянии, после чего быстро охлаждают, чтобы предотвратить равновесное превращение при охлаждении.

Старение – ТО, в результате которой из пересыщенного твердого раствора выделяются мелкодисперсные частицы второй фазы, формирующие равновесную структуру. Старение закаленного сплава приводит к повышению прочности, без значительного снижения пластичности.

Отпуск –ТО, в результате которой в предварительно закаленном сплаве происходит фазовое превращение, приближающее его структуру к равновесной. После отпуска происходит распад пересыщенного твердого раствора, сформировавшегося при закалке. Отпущенная структура обеспечивает более высокие механические свойства по сравнению с отожженным состоянием.

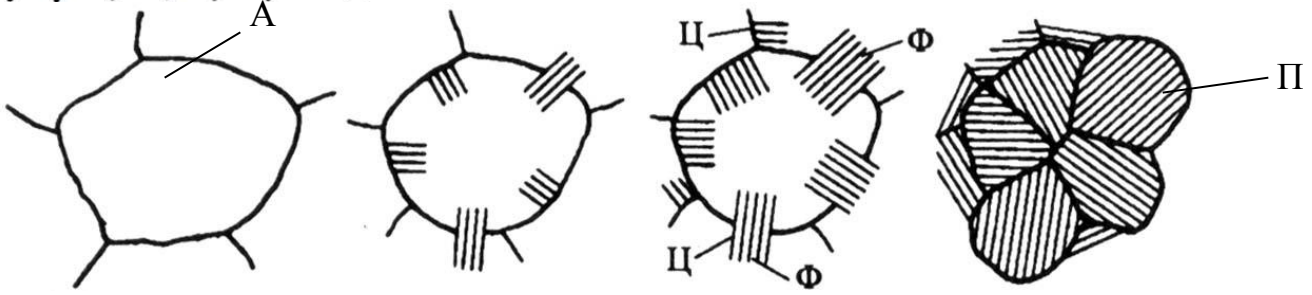
Отжиг стали

Отжиг стали проводят для получения требуемой равновесной структуры. Изделие нагревают до нужной температуры и охлаждают вместе с печью.



Области нагрева стали при отжиге:

1 – диффузионном;
2 – рекристаллизационном;
3 – для снятия напряжений;
4 – полном;
5 – неполном;
6 – нормализационном.



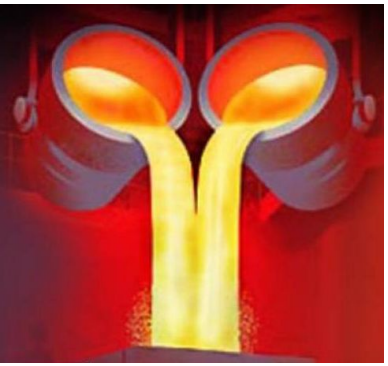
Структурные превращение в эвтектоидной стали при полном отжиге

ОТЖИГ ПЕРВОГО РОДА

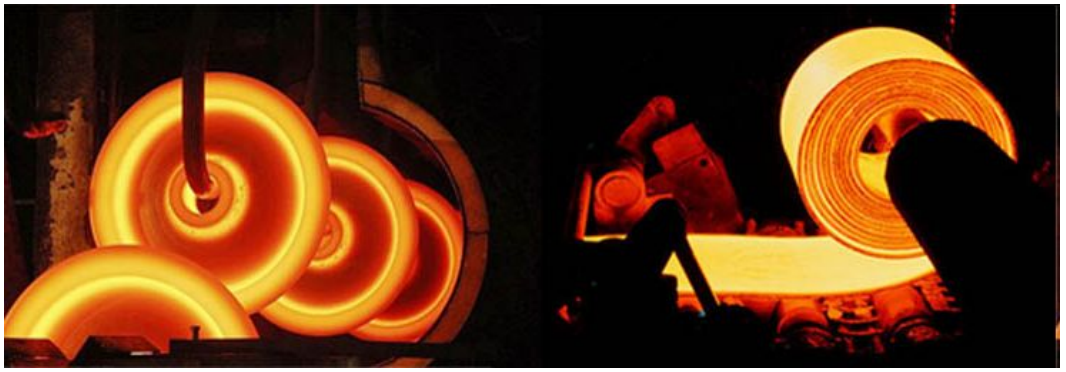
Отжиг первого рода частично или полностью устраняет отклонения от равновесного состояния, возникшие при предыдущей обработке, причем его поведение ***не обусловлено фазовыми превращениями.***

Основные параметры отжига 1-го рода - температура нагрева и время выдержки

Отжигу первого рода, предшествует следующая обработка:

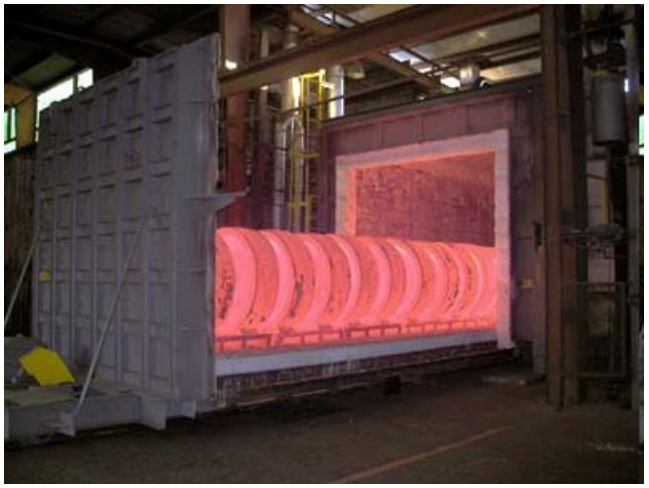


Литье



Обработка давлением

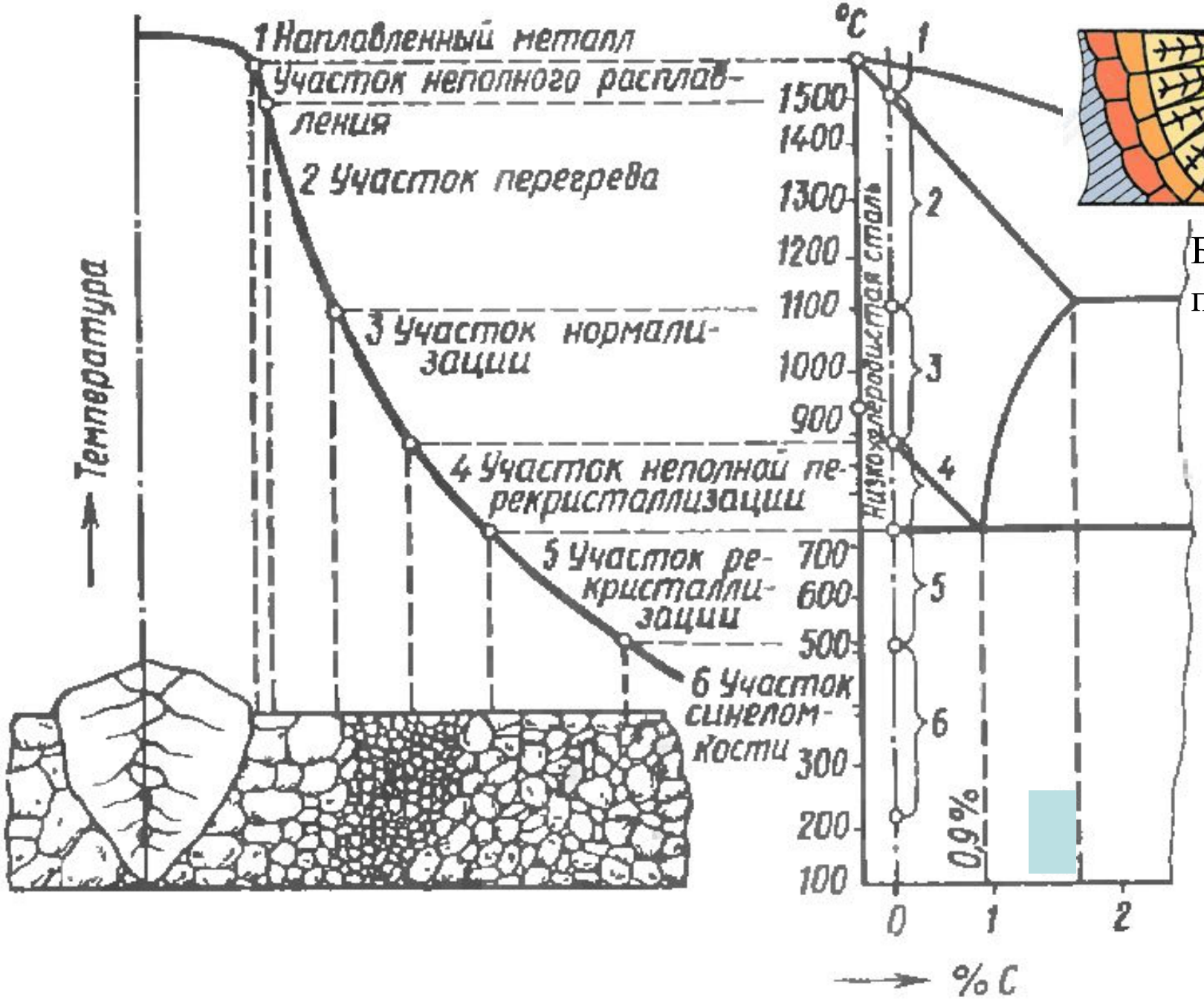
Сварка



Термическая обработка (нагрев)

