

Отжиги I-го, II-го рода

- **Отжиг I рода** частично или полностью устраняет отклонения от равновесного состояния, возникшие при предыдущей обработке, его проведение не обусловлено фазовыми превращениями.
- **Отжиг II рода** основан на использовании диффузионных (нормальных) фазовых превращений при охлаждении металлов и сплавов.

Особенности литого состояния

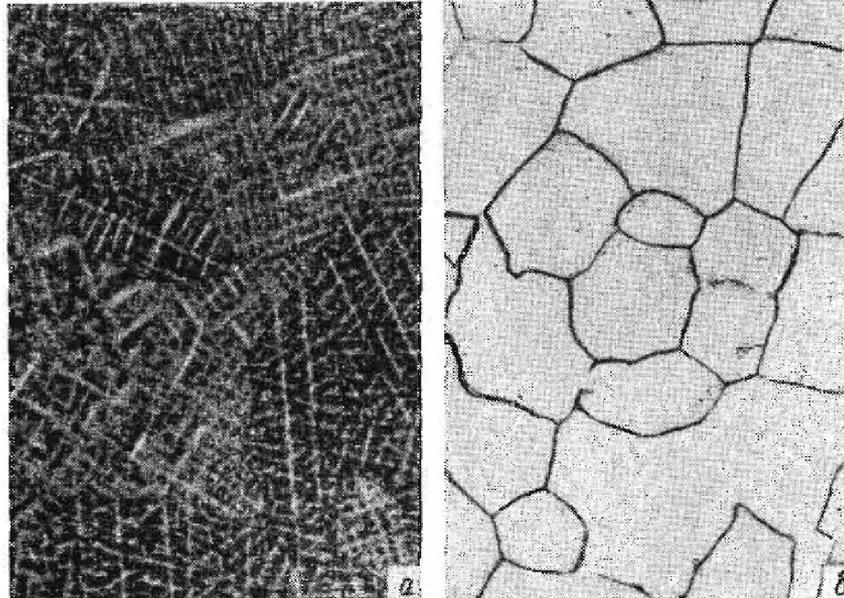
В результате отклонения от равновесия в процессе кристаллизации литой сплав имеет следующие основные недостатки:

1. Пластичность сплава обычно снижается, если в результате дендритной ликвации появляется избыточная хрупкая фаза. Особенно сильно снижается пластичность при образовании по границам дендритных ячеек сплошных прослоек из грубых частиц хрупких соединений (интерметаллидов, карбидов и др.).
2. Центральные участки дендритных ячеек и их границы, имеющие разный химический состав, образуют микрочастички. Поэтому внутрикристаллитная ликвация твердого раствора снижает стойкость против электрохимической коррозии. Появление неравновесной избыточной фазы в твердом растворе обычно также снижает стойкость против коррозии.
3. При обработке давлением, например прокатке и прессовании, микрочастички, имеющие разный химический состав, вытягиваются и может возникнуть строчечная структура. Такая структура обуславливает анизотропию свойств в изделии и повышенную склонность к межкристаллитному разрушению.

Особенности литого состояния

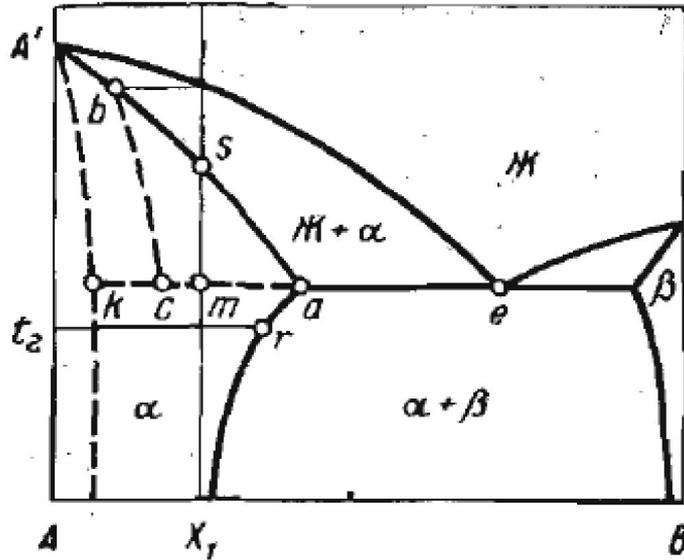
4. Дендритная ликвация понижает температуру солидуса сплава, что, как правило, нежелательно. Например, при быстром нагреве под закалку или обработку давлением изделие может частично оплавиться. Оплавляются, например, участки, в которых находится неравновесно образовавшаяся эвтектика.
5. Структура и свойства литого сплава нестабильны во времени. В изделии, работающем при повышенных температурах, могут самопроизвольно постепенно выравниваться состав твердого раствора и растворяться избыточные фазы. Эти процессы вызывают постепенное изменение свойств, которое может выйти за допустимые пределы.
 - Гомогенизационный отжиг предназначен для устранения дендритной ликвации, возникающей в процессе неравновесной кристаллизации. Этот вид обработки применяют, как правило к литым, реже – к деформированным сплавам.

