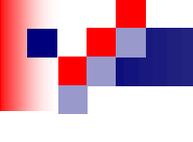


# Материаловедение

Технология термической  
обработки



Основными видами термической обработки являются *отжиг*, *нормализация*, *закалка* и *отпуск*.

### ***Отжиг***

Отжиг подразделяется на два вида:

*отжиг первого рода* и *отжиг второго рода*.

*Отжиг первого рода* – в основном это отжиг без полиморфных превращений, а если есть полиморфное превращение, то оно не оказывают существенного влияния на структуру и свойства сплава.

Разновидности отжига 1 рода: *отжиг для снятия остаточных напряжений*, *гомогенизационный*, *рекристаллизационный*, *дорекристаллизационный*.

К *отжигу второго рода* относятся виды отжига, при которых формирование структуры происходит путем диффузионных фазовых превращений.

Разновидности отжига 2 рода: *полный отжиг*, *нормализация*, *одинарная термическая обработка*, *изотермический*, *неполный*, *сфероидизационный* *циклический отжиг*.

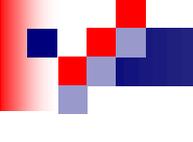
## **Отжиг 1 рода**

*Отжиг для снятия остаточных напряжений* основан на том, что при нагреве упругонапряженного металла снижается уровень критического напряжения сдвига ниже уровня действующих в металле остаточных напряжений, в результате чего остаточные напряжения снижаются. Чем выше температура нагрева, тем в большей степени снижаются напряжения. Технология отжига отливок из серого чугуна предусматривает нагрев до температуры 430...600 °С с выдержкой от 0,5 до 5,0 ч в зависимости от размеров и сложности формы отливок с последующим охлаждением вместе с печью. Медленное охлаждение предотвращает образование новых напряжений в результате возможного появления температурных градиентов при быстром охлаждении.

Отжиг стальных отливок, штамповок и сварных узлов проводится при температуре 550...680 °С в зависимости от исходного структурного состояния изделия и требуемых механических свойств. Длительность выдержки – от 2 до 4 мин на 1 мм толщины изделия (обычно 2...3 ч).

Снятие напряжений в чистом алюминии и чистой меди достигается при температуре 150 °С в течение 0,5...1,0 ч, в двойных латунях от Л90 до Л62 при 200 °С; ЛС 59-1 – 285 °С, 1 ч; ЛА 77-2 – 350 °С, 1 ч.

Технический титан отжигают при температуре 500 °С, титановые сплавы – при 550...600 °С с выдержками 0,5...1,0 ч.

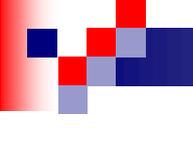


*Гомогенизационный отжиг* применяют для слитков и отливок, в которых в реальных условиях кристаллизации сформировалась химически неоднородная структура (дендритная ликвация, наличие неравновесных эвтектик или других структурных составляющих).

Цель – устранение химических неоднородностей в структуре и на этой основе повышение пластичности материала отливок, улучшение технологичности слитков при обработке давлением, повышение однородности структуры готовых изделий и улучшение комплекса их свойств.

Температура нагрева должна быть предельно высокой, близкой к температуре плавления. Это позволит сократить длительность выдержки. Верхний предел температурного режима отжига ограничивается развитием возможных нежелательных явлений, таких как чрезмерный рост размера зерна (перегрев) или оплавление границ зерен, обогащенных примесями, что сопровождается насыщением газами, образованием газовой и усадочной пористости, окислением и возникновением трещин (пережог).

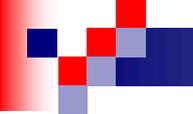
Практика показывает, что в большинстве случаев температура отжига может быть предварительно определена как  $(0,90...0,95)T_{пл}$ .



Легированные стали, содержащие хром, молибден, ванадий, вольфрам, титан и др., отжигают при температурах 1050...1250 °С в крупных садках с выдержкой от 8 до 20 ч. Нагрев и охлаждение очень медленные (до 10...20°/ч). Общая длительность цикла достигает 160...180 ч.