и различные другие технологические процессы …

Структура сварного шва стали с 0,2 % С



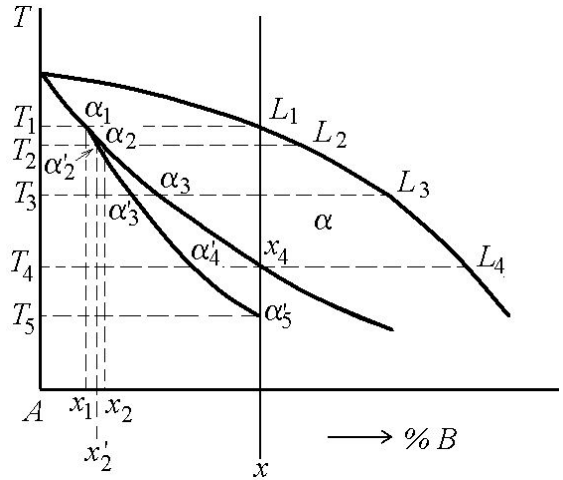
Без фазовых превращений

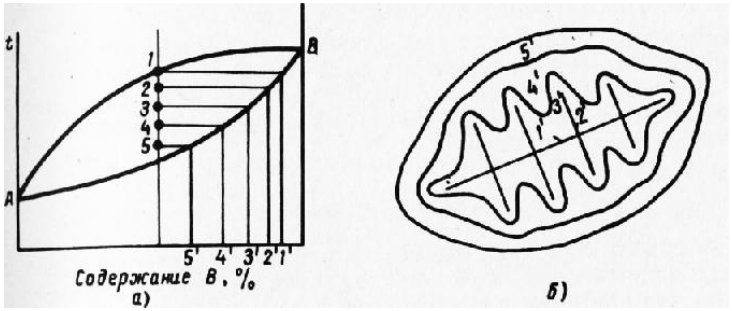
Гомогенизационный отжиг

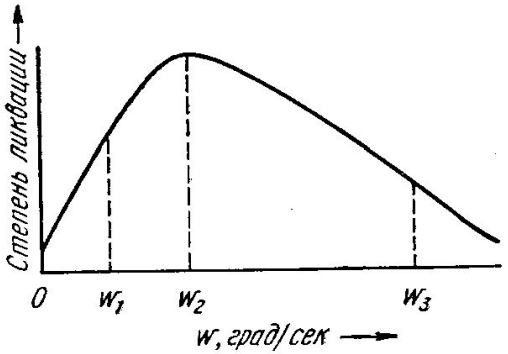
Гомогенизационный отжиг - ***это термическая обработка, при которой главным процессом является устранение последствий дендритной ликвации (последствий химической неоднородности)***

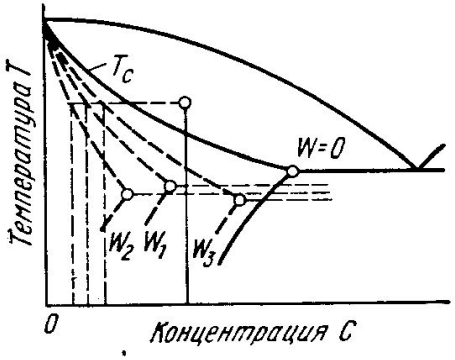
Отклонение от равновесия в процессе кристаллизации литого сплава приводит к следующим недостаткам:

1. Пластичность падает, если в результате ликвации появилась избыточная хрупкая фаза.









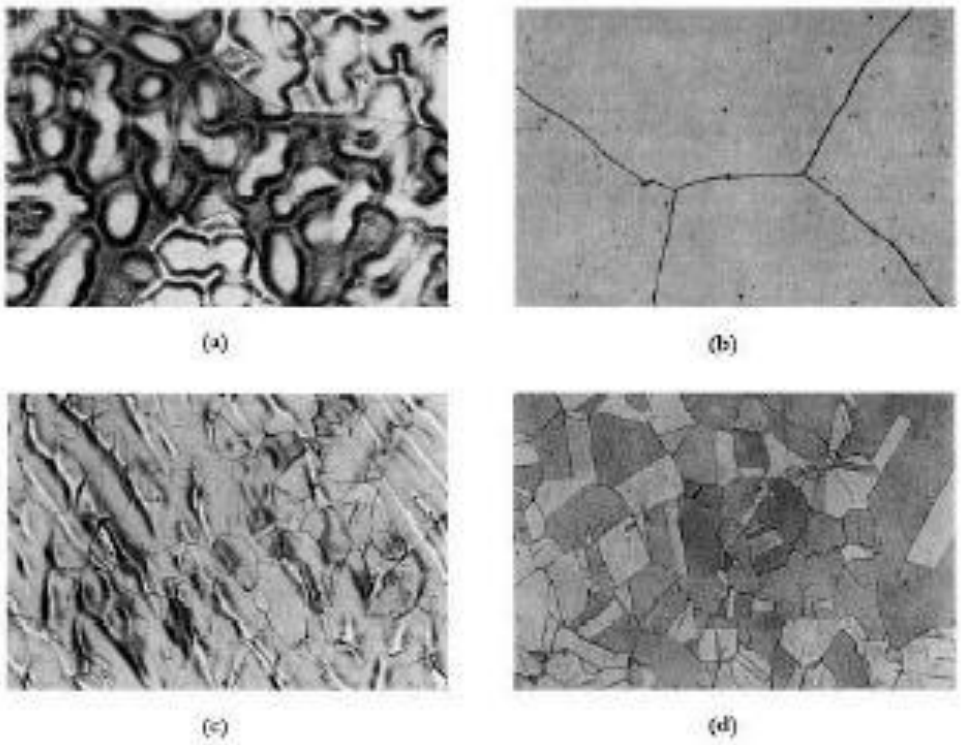
2. Образуются микрогальванические пары. Внутрикристаллитная ликвация твердого раствора снижает стойкость против электрохимической коррозии.

Гомогенизационный отжиг

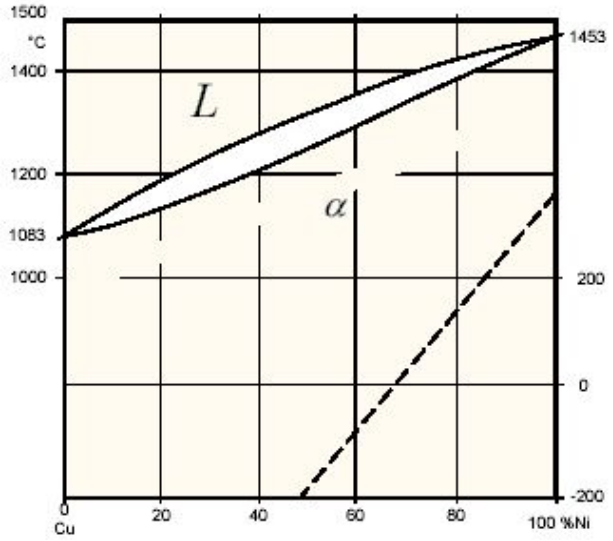
3. Дендритная ликвация понижает температуру солидуса сплава, что как правило нежелательно. Оплавляются участки, в которых находится неравновесно образовавшаяся эвтектика.

4. Структура и свойства литого сплава нестабильны во времени. Эти процессы вызывают ускорение ползучести, а также постепенное изменение свойств, которые может выйти за допустимые пределы.

Гомогенизационный отжиг

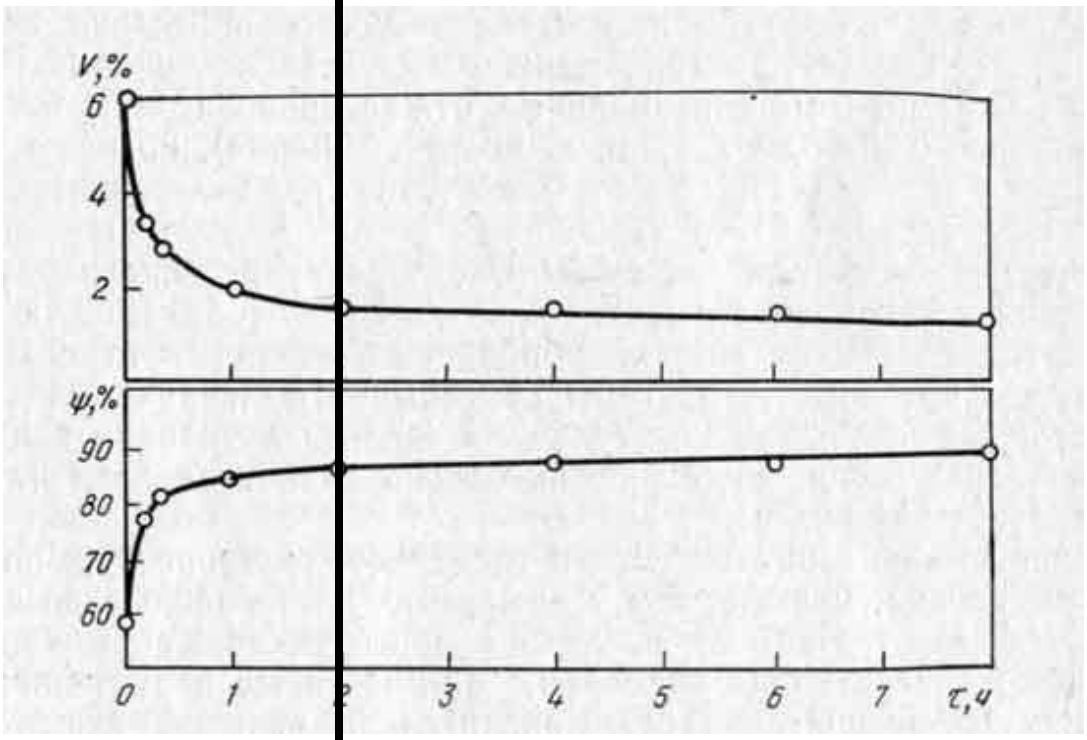


Сплав Cu-10%Ni:
(a) литой, (b) литой и отожженый 1100°C/ 30 мин,
(c) литой, 50% деформация+отжиг 850°C/ 4 часа,
(d)литой, 50% деформация+отжиг 850°C/25 часов.



Гомогенизационный отжиг проводят при температурах выше 0,90-0,95 Т пл.

Гомогенизационный отжиг



Объемная доля растворяющихся структурных составляющих и относительного сужения от времени гомогенизации

Поток диффундирующего вещества пропорционален градиенту концентрации.
Для идеального раствора:
Диффузионные потоки разных компонентов не взаимодействуют.

Время полной гомогенизации сокращается, если:

1. Увеличить температуру отжига;
2. Изменение микроструктуры:
   - увеличение скорости кристаллизации сплава;
   - обработка давлением

Восходящая диффузия.
Для многокомпонентных сплавов движущая сила – градиент хим. потенциала. (активность компонента).

Побочные структурные изменения при гомогенизационном отжиге

1. **Рост зерна**

   В сплавах может вырастать крупное зерно. Так в сталях после отжига, который проводится при высоких температурах вырастает крупное зерно аустенита.

   Способы борьбы:

   - обработка давлением;
   - отжиг 2-го рода;
   - нормализация для измельчения зерна.

2. **Коагуляция избыточных фаз**

   Избыточные фазы, которые неспособны полностью раствориться при температуре гомогенизации, коагулируют (объединяются) и округляются с увеличением длительности отжига.