Основные структурные изменения



- Микроструктура сплава Cu – 20 % Ni. $\times 100$: а – после литья; б – после отжига при 1000 °С в течение 40 ч.

Термодинамика процесса гомогенизации



Неравновесный солидус $A'ka$ в системе эвтектического типа и кривая изменения среднего состава твердого раствора bc при дендритной ликвации в сплаве X_1 (схема)

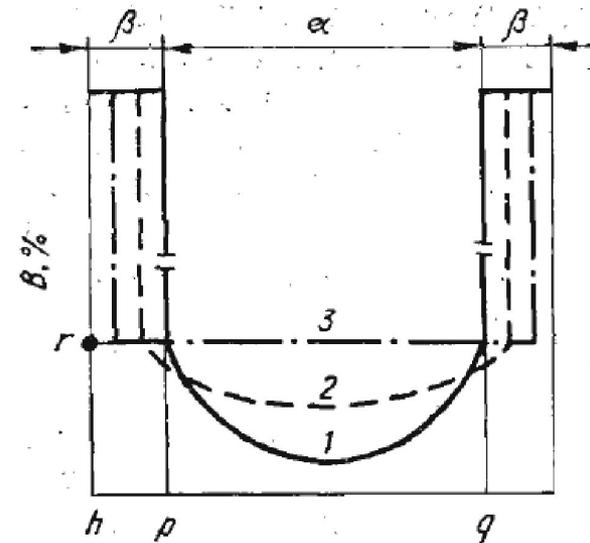


Схема распределения легирующего элемента по сечению дендритной ячейки α -раствора с β -фазой на ее границах в начальный (1), промежуточный (2) и конечный (3) моменты гомогенизации.

Термодинамика процесса гомогенизации

- Энергия активации диффузии Q обеспечивает переход атомов из одного положения в решетке в другое. Так как величина энергии активации входит в показатель степени, то она очень сильно влияет на величину коэффициента диффузии.
- Энергия активации диффузии элементов, растворенных по способу внедрения, меньше, чем у элементов растворенных по способу замещения. Поэтому последние диффундируют медленнее. Например, легирующие элементы, растворенные в аустените по способу замещения, обладают значительно меньшей диффузионной подвижностью, чем углерод, растворенный в феррите по способу внедрения.
- Поэтому слитки из углеродистых сталей обычно не подвергают гомогенизационному отжигу, так как в них при нагреве под горячую обработку давлением из-за быстрой диффузии углерода в аустените дендритная ликвация успевает исчезнуть. Легированные стали для устранения внутрикристаллитной ликвации и растворения неравновесного избытка карбидов эвтектического происхождения приходится подвергать специальному нагреву – гомогенизационному отжигу при 1050 – 1250 °С.

Основные характеристики гомогенизационного отжига

- Время выдержки при гомогенизационном отжиге обычно колеблется в пределах от нескольких до десятков часов (не считая времени нагрева). Повышая температуру, можно сократить время выдержки при отжиге.
- Время полной гомогенизации зависит не только от температуры отжига и природы сплава, определяющих диффузионную подвижность компонентов в твердом растворе. На время гомогенизации сильно влияет исходная микроструктура литого сплава. Скорость гомогенизации зависит от толщины частиц растворяющейся избыточной фазы и размера дендритной ячейки основной фазы.
- Зависимость времени окончания растворения избыточной фазы t_p от средней толщины частиц растворяющейся фазы m подчиняется уравнению:

$$t_p = am^b$$

- где a и b – константы для данного сплава и данной температуры гомогенизационного отжига.