Алюминиевые сплавы отжигают при температурах от 440 до 640 °С в зависимости от химического состава сплавов. Преимущественно эта температура на 5...40 °С ниже температуры неравновесного солидуса конкретного сплава. Так, для дуралюминов Д1 и Д16, температуры неравновесного солидуса которых равны 509 и 508 °С, интервалы температур гомогенизационного отжига соответственно составляют: 470...500 °С и 470...495 °С. Длительность выдержки при отжиге от нескольких часов до нескольких десятков часов. Для сплавов типа дуралюмин это время от 8 до 36 ч, для сплавов систем Al – Mg до 48 ч.

Магниевые сплавы гомогенизируют при температурах 390...415 °С. Время выдержки 18...24 ч. Как и для алюминиевых сплавов, часто применяют совмещение гомогенизационного отжига с нагревом под обработку давлением (для слитков) и с закалкой (для отливок).



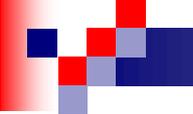
*Рекристаллизационные виды отжига* относятся к отжигу 1 рода и включают в себя: *дорекристаллизационный*, *рекристаллизационный* и *отжиг, увеличивающий зерно*. Рекристаллизационные виды отжига применяются для полуфабрикатов либо готовых изделий, полученных методами обработки металлов давлением.

Цель *рекристаллизационного отжига* – повышение пластичности и уменьшение прочности деформированного материала, в результате чего улучшается его технологичность на последующих операциях обработки давлением и повышается пластичность готового изделия.

*Дорекристаллизационный отжиг*, преследуя аналогичную цель, дополнительно должен обеспечивать сохранение в готовом изделии или полуфабрикате частичного деформационного упрочнения, полученного при предшествовавшей пластической деформации.

*Отжиг, увеличивающий зерно*, выполняется со специальными целями, чаще всего не связанными с достижением тех или иных механических свойств. В большинстве случаев такой отжиг имеет цель – укрупнение размера зерна и формирование текстур, либо получение монокристаллического состояния сплава.

Общим для всех трех видов отжига металлов и сплавов являются особенности его структурного состояния, характеризующегося повышенным количеством дефектов кристаллического строения, введенных в металл при пластической деформации.



При назначении режимов отжига необходимо учитывать температурный порог рекристаллизации.

*Температурный порог рекристаллизации* – минимальная температура, при которой начинается рекристаллизация в сильнодеформированных металлах.

Температурный порог рекристаллизации для технически чистых металлов по определению А.А. Бочвара равен  $T_{рек} = 0,4T_{пл}$ . Для сверхчистых металлов температурный порог рекристаллизации может уменьшиться до  $0,25T_{пл}$ , а для сильнолегированных сплавов – увеличиваться до  $(0,55...0,60)T_{пл}$ , а иногда рекристаллизация может не начаться вплоть до температуры плавления.

Температуру отжига назначают обычно на  $100...150$  °С выше температурного порога рекристаллизации, хотя могут быть и отступления от этого правила для каждого конкретного сплава.

Отжиг при температурах ниже температурного порога рекристаллизации соответствует *дорекристаллизационному виду отжига*, при котором развиваются процессы *возврата* (*отдых* и *полигонизация*). При этом не изменяется исходная структура деформационного типа, но снижаются внутренние напряжения, могут формироваться устойчивые субзеренные структуры.

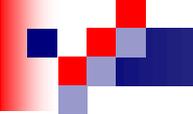
## **Отжиг второго рода**

Виды отжига второго рода: *полный, изотермический, нормализация, неполный, отжиг на зернистый перлит.*

*Полный отжиг* – это нагрев стали выше критической точки  $A_{c3}$ , выдержка в аустенитной области для гомогенизации состава аустенита, с последующим медленным охлаждением вместе с печью.