Побочные структурные изменения при гомогенизационном отжиге

3. Гетерогенезация структуры

При гомогенизации многокомпонентной системы, при данной температуре, может оказаться низкой растворимость компонентов не входящих в избыточные неравновесные фазы и находящиеся после кристаллизации в основном твердом растворе. Тогда при гомогенизационном отжиге протекает два процесса:

- растворение неравновесного избытка фаз в ненасыщенном по отношению к ним твердом растворе (гомогенизация);

- выделение других фаз из пересыщенного по отношению к ним твердого раствора (гетерогенезация).

Побочные структурные изменения при гомогенизационном отжиге

4**. Развитие вторичной пористости**

Основная причина – выделение водорода из пересыщенного им твердого раствора, образовавшегося при быстрой кристаллизации.

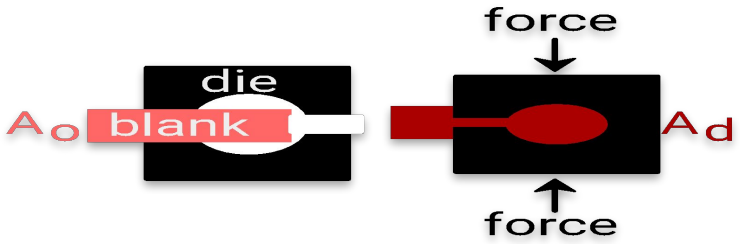
Диффузионная пористость (эффект Киркендалла) – неравенство встречных потоков атомов разных компонентов. Появляются избыточные вакансии, и соответственно, пористость.

Пластическая деформация

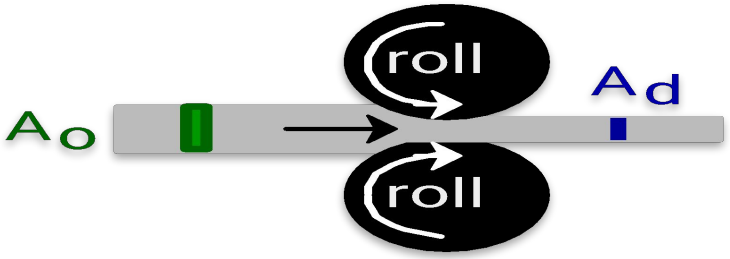
- Деформация при комнатной температуре
  - Основные техники деформации для изменение поперечного сечения деталей

$$f(\%) = \left(\frac{F_0 - F_d}{F_0} \right) \times 100$$

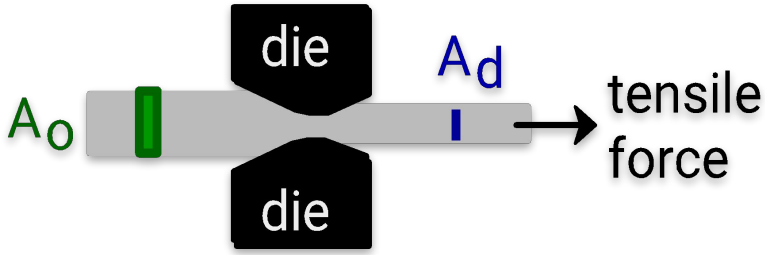
Ковка



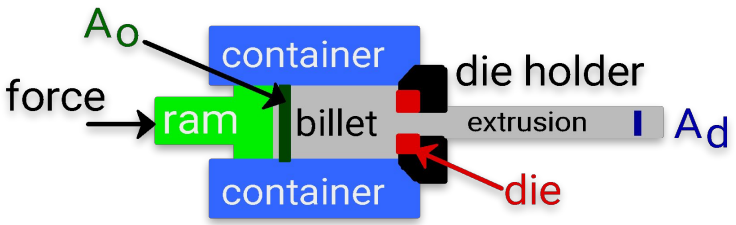
Прокатка



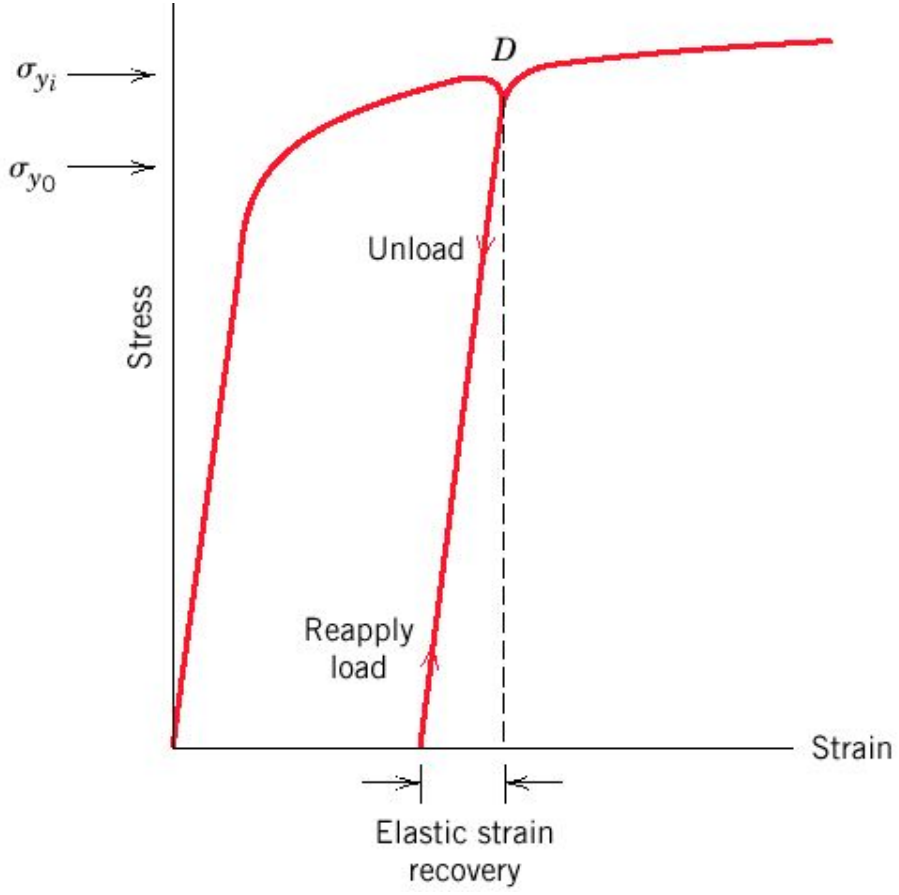
Волочение



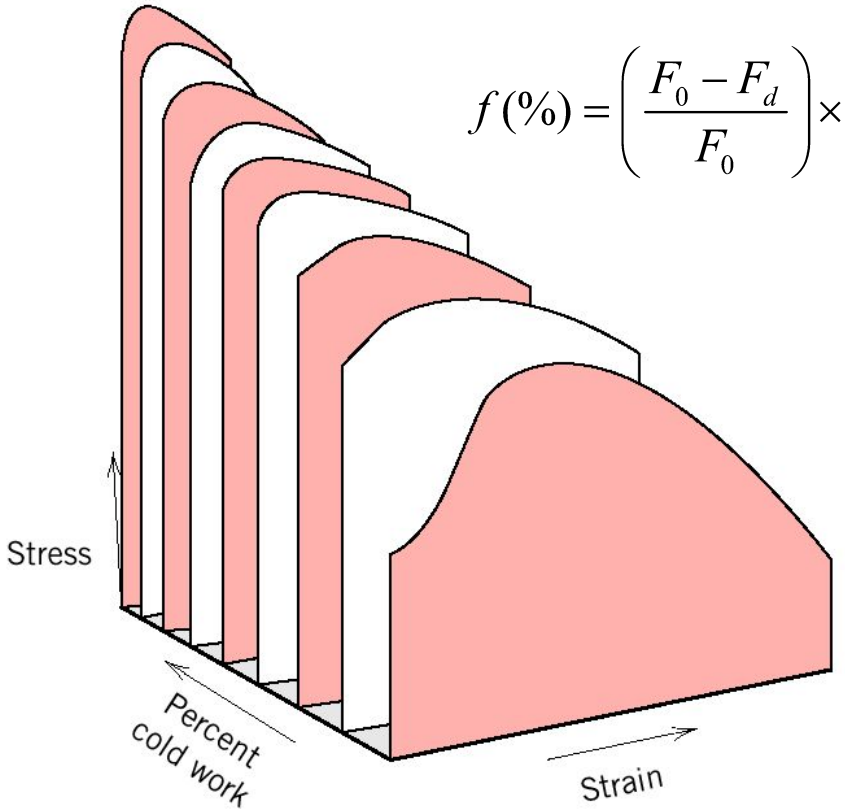
Прессование



Пластическая деформация и деформационное упрочнение



$$f(\%) = \left(\frac{F_0 - F_d}{F_0} \right) \times 100$$

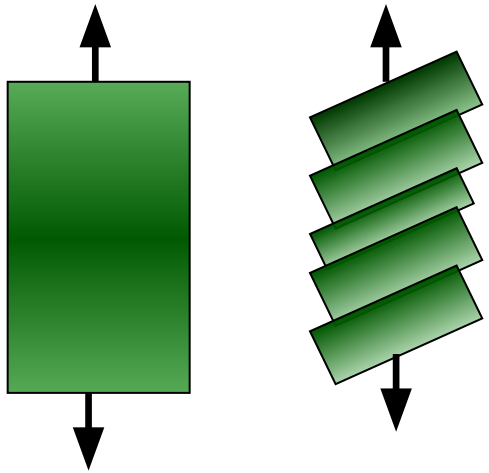


Новый предел текучести σ_{yi} , больший чем первоначальный, σ_{y0}.

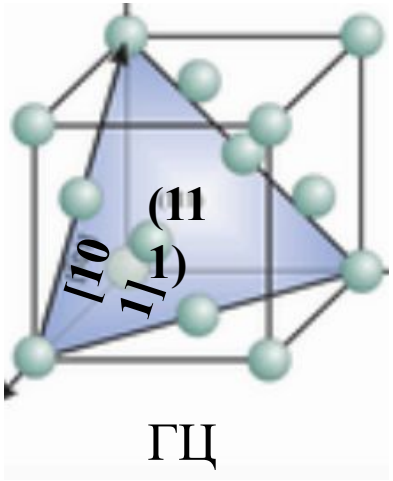
Причина деформационное упрочнение.