Побочные структурные изменения

- Одновременно с основными структурными изменениями, рассмотренными выше и составляющими сущность гомогенизации, могут протекать побочные изменения структуры, которые необходимо учитывать при выборе режима термической обработки.
1. Рост зерна. В сплаве, испытывающем полиморфное превращение, при гомогенизации в области высокотемпературной фазы может вырасти крупное зерно. Так, при гомогенизационном отжиге легированных сталей, который проводят при высоких температурах, вырастает крупное аустенитное зерно. В малолегированных сплавах, если границы зерен свободны от выделений избыточных фаз, и могут легко мигрировать, зерно может вырасти за счет собирательной рекристаллизации.

Побочные структурные изменения

4. Закалка. При охлаждении слитков легированных сталей с температуры гомогенизационного отжига на воздухе может произойти полная или частичная закалка на мартенсит поверхностных слоев (например, в слитках из сталей 1Х2Н4ВА и 40ХН2МА).
5. Развитие вторичной пористости. С увеличением времени выдержки при отжиге, например литых алюминиевых сплавов иногда развивается пористость.
 - Пористость, развивающуюся при нагревании сплава, называют вторичной в отличие от первичной, образующейся при кристаллизации. Чем выше температура отжига, тем больше вторичная пористость.

Причины возникновения пористости при гомогенизации

- Одна из причин вторичной пористости – выделение водорода из пересыщенного им твердого раствора, образовавшегося при быстрой кристаллизации. Другой причиной может быть эффект Киркендалла – неравенство встречных диффузионных потоков атомов разных компонентов. При вакансионном механизме диффузии в тех участках твердого раствора, откуда уходят наиболее быстро диффундирующие атомы, появляются избыточные вакансии и возникает *диффузионная пористость*.
- Увеличение пористости при обычном гомогенизационном отжиге по абсолютной величине невелико и редко значительно сказывается на свойствах изделий, особенно в тех случаях, когда поры завариваются при горячей пластической деформации.

Нагрев для снятия остаточных напряжений

Многие технологические воздействия на обрабатываемые детали сопровождаются возникновением в них остаточных напряжений, которые уравниваются в объеме детали.

Значительные остаточные напряжения возникают в отливках и полуфабрикатах, неравномерно охлаждающихся после проката иликовки, в холоднодеформированных полуфабрикатах или заготовках, в прутках в процессе правки, в сварных соединениях, при закалке и т.п.

Чаще всего эти напряжения нежелательны. Они могут вызвать деформацию деталей при обработке резанием или в процессе эксплуатации, а суммируясь с напряжениями от внешних нагрузок, привести к преждевременному разрушению или короблению конструкции;), остаточные напряжения повышают вероятность хрупкого разрушения.

Для уменьшения остаточных напряжений изделия подвергают нагреву.

В стальных и чугунных деталях значительное снижение остаточных напряжений происходит в процессе выдержки при 450 °С; после выдержки при 600 °С напряжения понижаются до очень низких значений. Время выдержки устанавливают от нескольких до десятков часов в зависимости от массы изделия.

В сплавах на основе меди и алюминия существенное уменьшение остаточных напряжений происходит при меньших температурах нагрева. Например, в холоднодеформированных латунных полуфабрикатах остаточные напряжения практически полностью снимаются в процессе отжига при 250-300°С.

По окончании выдержки при заданной температуре изделия медленно охлаждают, чтобы предотвратить возникновение новых напряжений. Допустимая скорость охлаждения зависит от массы изделия, его формы и теплопроводности материала; обычно она находится в пределах 20-200°С/ч.

Рекристаллизационный отжиг

Нагрев деформированных полуфабрикатов или деталей выше температуры рекристаллизации называют *рекристаллизационным отжигом*; в процессе выдержки происходит главным образом рекристаллизация. Скорость охлаждения при этой разновидности отжига не имеет решающего значения; обычно охлаждение по окончании выдержки проводят на воздухе. Цель отжига — понижение прочности и восстановление пластичности деформированного металла, получение определенной кристаллографической текстуры, создающей анизотропию свойств; и заданного размера зерна.