*Изотермический отжиг* – это разновидность полного отжига. Он заключается в нагреве до той же температуры, что и при полном отжиге, выдержке стали в аустенитной области, подстуживании до температуры на  $100...150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже точки  $A_{c1}$ , выдержке при этой температуре до полного распада аустенита, с последующим охлаждением на воздухе. Применение изотермического отжига вместо полного сокращает длительность цикла обработки, повышает равномерность получаемых структур.

Полный и изотермический отжики применяются только для доэвтектоидных и эвтектоидной стали. Заэвтектоидные стали подвергают только *неполному отжигу* и *отжигу на зернистый перлит*. Для устранения в структуре цементитной сетки (выделений вторичного цементита по границам зерен), заэвтектоидную сталь могут подвергать *нормализации*.



*Нормализации* могут подвергаться любые стали. Малоуглеродистые и среднеуглеродистые стали – вместо полного отжига, а высокоуглеродистые – как упрочняющий вид термической обработки.

Нормализация выполняется путем нагрева стали выше точки  $A_{c3}$  (или выше  $A_{cm}$  для заэвтектоидной стали), выдержки при этой температуре для гомогенизации аустенита, с последующим охлаждением на воздухе. Более высокая скорость охлаждения стали при нормализации по сравнению с полным отжигом, приводит к получению более мелкой перлитной структуре (например, сорбитной), к более равномерному распределению избыточного феррита или вторичного цементита (в до- или заэвтектоидной сталях).

*Неполный отжиг* является основным видом отжига для заэвтектоидных сталей. Он производится путем нагрева до температуры на  $35...60$  °С выше точки  $A_{c1}$ , выдержки при этой температуре (5...12 час.) с медленным охлаждением с печью. При отжиге получают до 90 % зернистого перлита, что обеспечивает заэвтектоидной стали достаточно высокую пластичность. Для доэвтектоидных сталей неполный отжиг применяют ограниченно (для уменьшения твердости стали, для улучшения обрабатываемости резанием).



Для более полного преобразования пластинчатого перлита в зернистый для заэвтектоидной стали применяют *отжиг на зернистый перлит (циклический сфероидизационный отжиг)*. Его выполняют, нагревая сталь на 10...15 °С выше точки  $A_{c1}$ , с кратковременной выдержкой (10...15 мин.) при такой температуре, подстуживанием на 10...15 °С ниже точки  $A_{r1}$ , с такой же выдержкой и новым нагревом на 10...15 °С выше точки  $A_{c1}$ , с повторением полного цикла отжига 3 раза. Это обеспечивает достижение 100 % зернистого перлита.

## **Закалка без полиморфного превращения и старение цветных сплавов**

2 вида закалки:

*закалка без полиморфного превращения и  
закалка на мартенсит.*

Закалка без полиморфного превращения – Al, Mg, Cu, Ni сплавы.

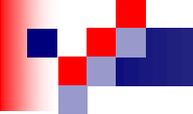
При закалке – упрочнения нет, пластичность повышается.

Высокая прочность достигается в результате старения.

Сплавы нагревают до температуры растворения избыточных фаз в твердом растворе.

Последующее быстрое охлаждение, например, в воде, фиксирует то состояние твердого раствора, которое являлось равновесным (устойчивым) при температуре нагрева под закалку.

Зафиксированный при комнатной температуре твердый раствор оказывается *пересыщенным, метастабильным, способным к распаду.*



*Старение.* После закалки начальные стадии распада твердых растворов могут частично проходить либо непосредственно при закалочном охлаждении, либо при комнатной температуре сразу после него.