ФИЛЬМ, 1:53 – 7:35

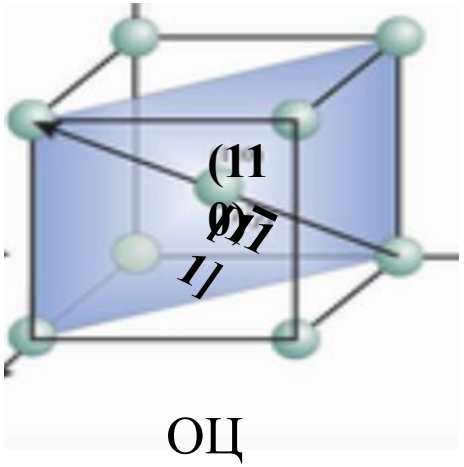
Деформация скольжением



Плоскости и направления скольжения



ГЦ К

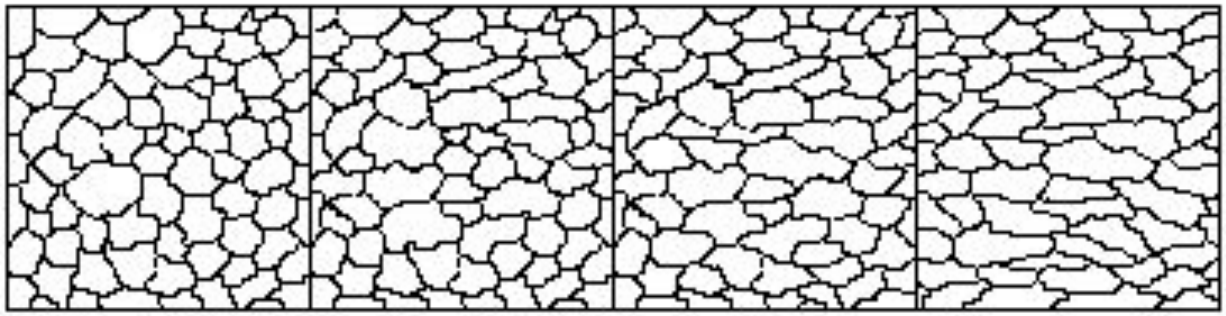


ОЦ К

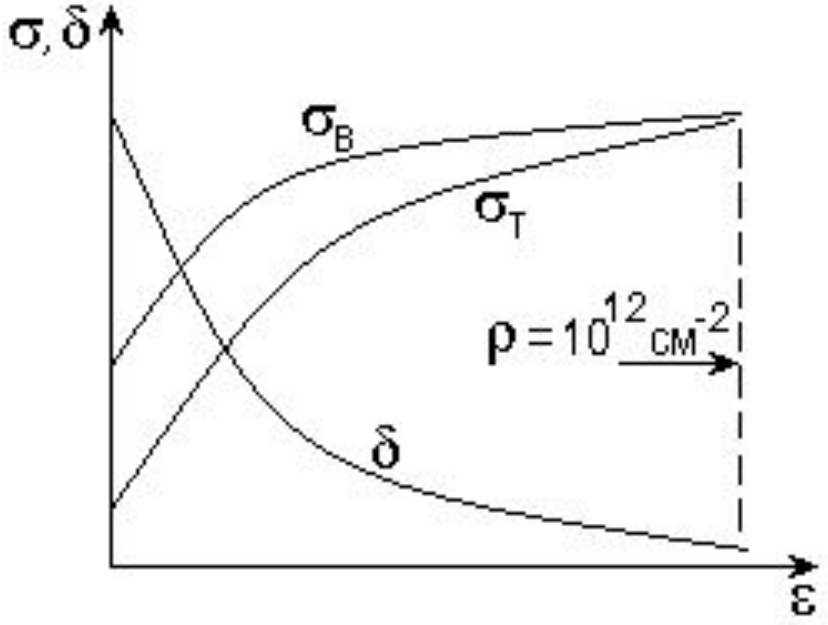
Преимущественная пространственная ориентировка кристаллической решетки зерен называется **текстурой**

При интенсивной деформации возникает текстура деформации

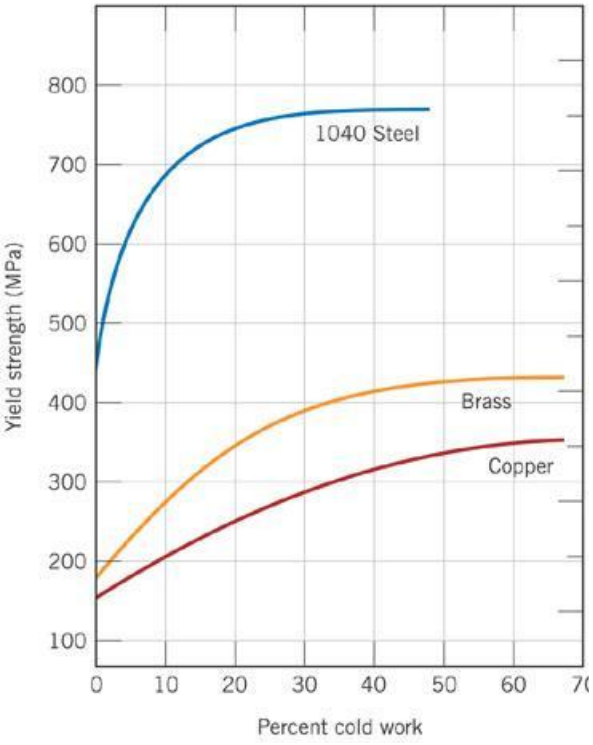
Изменение микроструктуры и свойств металла при наклепе

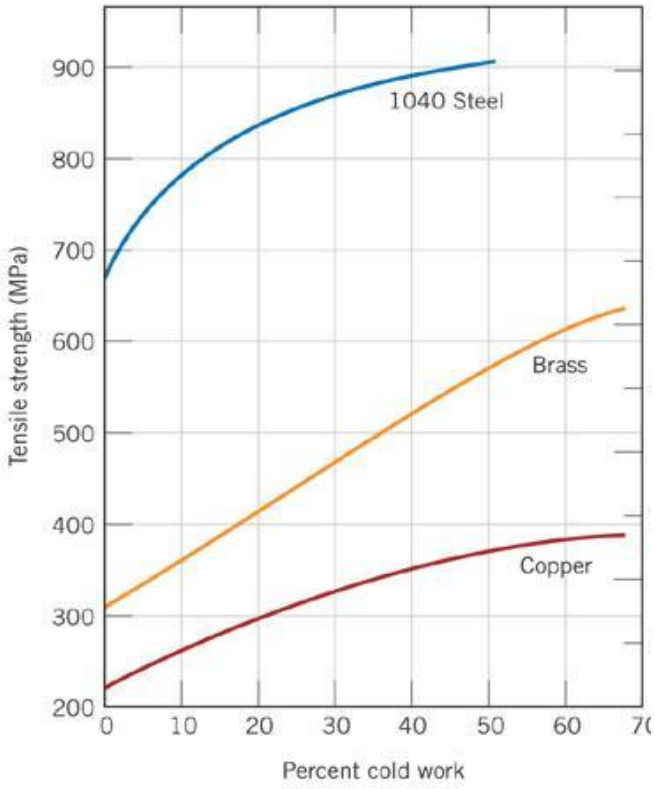


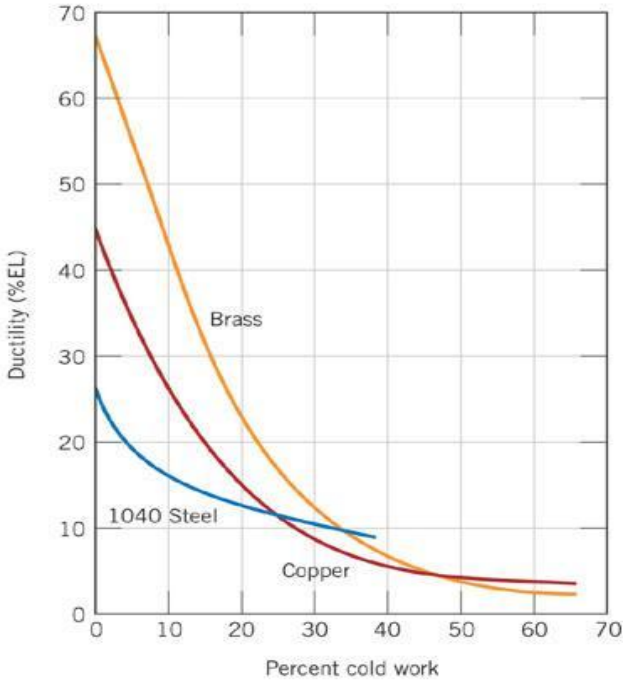
Холодная деформация проводится при температурах 0,15-0,2 Тпл



Изменение свойств при наклепе







Наклеп = упрочнение и снижение пластичности!

Нагрев после деформации

- **Пластическая деформация увеличивает плотность дислокаций и изменяет распределение зерен по размерам**
- **Появляется, запасенная энергия (поля напряжений от дислокаций+деформация зерен)**
- **Снятие внешнего напряжения: большая часть дислокаций и связанная с ними деформационная энергия сохранена.**
- **Нагрев деформированного металла:**

  Возврат и рекристаллизация, с последующим ростом зерен.

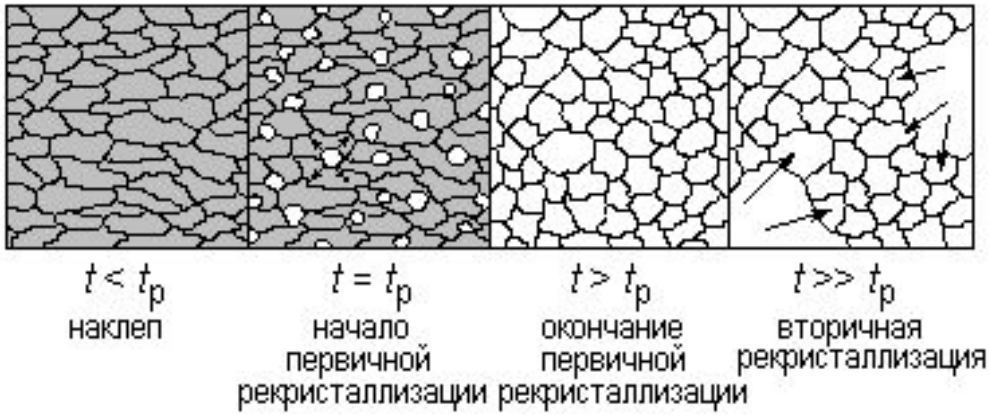
Рекристаллизационный отжиг - это термическая обработка деформированного металла или сплава, при которой главным процессом является рекристаллизация.