Рекристаллизационный отжиг часто используют в качестве межоперационной смягчающей обработки при холодной прокатке, волочении и других операциях холодного деформирования. Температуру отжига обычно выбирают на 100 - 200 °С выше температуры рекристаллизации.

Рекристаллизационный отжиг может быть использован в качестве окончательной обработки полуфабрикатов.

В некоторых металлах и твердых растворах рекристаллизация сопровождается образованием текстуры (преимущественной ориентации кристаллов в объеме детали), которая создает анизотропию свойств. Это позволяет улучшить те или иные свойства вдоль определенных направлений в деталях (магнитные свойства в трансформаторной стали и пермаллоях, модуль упругости в некоторых пружинных сплавах и т.д.).

В машино- и приборостроении широкое применение находят металлы и сплавы – твердые растворы, не имеющие фазовых превращений в твердом состоянии (алюминий, медь, никель, ферритные и аустенитные стали, однофазные латуни и бронзы).

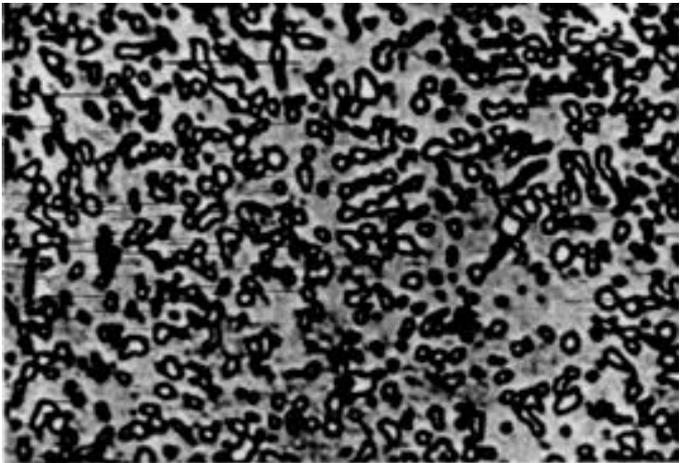
В таких материалах единственной возможностью регулирования размера зерен является сочетание холодной пластической деформации с последующим рекристаллизационным отжигом.

Сфероидизирующий отжиг инструментальных сталей

Инструментальные стали для режущего, измерительного инструмента и для инструмента, деформирующего металл в холодном состоянии, содержат углерод в количестве от 0,7 до 2 %. Высокое %C обуславливает высокую твердость инструментальных сталей, что затрудняет их обработку резанием. Для снижения твердости такие стали отжигают. Для заэвтектоидных сталей сфероидизирующий отжиг, кроме того, подготавливает структуру к закалке.

Наименьшую твердость имеют стали со структурой зернистого перлита, когда цементит перлита имеет округлую форму. Отсюда и название отжига- «сфероидизация».

Зернистый перлит в инструментальных сталях обычно получают путём нагрева сталей до температуры 750 — 770 °С (немного выше, чем A_{c1}) и последующего медленного охлаждения или изотермической выдержки при субкритической температуре 650 - 680 °С. При нагреве до температуры, лишь немного превышающей критическую, даже в доэвтектоидных сталях сохраняются не распавшиеся мелкие карбидные частицы, которые при охлаждении или изотермической выдержке выполняют роль центров кристаллизации сфероидального цементита.



Микроструктура эвтектоидной углеродистой стали после сфероидизирующего отжига.
Зернистый перлит. *500

Низко-, средне- и высоколегированные инструментальные стали сфероидизируют аналогичным образом, однако чаще вместо непрерывного охлаждения от температуры нагрева используют субкритические, изотермические выдержки.

1. Нагрев ниже критических точек

При нагреве углеродистых сталей с феррито – карбидной структурой до температур, лежащих ниже точки A_1 , наиболее существенные изменения происходят в пластинчатом перлите, характеризующемся большой протяженностью межфазных границ феррит - цементит, обладающих повышенной свободной энергией.