Основные стадии процессов распада:

- флуктуационное диффузионное перераспределение атомов растворенного вещества внутри объема переохлажденного пересыщенного твердого раствора с образованием микронеоднородностей твердого раствора, обогащенных атомами растворенного вещества;
- образование зон твердого раствора с упорядоченным расположением атомов растворенного вещества в виде тонких дискообразных областей, характеризующихся искажением кристаллического строения в области перехода таких областей к окружающему твердому раствору и полной когерентностью их решеток (*зоны Гинье-Престона 1 и 2 – ЗГП1 и ЗГП2*);
- образование и последующий рост зародышей метастабильной избыточной фазы, характеризующихся собственной кристаллической решеткой, отличной от решетки матричного твердого раствора, но и не соответствующей решетке стабильной фазы, свойственной для равновесной системы компонентов;
- образование и рост зародышей стабильной фазы, сопровождающийся обеднением пересыщенного твердого раствора до равновесных концентраций;
- коагуляция частиц выделившейся стабильной фазы.

Преобразования при распаде пересыщенных твердых растворов:

*Микронеоднородности* → ЗГП →  $\Theta''$  →  $\Theta'$  →  $\Theta$  → коагуляция частиц.

В результате полного завершения всех процессов система стремится к восстановлению фазового равновесия, нарушенного операцией закалки.

*Естественное старение* дуралюминов, т.е. старение при комнатной температуре, приводит преимущественно к упрочнению зонами Гинье-Престона.

Более высокие значения прочностных свойств и особенно предела текучести сплавов, достигаются при *искусственном старении*, упрочнение при котором обеспечивается за счет выделения частиц промежуточных метастабильных фаз. Старение при температуре, обеспечивающей максимальные прочностные свойства, называется *полным искусственным старением*.

## **Закалка на мартенсит**

При закалке сталей полиморфное превращение происходит *бездиффузионным* путем по *мартенситному* механизму. Образующаяся структура называется *мартенситом*. На микроструктуре она имеет игольчатый характер. *Мартенсит в стали – это пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе*. Мартенсит имеет тетрагональную решетку (искаженную ОЦК решетку). Такое искажение кристаллической решетки является главной причиной упрочнения стали после закалки.

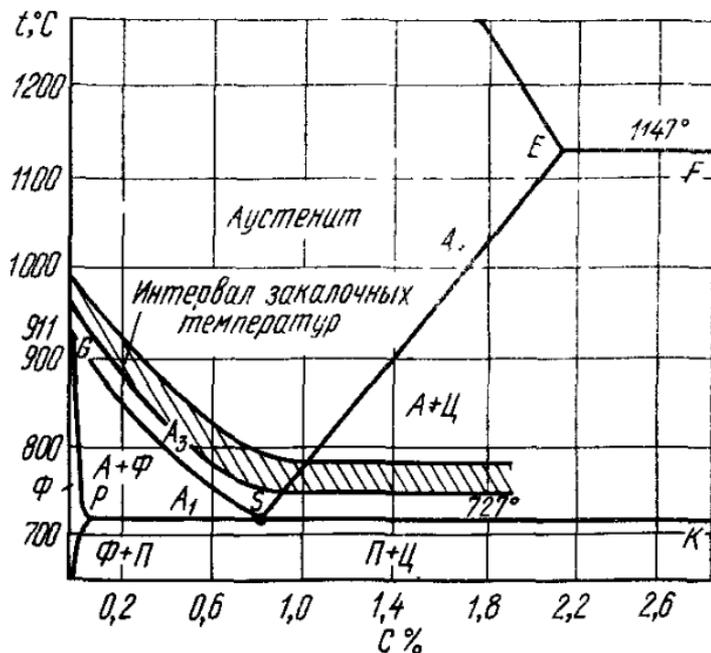
Другой причиной упрочнения является *фазовый наклеп* мартенсита, обусловленный тем, что перестройка решетки при мартенситном превращении сопровождается актами внутрикристаллитной пластической деформации, что вызывает резкое увеличение плотности дислокаций.

Третья причина высокой твердости мартенсита связана с *частичным распадом мартенсита* в период закалочного охлаждения *с выделением высокодисперсных карбидных частиц*, упрочняющих сталь.