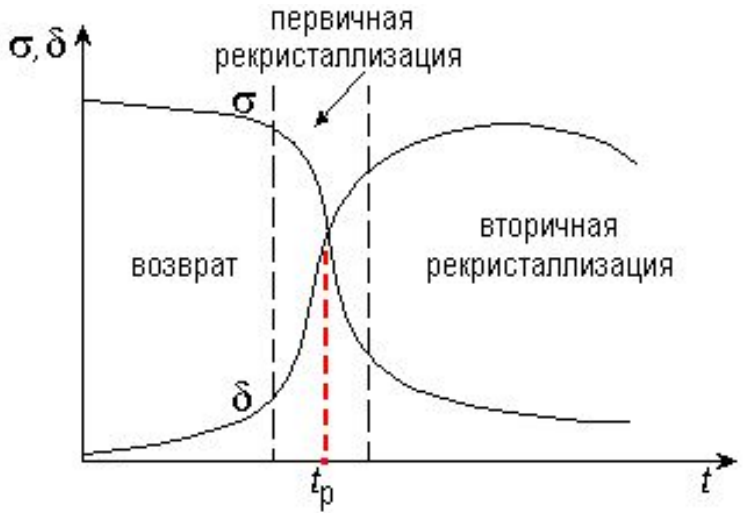
Дорекристаллизационный отжиг – это термическая обработка деформированного металла или сплава, при которой главным процессом является возврат.

Совокупность любых самопроизвольных процессов изменения плотности и распределения дефектов в деформированных кристаллах до начала рекристаллизации называют возвратом.

Если возврат протекает без образования и миграции субграниц внутри деформированных зерен, то его называют возвратом первого рода, или отдыхом. Если же при возврате внутри деформированных кристаллитов **формируются** и мигрируют малоугловые границы, то его называют возвратом второго рода, или полигонизацией.

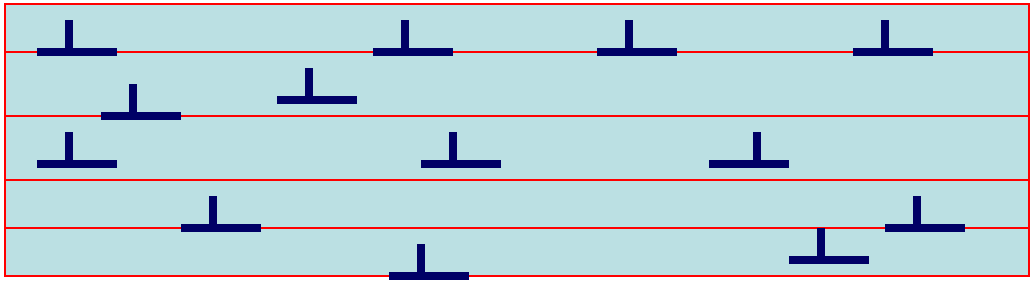
Изменение микроструктуры и свойств деформированного металла при нагреве





Пример: монокристалл

Состояние I – полный отжиг



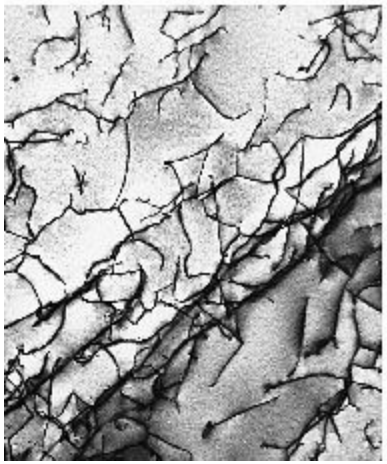
Довольно прочный и пластичный

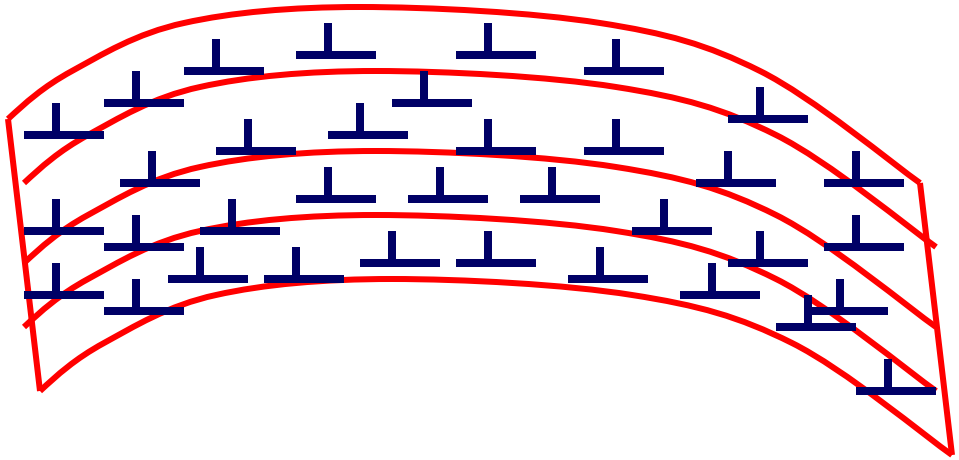
$\rho_{\perp} = 10^6/см^2$

Малая внутренняя энергия – стабильное состояние

Наклеп

Состояние II: наклеп





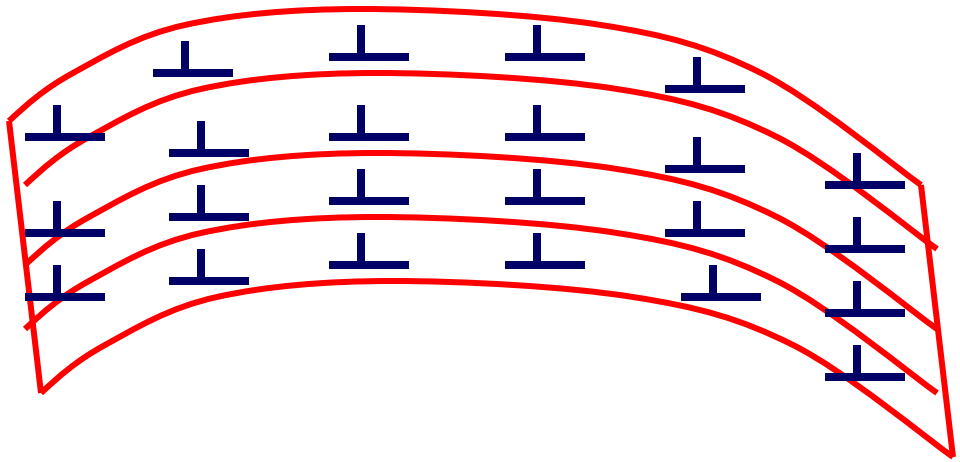
Очень прочный и хрупкий

$\rho_{\perp} = 10^{10\text{-}12}/cm^2$

Высокая внутренняя энергия – нестабильное состояние

Нагрев до ~0,25-0,3 $T_{пл}$

Состояние III:Возврат (отдых)



$\rho_{\perp} = 10^8/cm^2$

Упорядочение дислокаций:

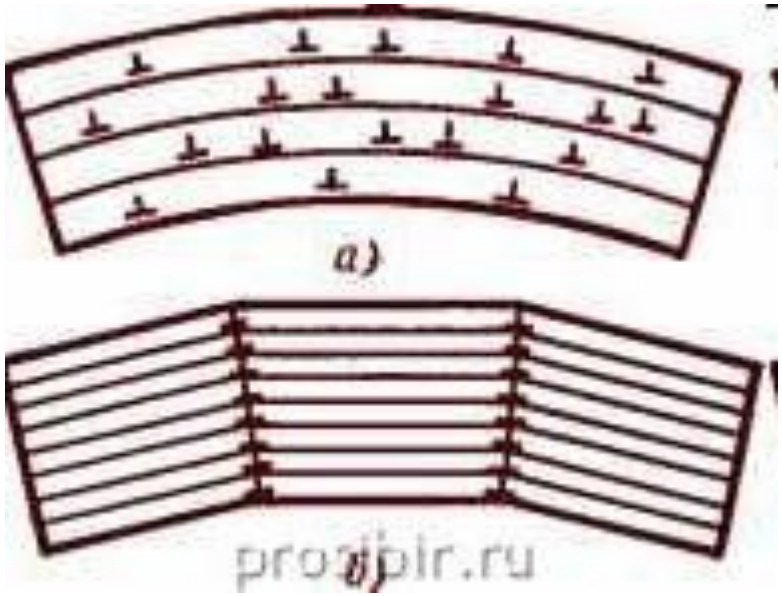
Полигонизация!

Прочный и более пластичный,
чем после наклепа

Внутренняя энергия понижена

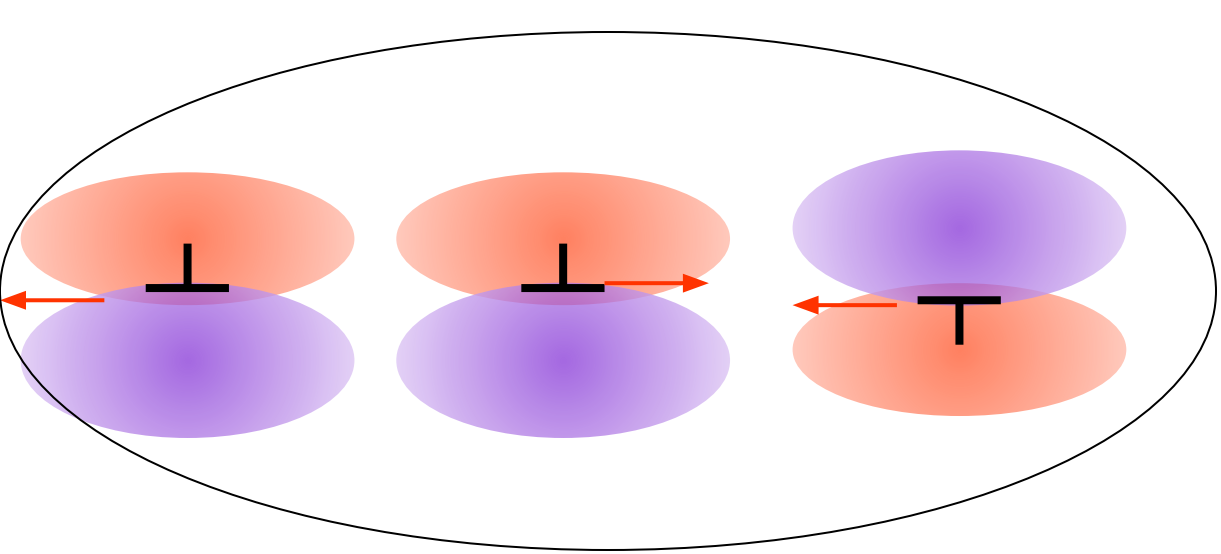
Состояние III:Возврат (Полигонизация)