На избыточный феррит в доэвтектоидных сталях и избыточный цементит в заэвтектоидных нагрев влияет в меньшей мере.

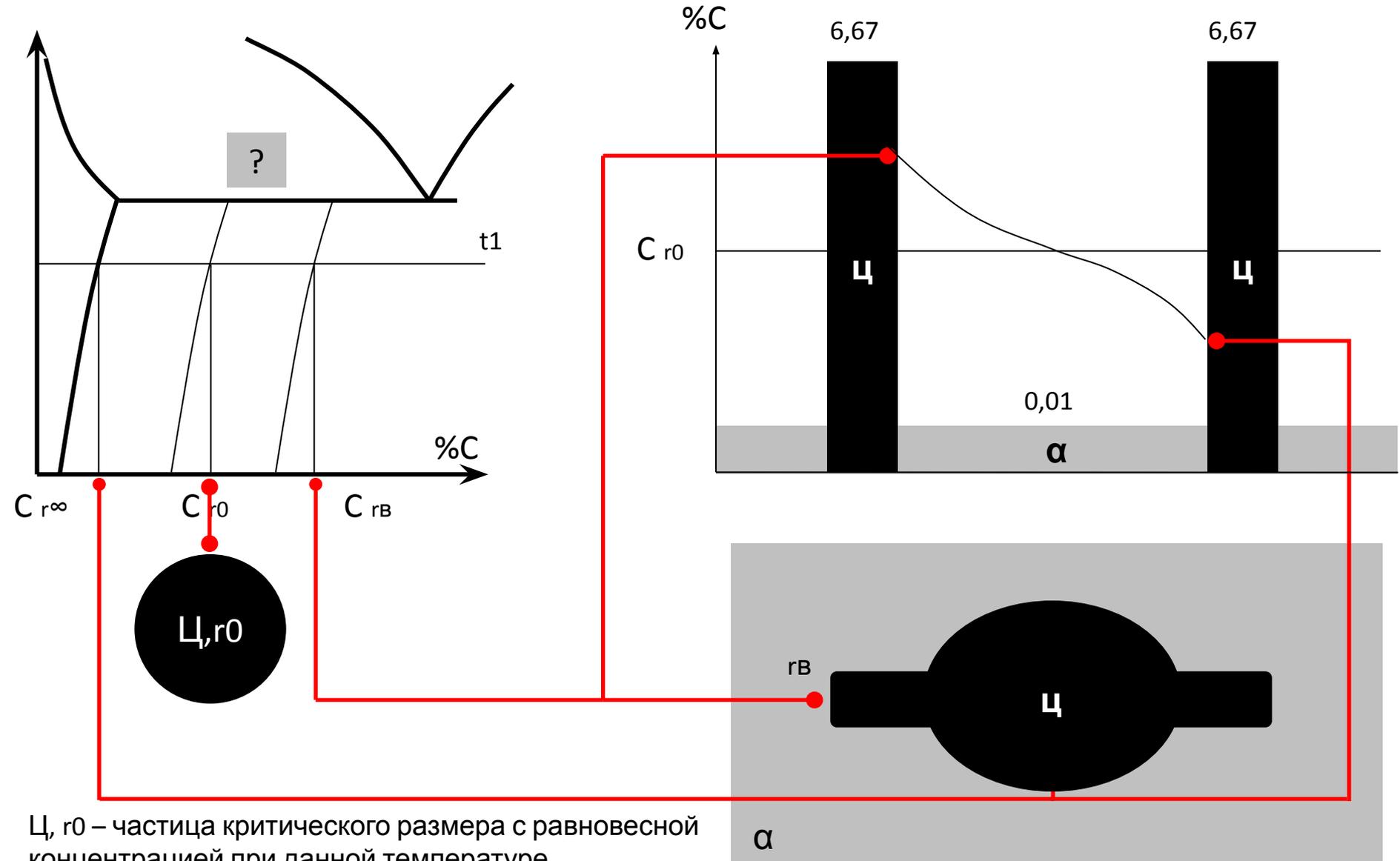
Основными процессами, протекающими при нагреве стали до температур ниже точки A_1 , являются сфероидизация и коагуляция карбидов.

Сфероидизация – процесс превращения частицы пластинчатой формы в более равновесную глобулярную с меньшей протяженностью межфазных границ.