Твердость после закалки средне- и высокоуглеродистых сталей может достигать 60...65 HRC, что обеспечивает достижение высокой износостойкости и прочности стали при минимальной пластичности. Способность стали повышать твердость в результате закалки называется *закаливаемостью*. Закаливаемость стали определяется содержанием в стали углерода. Чем больше в мартенсите углерода, тем выше его твердость.

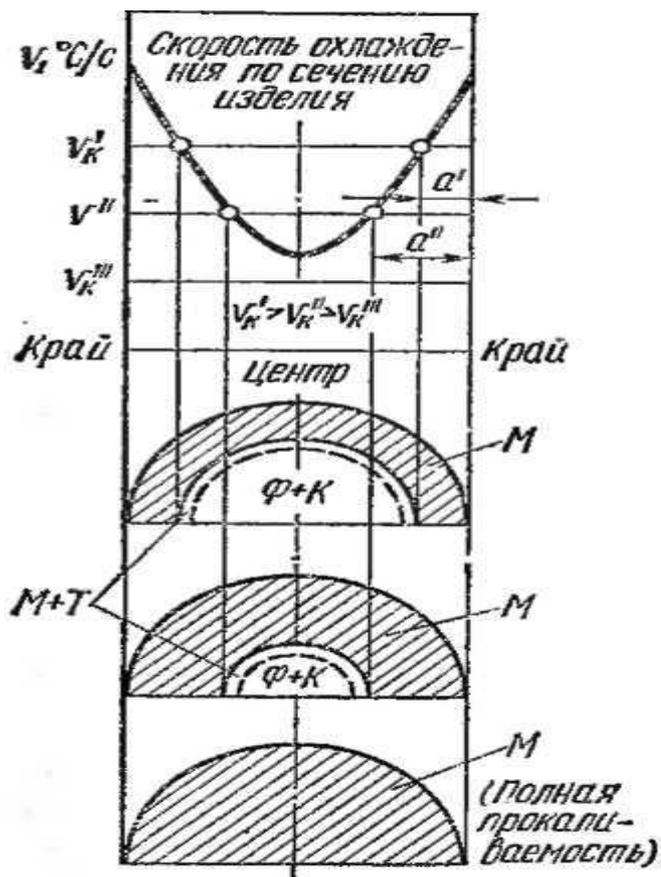
**Назначение температуры нагрева под закалку.** Температура нагрева под закалку зависит от положения критических точек для каждой конкретной стали. Для углеродистых сталей она может быть выбрана непосредственно по диаграмме железо – углерод.

Для доэвтектоидных сталей температура нагрева под закалку должна быть выше температуры  $A_{c3}$  на 20...30 °С, иногда на 50 °С. Использование температур нагрева, превышающих оптимальные значения, приводит к избыточному, часто недопустимому росту аустенитного зерна и получению грубоиглочатого мартенсита после закалки и снижению прочностных и пластических характеристик стали.



Заэвтектоидные стали нагревают под закалку до температур на 35...60 °С выше точки  $A_{c1}$ , но ниже точки  $A_{cm}$ . При этом сохраняются после закалки частицы вторичного цементита (карбидов – в легированных сталях), что не снижает прочностные характеристики, а наоборот, увеличивает твердость и износостойкость стали, уменьшает степень роста зерна в этих сталях.

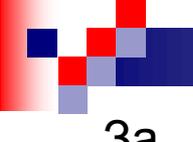
Под **прокаливаемостью** понимают способность стали получать закаленный слой с мартенситной или троосто-мартенситной структурой и высокой твердостью на ту или иную глубину.



Прокаливаемость определяется критической скоростью охлаждения, зависящей от состава стали (аустенита). Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия будет превышать критическую скорость закалки  $v_K$ , то сталь получит мартенситную структуру по всему сечению (**сквозная прокаливаемость**).

Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия будет меньше  $v_K$  ( $v_K'$  и  $v_K''$ ), то изделие прокалится только на некоторую глубину  $a'$  или  $a''$  и прокаливаемость будет неполной. В этом случае в сердцевине произойдет распад аустенита с образованием пластинчатой феррито-карбидной структуры (троостита, сорбита или перлита).

Зависимость прокаливаемости от критической скорости закалки  $v_{кр}$ :  $a'$  и  $a''$  – глубина закаленного слоя,  $v_K'$  – критическая скорость охлаждения углеродистой стали;  $v_K''$  – низколегированной и  $v_K'''$  – высоколегированной несколькими элементами стали;  $\Phi + K$  – пластинчатая ферритокарбидная структура (троостит, сорбит или перлит)



За глубину закаленного слоя условно принимают расстояние от поверхности до *полумартенситной зоны* (50% мартенсита + 50% троостита). Диаметр заготовки, в центре которой после закалки в данной охлаждающей среде образуется полумартенситная структура, называют *критическим диаметром*  $D_k$ . Критический диаметр определяет размер сечения изделия, прокаливающегося насквозь.

Прокаливаемость стали тем выше, чем меньше критическая скорость закалки. Поэтому все факторы, уменьшающие критическую скорость закалки (повышающие устойчивость переохлажденного аустенита), увеличивают прокаливаемость.

Прокаливаемость стали и критический диаметр определяют методом торцевой закалки

*Внутренние напряжения в закаленной стали* возникают вследствие неравномерного охлаждения поверхности и сердцевины изделия (*тепловые напряжения*), увеличения объема и неоднородности протекания мартенситного превращения по объему изделия (*структурные или фазовые напряжения*). Во многих случаях фазовые напряжения выше тепловых. Тогда на поверхности образуются *растягивающие напряжения*, а внутри – *сжимающие*, что может привести к образованию трещин.

Закалку проводят:

- 1) в одном охладителе (*непрерывная закалка*), например, в воде.
- 2) *прерывистая закалка* (в двух средах), например, в воде охлаждают до температуры чуть выше  $M_n$  и переносят в другую среду (воздух, масло) – уменьшаются внутренние напряжения;
- 3) *закалка с самоотпуском*, охлаждение прерывают в закалочной среде, чтобы в середине сохранилось тепло, а затем под действием теплообмена поверхность нагревается и отпускается;
- 4) *ступенчатая закалка*, сталь охлаждают до температуры чуть выше  $M_n$ , затем выдерживают для выравнивания температуры по сечению и дальше охлаждают. Мартенситное превращение протекает наиболее полно.
- 5) *изотермическая закалка*, как и ступенчатая, но выдержка дольше, поэтому часть переохлажденного аустенита превращается в бейнит,
- 6) *обработка стали холодом* – используют для более полного распада остаточного аустенита.

## Отпуск стали

*Отпуск* заключается в нагреве закаленной стали до температуры ниже  $A_{c1}$ , выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью. Отпуск является окончательной операцией термической обработки, в результате чего сталь получает требуемые механические свойства. Наряду с формированием определенной структуры отпуск устраняет и внутренние напряжения в стали.

Различают три вида отпуска:

*Низкий (низкотемпературный) отпуск.* Нагрев до 250 °С. Низкий отпуск снижает закалочные напряжения, мартенсит превращается в *отпущенный мартенсит*, повышается прочность и улучшается вязкость. Для сталей с (0,6...1,3%С) HRC 58...63.

Подвергают: режущие и мерительные инструменты, детали после поверхностных обработок: после цементации, цианирования.

*Средний отпуск.* 350...500 °С. Повышает предел упругости и выносливости. Структура после среднего отпуска – *тростит отпуска*. HRC 40...50. Применяется для рессор, пружин, штампов.

*Высокий отпуск.* 500...680 °С. Структура – *сорбит отпуска*. Повышается конструкционная прочность сталей, снижается порог хладноломкости.

*Закалка + отпуск = улучшение.*