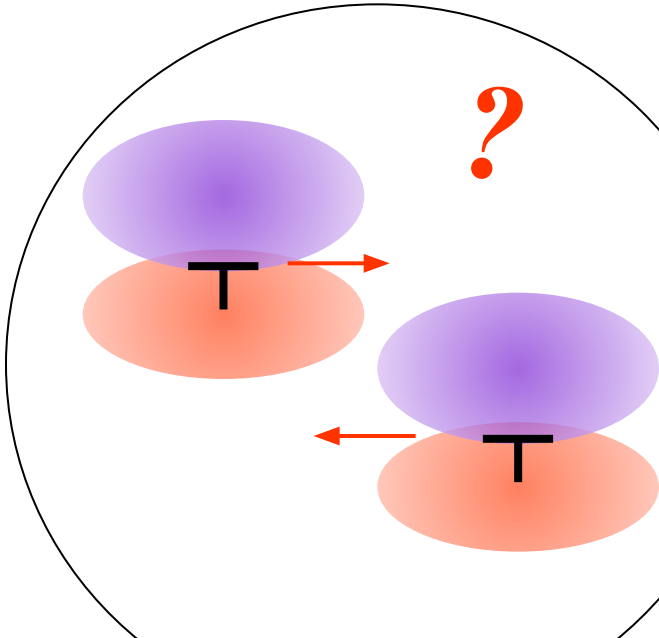
стадия возврата, при которой в пределах каждого кристалла образуются новые малоугловые границы. (скольжением и переползанием дислокаций разделяет кристалл на "субзерна-полигоны", свободные от дислокаций)



Взаимодействие дислокаций

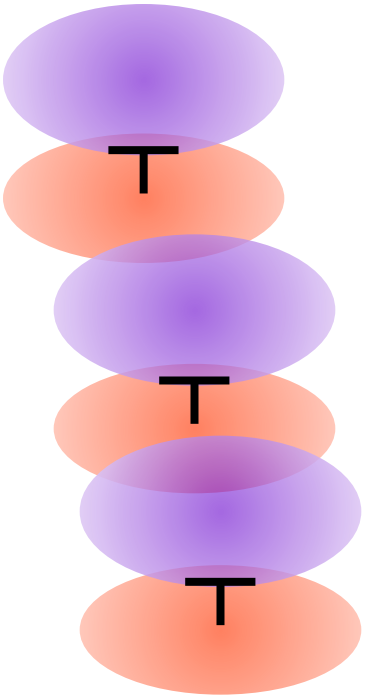
- ***Притягиваются*** ⊥ с противоположным вектором сдвига, лежащие в одной плоскости скольжения, при сближении уничтожают друг друга (***аннигиляция***).
- Если ⊥ лежат в разных плоскостях скольжения, для аннигиляции требуется переползание
- ***Отталкиваются*** с одинаковым **b.**





Взаимодействие дислокаций

- ***Притягиваются*** ⊥ с одинаковым **b**, лежащие в разных плоскостях скольжения



Стенка дислокаций

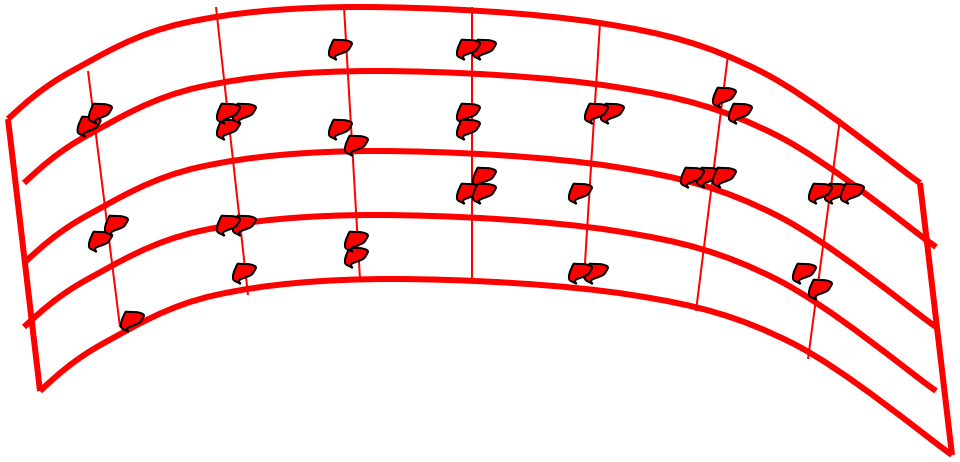
Результат = разориентировка блоков и зерен – ***граница субзерна***

Нагрев до ~0.5 $T_{пл}$+выдержка

Состояние IV: Начало рекристаллизации

$\rho_{\perp} = 10^6/cm^2$

Образуются новые, не деформированные зерна, по механизму зарождения и роста



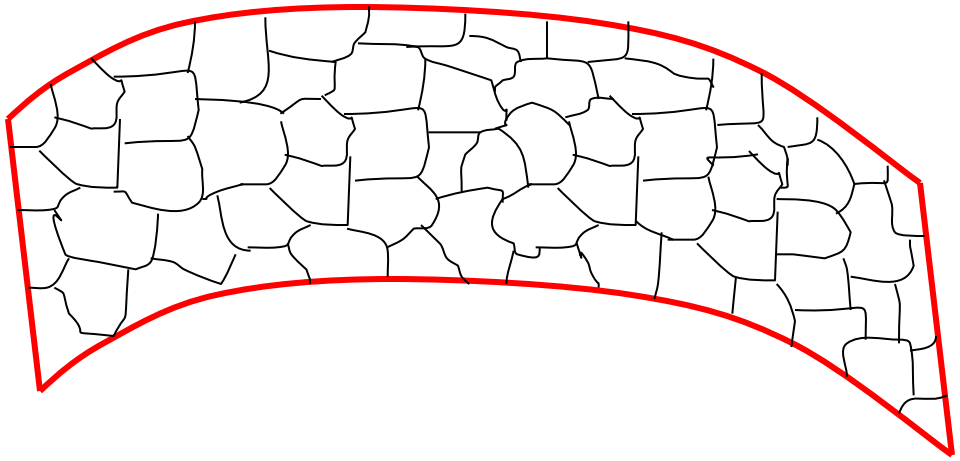
Более прочный по сравнению с исходным кристаллом и достаточно пластичный

Дальнейшее понижение внутренней энергии

Нагрев до ~0.5 $T_{пл}$+выдержка

Состояние V: Полная рекристаллизация

$\rho_{\perp} = 10^6/cm^2$
Рекристаллизованные зерна свободны от деформаций



Прочнее исходного монокристалла и достаточно пластичен

Малая внутренняя энергия – стабильное состояние

Рекристаллизация (I)

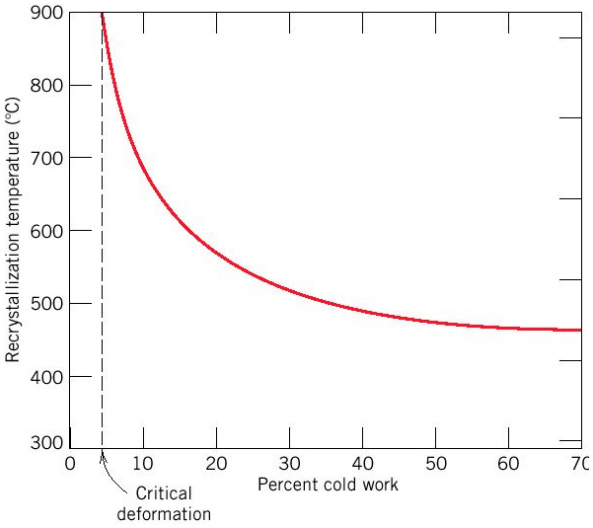
- После возврата, зерна могут быть все еще напряжены. При дальнейшем нагреве деформированные зерна поглощаются недеформированными
- Рекристаллизация: зарождение и рост новых, недеформированных зерен
- Движущая сила: разница во внутренних энергиях деформированного и недеформированного зерна
- Рост зерен диффузия. Степень рекристаллизации зависит от температуры и времени.
- Легирование замедляет процесс рекристаллизации

Рекристаллизация (II)