Коагуляция – процесс роста более крупных частиц за счет растворения более мелких.

Преобразования при нагреве

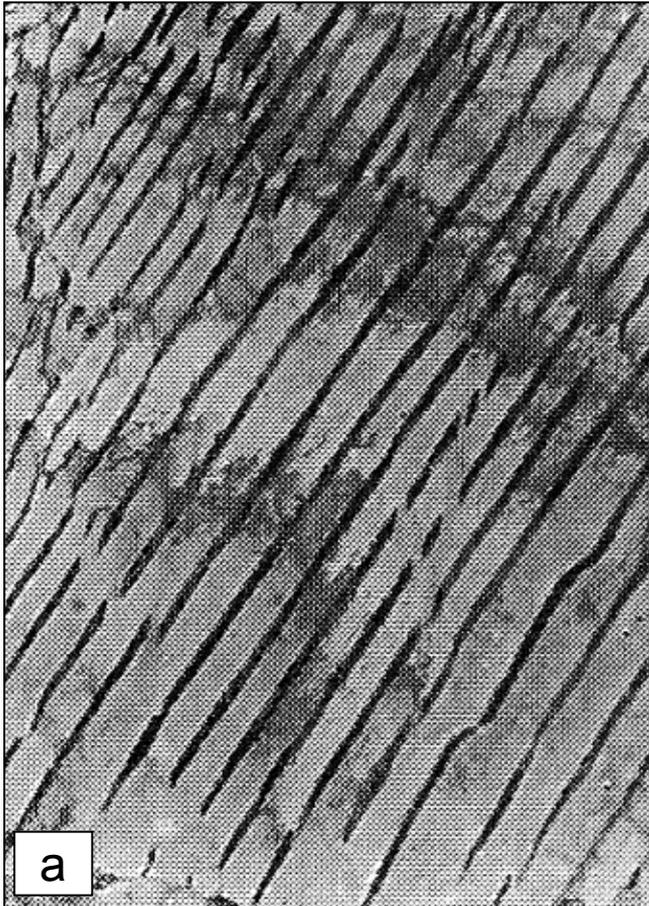
Сфероидизация



ζ, r_0 – частица критического размера с равновесной концентрацией при данной температуре

Сфероидизация

В реальных условиях процесс сфероидизации обычно протекает в два этапа: сначала происходит разделение цементитных пластин, а затем развивается их сфероидизация. Это обусловлено наличием дефектов в пластинах (изгибы, утончения, выходы субграниц и дислокаций), обладающих повышенной энергией границ. Возникающая диффузия отводит атомы углерода к более плоским участкам и приводит к разбиению пластины.