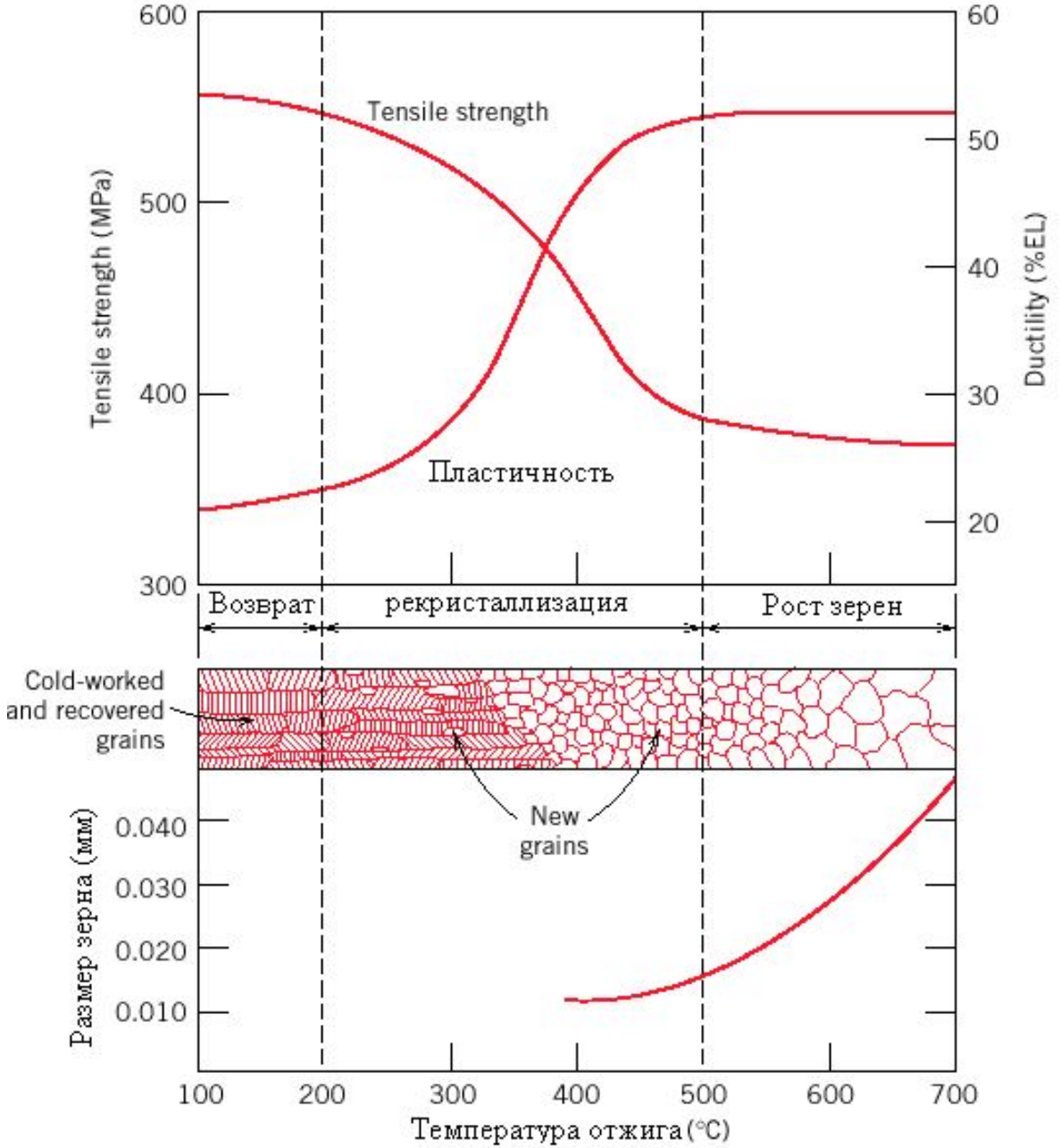
Температура рекристализации: температура при которой процесс рекристаллизации заканчивается в течении часа.

Обычно 1/3 - 1/2 от температуры плавления (в некоторых сплавах может достигать 0.7 $T_{пл}$).

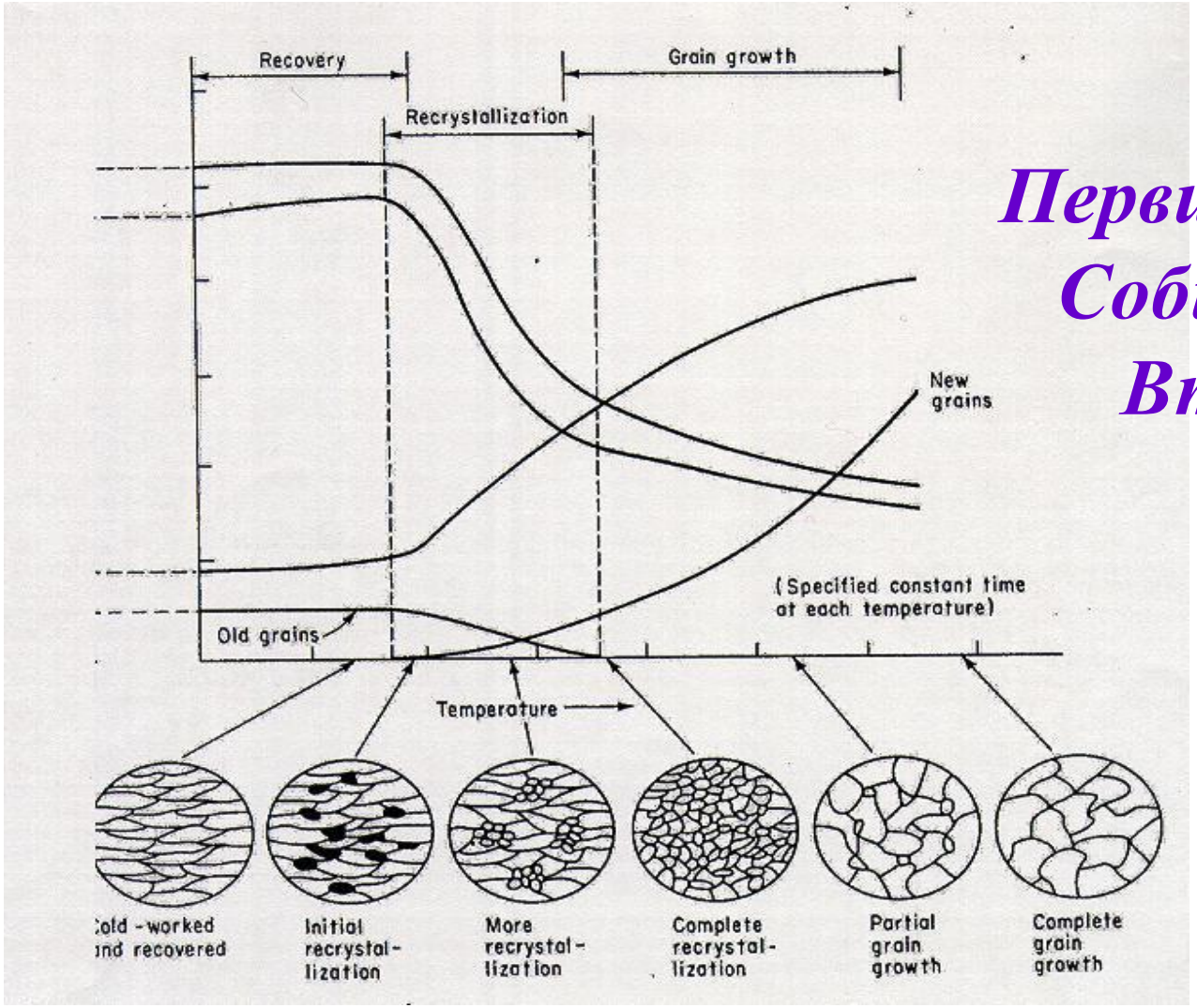
Т рекристаллизации уменьшается при увеличении наклепа. Меньше «критической деформации», рекристаллизация не протекает.



Рекристаллизация (III)



Три основных стадии рекристаллизации



Первичная стадия
Собирательная
Вторичная.

Первичная стадия

процесс замены деформированных зерен более совершенными (мелкими, равноосными) зернами той же фазы.

начало - образование центров рекристаллизации,

конец - с исчезновением последнего деформированного зерна

Движущая сила ?

"энергия, аккумулированная в наклепанном металле.
Система стремится перейти в устойчивое состояние с неискаженной кристаллической решеткой"

= энергия дефектов внутри зерна

Температура первичной рекристаллизации.

При больших степенях деформации: $T_{Р} = \alpha \cdot T_{ПЛ}$,

α - коэффициент, зависит от состава и содержания примесей;

$T_{ПЛ}$ - температура плавления, К.

металлы 0.3-0.4, твёрдые растворы 0.5-0.8, высокочистые 0.1

Первичная рекристаллизация

⇒ Образование новых неискаженных кристаллитов в деформированном материале.

⇒ Формирование областей "*свободных от дислокаций*" или значительно более совершенных, чем окружающая матрица (= *зародыши или центры рекристаллизации*), отделенных от нее границами с большими углами разориентировки.

⇒ Зародыши рекристаллизации растут за счет окружающей деформированной матрицы.

Собирательная рекристаллизация

процесс роста одних рекристаллизованных зерен за счет других путем ***миграции границ зерен***

Движущая сила ?

энергия границ зерен (поверхностная)

- Зерна укрупняются более или менее равномерно.
- протяженность границ уменьшается
- углы в стыках зерен приближаются к 120^{o}
- протекает при температурах существенно более высоких, чем при первичной

Вторичная рекристаллизация

образование структуры с высокой ***неоднородностью*** размеров зерен и пониженными механическими свойствами

образование структуры, состоящей из множества сравнительно мелких зерен примерно одинакового размера и гораздо меньшего числа очень крупных зерен

аномальный рост отдельных зерен - «поедание» соседей

Движущая сила ?

энергия границ зерен (***поверхностная***)

как при собирательной рекристаллизации

Схема изменения микроструктуры материала (при нагреве):

а) б) в) г) д)

а - исходный материал;

б - начало первичной рекристаллизации;

в - завершение первичной рекристаллизации;

г, д - стадии собирательной рекристаллизации

Динамическая рекристаллизация

= первичная рекристаллизация непосредственно при (горячей) пластической деформации;

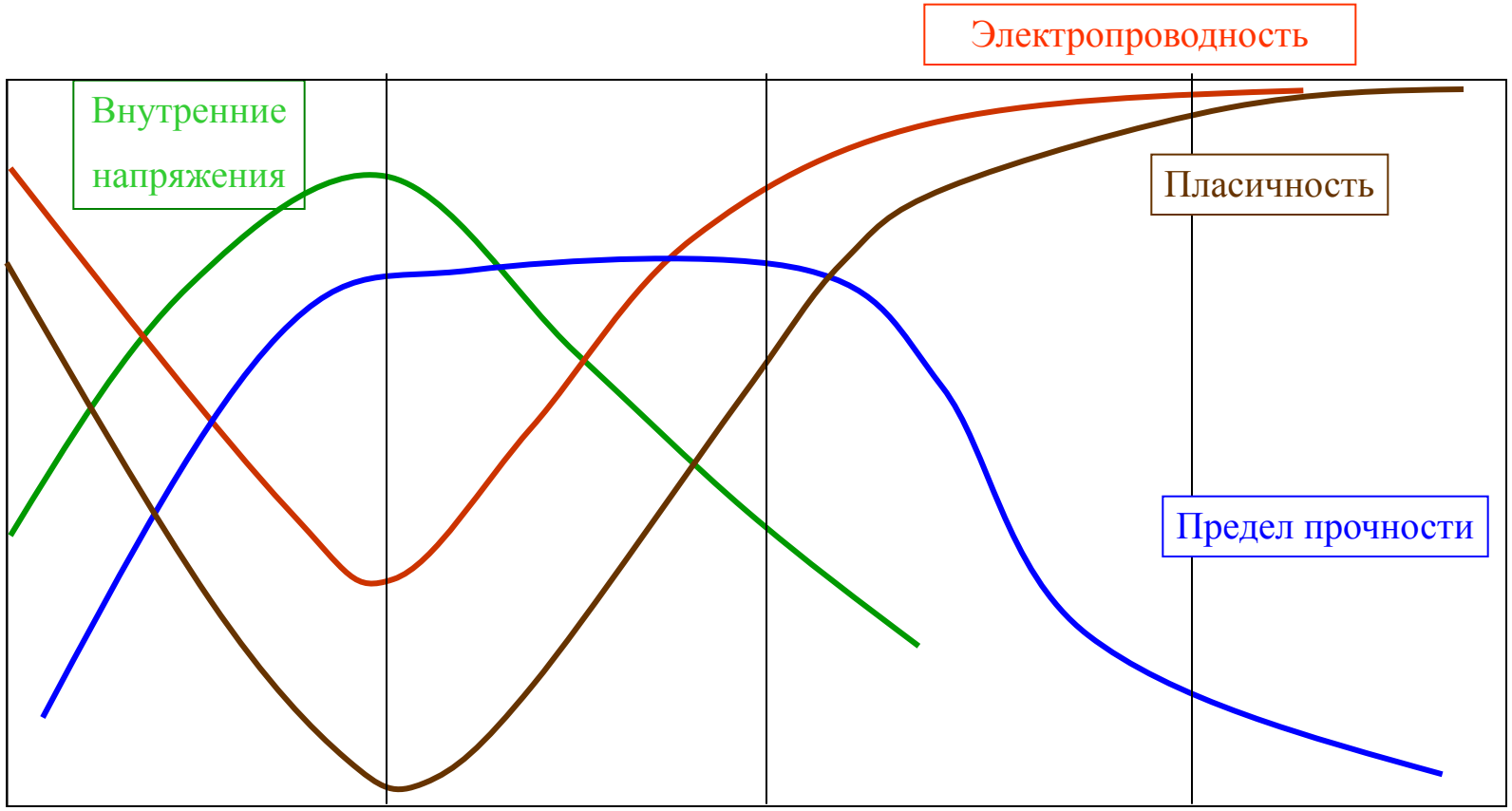
в появляющихся при рекристаллизации зернах во время их роста плотность дислокаций постепенно повышается при деформации