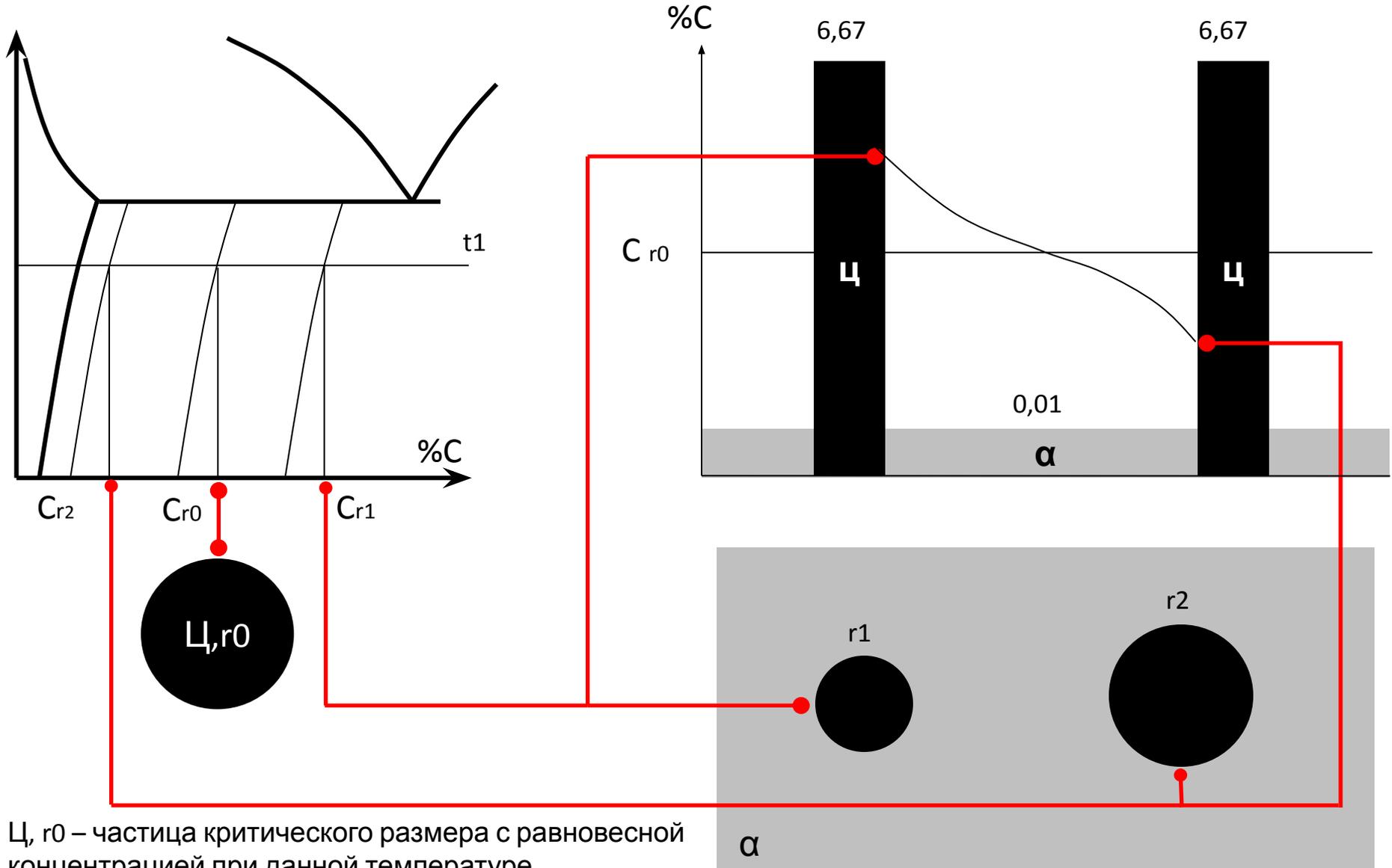
Пластины цементита в стали 70:

а – исходная структура, $\times 45000$

б – после нагрева до 650°,
выдержка 30 минут $\times 30000$

Превращения при нагреве

Коагуляция

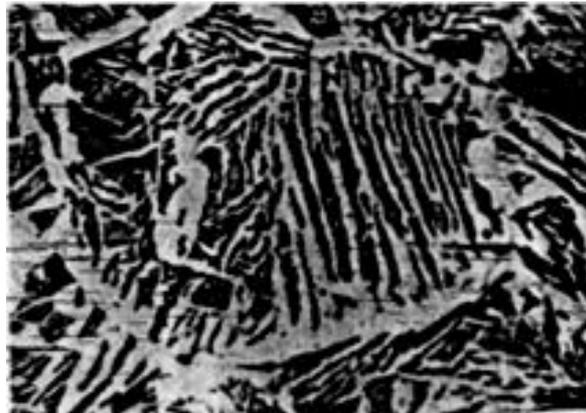


Полный отжиг конструкционных сталей

Полный отжиг проводят для снижения твердости, повышения пластичности и получения однородной мелкозернистой структуры. Одновременно при отжиге полностью снимаются остаточные напряжения.

Полуфабрикаты из конструкционных сталей после литья или горячего деформирования из-за ускоренного охлаждения с высоких температур могут иметь повышенную твердость, что затруднит их обработку резанием и приведет к понижению пластичности. Кроме того, отливки и горячедеформированная сталь часто приобретают структурные дефекты, ухудшающие их свойства. Характерный структурный дефект стальных отливок — крупнозернистость.

При ускоренном охлаждении крупнозернистого аустенита создаются условия для образования видманштеттовой структуры.