$\Rightarrow$ создаются условия зарождения новых рекристаллизационных зерен.

Движущая сила ?

Энергия дефектов внутри зерна,
поверхностная энергия границ зерен
работа деформации – внешний источник

Наклеп-возврат-рекристаллизация-рост зерна



Наклеп

Диаграмма рекристаллизации

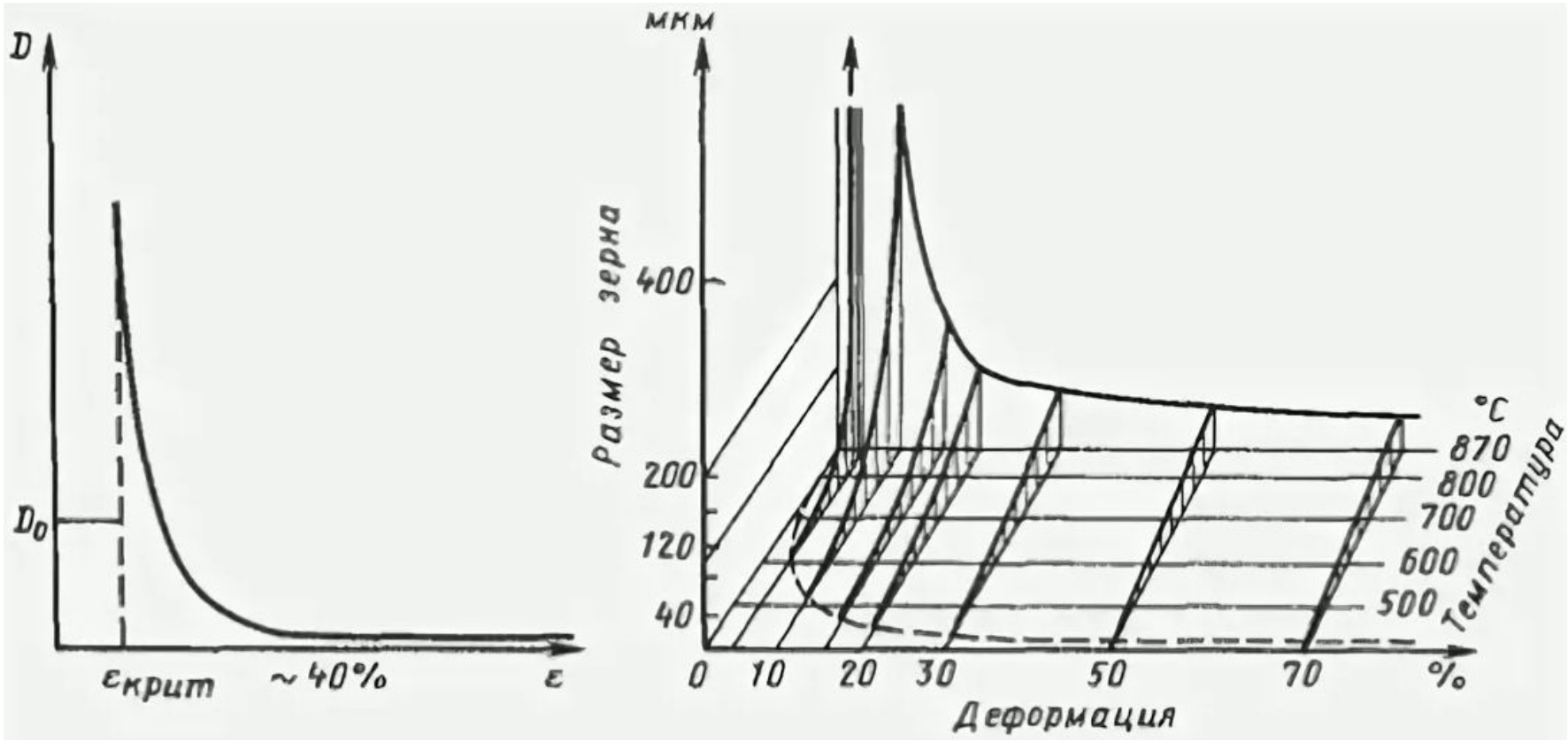
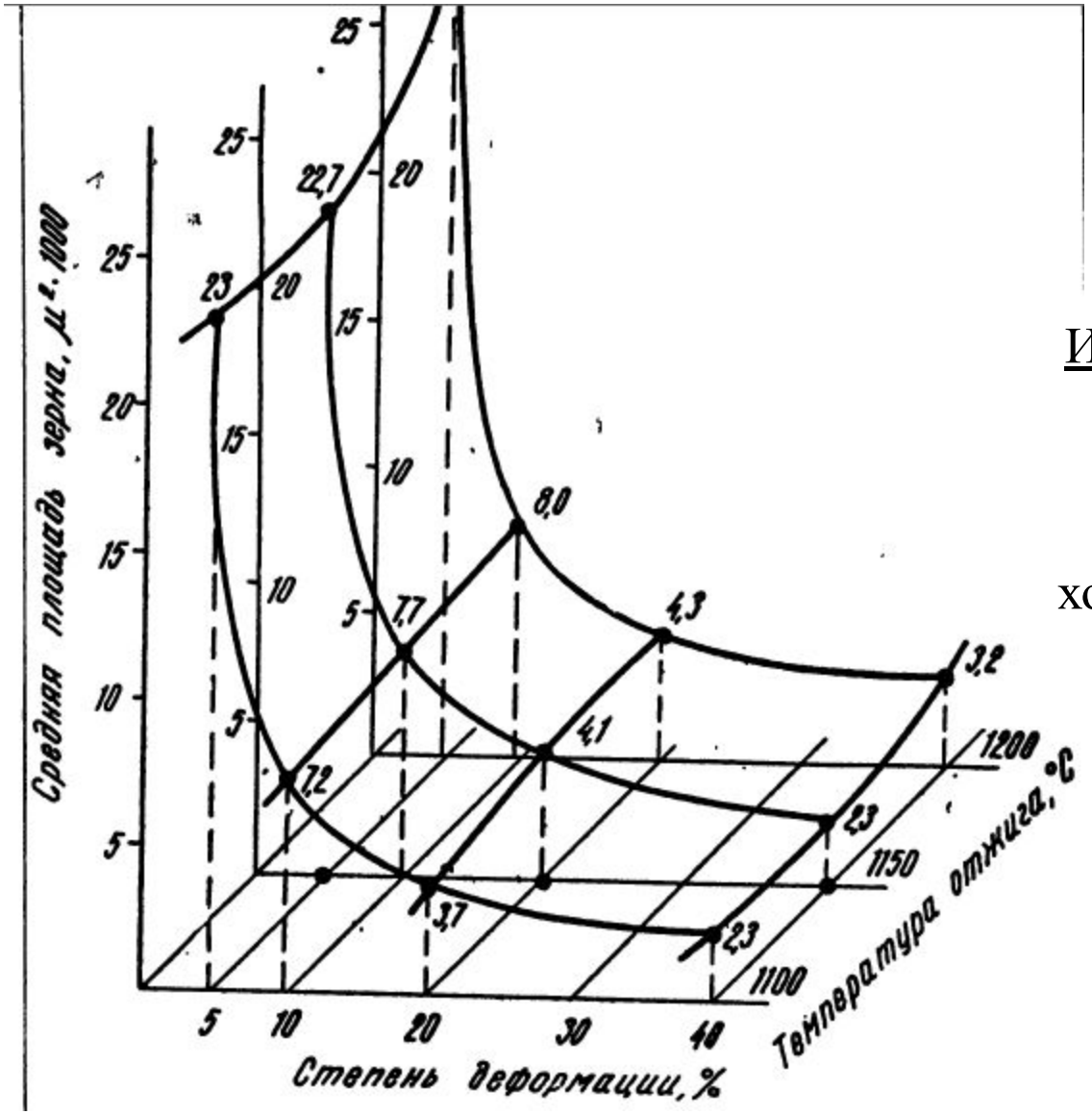


Диаграмма рекристаллизации



Сталь хромоникелевая

12Х18Н8.

<u>Исходный материал:</u> образцы закаленные с температуры 1100 °С в воде.

<u>Окончательная обработка:</u> холодное растяжение, отжиг в течение 30 минут

ОТЖИГ УМЕНЬШАЮЩИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Отжиг, уменьшающий напряжения, это-термическая обработка, при которой главным процессом является полная или частичная релаксация зональных остаточных напряжений.

Уменьшение остаточных напряжений при отжиге:

1. Вследствие пластической деформации в условиях, когда эти напряжения превысят предел текучести;
2. В результате ползучести при напряжениях меньше предела текучести.