Видманштеттовая структура
горячедеформированной стали

Полный отжиг конструкционных сталей

Для полной перекристаллизации структуры конструкционные стали нагревают до температуры, превышающей температуру A_{c3} на $30-50^{\circ}\text{C}$. При более высоком нагреве произойдет укрупнение аустенитных зерен. После сквозного прогрева изделия следует медленно охлаждать, чтобы обеспечить в результате распада аустенита равновесную ферритно-перлитную структуру и соответственно низкую твердость и высокую пластичность.

Скорость охлаждения при отжиге выбирают в зависимости от степени легированности стали. Углеродистые стали получают достаточно мягкими при скорости охлаждения $100 - 200^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. Легированные стали с более высокой устойчивостью переохлажденного аустенита нужно охлаждать медленнее - со скоростью $20 - 70^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. Высоколегированные стали экономичнее подвергать изотермическому отжигу, т.е. дать выдержку при температуре немного меньшей A_{r1} , чтобы получить продукты распада аустенита с низкой твердостью.

Охлаждение при отжиге чаще всего проводят вместе с печью.

Неполный отжиг конструкционных сталей

Неполный отжиг доэвтектоидной стали проводят до температур выше A_{C1} , но ниже A_{C3} . При температуре неполного отжига избыточный феррит не исчезает. Неполный отжиг не может устранить дефектов стали, связанных с формой избыточного феррита.

Используют для смягчения доэвтектоидной стали перед обработкой резанием. Данный отжиг позволяет сэкономить время и снизить стоимость обработки

Нормализация сталей

Нормализации, подвергают конструкционные стали после горячей обработки давлением и фасонного литья. При нормализации после нагрева до температуры на $50 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше A_{c3} сталь охлаждают на спокойном воздухе.

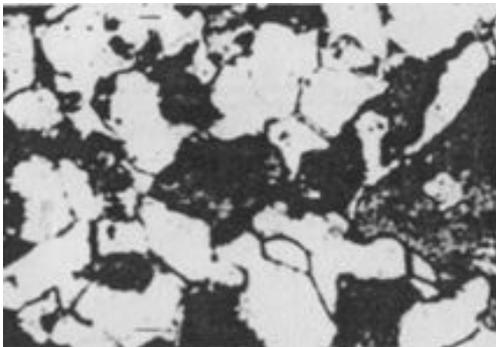
Нормализация — более экономичная термическая операция, чем отжиг, так как меньше времени затрачивается на охлаждение стали. Нормализация, обеспечивая полную перекристаллизацию структуры, приводит к получению более высокой прочности стали, так как при ускорении охлаждения распад аустенита происходит при более низких температурах.

Легированные конструкционные стали с повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита после нормализации приобретают высокую твердость, затрудняющую последующую обработку резанием.

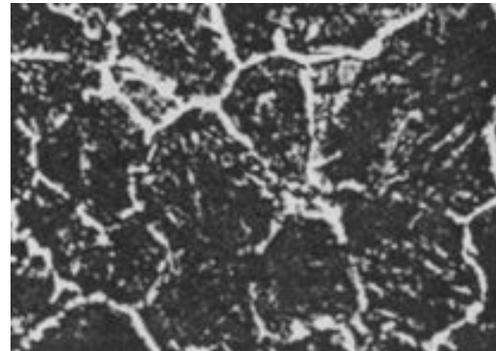
После нормализации углеродистых и низколегированных сталей, так же как и после отжига образуется ферритно-перлитная структура, но имеются структурные отличия. При ускоренном охлаждении, характерном для нормализации, доэвтектоидный феррит при прохождении температурного интервала $A_{r3} - A_{r1}$ выделяется на границах зерен аустенита; поэтому кристаллы феррита образуют сплошные или разорванные оболочки вокруг зерен аустенита — ферритную сетку.

Нормализация позволяет несколько уменьшить анизотропию свойств, вызванную наличием в горячедеформированной стали вытянутых неметаллических включений.

Свойства нормализованных горячекатаных полуфабрикатов существенно зависят от сечения: чем меньше сечение, тем быстрее произойдет охлаждение на спокойном воздухе и тем выше будет прочность стали.



а)



б)

Микроструктура стали (0,4 % С) после отжиг (а) и после нормализации (б). $\times 500$