

## Тема: ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

1. Классификация термической обработки металлов
2. Отжиг стали
3. Закалка стали
4. Отпуск стали

### 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

**Термической обработкой** называются технологические процессы, включающие нагрев, выдержку и охлаждение металлических изделий с целью изменения их структуры и свойств. Термообработке подвергают как заготовки (слитки, отливки, штамповки, поковки, прокат), так и готовые изделия (сварные соединения, детали машин, инструмент).

Схема классификации основных видов термической обработки показана на рис.1.

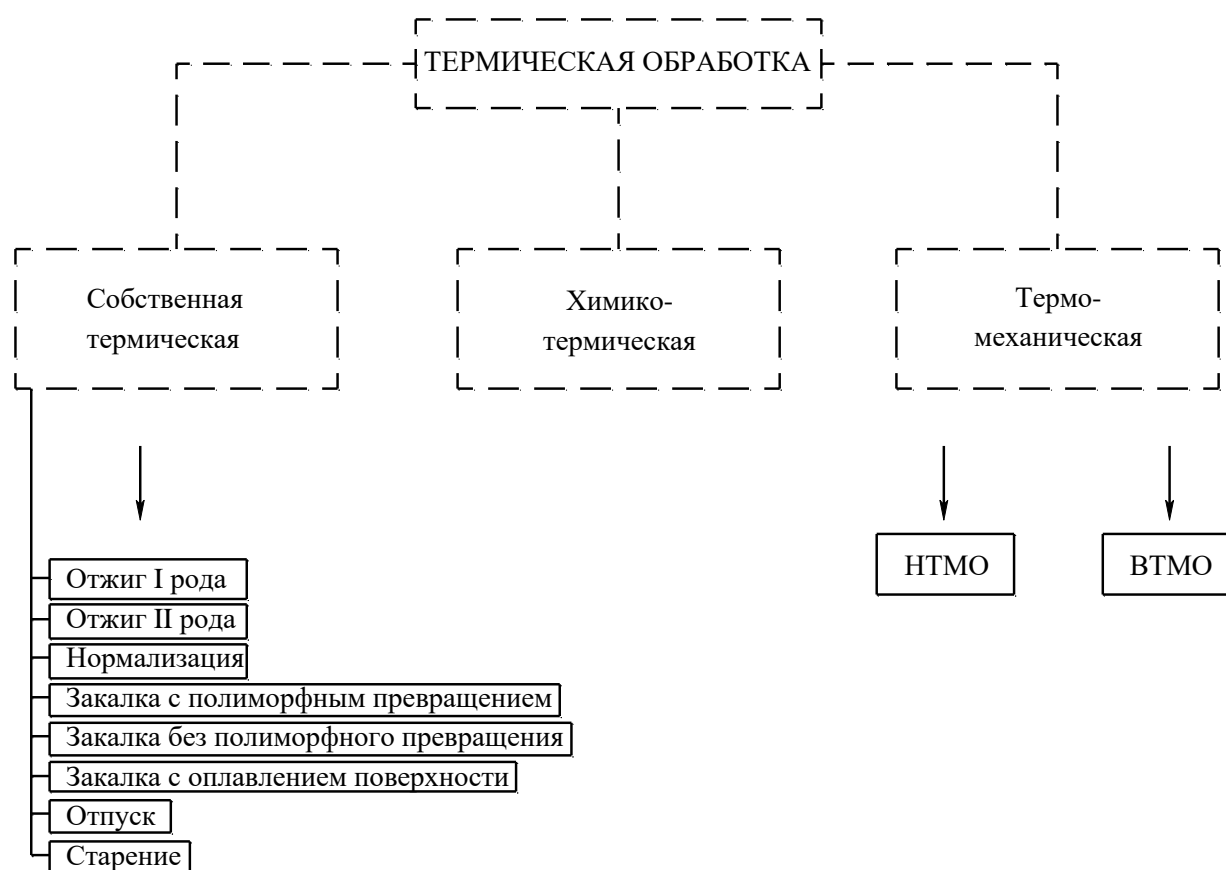


Рисунок 1. - Классификация основных видов термической обработки

**Собственная** термообработка заключается только в термическом воздействии на металл или сплав.

**Химико-термическая** обработка заключается в сочетании термического и химического воздействия на поверхность.

**Термомеханическая обработка** заключается в сочетании термического воздействия и пластической деформации.

Конструкционные стали подвергают *закалке* и *отпуску* для повышения прочности и твердости, получения высокой пластичности, вязкости и высокой износостойкости, а инструментальные – для повышения твердости и износостойкости.

**Отжиг** — вид термической обработки, заключающийся в нагреве до определённой температуры, выдержке в течение определенного времени при этой температуре и последующем, обычно медленном, охлаждении до комнатной температуры. При отжиге осуществляются процессы возврата (отдыха металлов), рекристаллизации и гомогенизации.

Цели отжига — снижение твердости для облегчения механической обработки, улучшение микроструктуры и достижение большей однородности металла, снятие внутренних напряжений.

**Старение металла** – это процессы, протекающие внутри металла и вызывающие изменения физических и механических свойств, внутренней структуры. Протекание данных процессов может происходить естественным путем (при большой длительности по времени и температуре, приближенной к 20 °С) и искусственным воздействием (термообработкой и пластическим деформированием).

Старение относится к разновидности термической обработки, при которой в закаленной стали происходит распад пересыщенного твердого раствора. Эту операцию назначают обычно для стабилизации размеров измерительного инструмента.

Большинство видов термической обработки имеют смысл, если в сплавах при этом происходят фазовые превращения: наблюдается полиморфизм компонентов или имеется переменная растворимость в твердом состоянии.

При разработке технологии термической обработки необходимо установить:

- режим нагрева детали или заготовки, в который входят температура нагрева, допустимые скорость и время нагрева;
- характер среды, где должен происходить нагрев;
- условия охлаждения (выбор охлаждающей среды);
- производительность труда при термообработке;
- экономичность выбранного процесса.

Режим термообработки назначают по критическим точкам ( $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ,  $A_{cm}$ ) диаграммы «железо-цементит» Fe-Fe<sub>3</sub>C и C - образной диаграммы превращения аустенита.

Условия нагрева определяются видом нагревательного устройства, к которым относятся нагревательные печи (топливные или электрические), соляные ванны или ванны с расплавленным металлом, установки индукционного нагрева токами промышленной частоты или токами высокой частоты.

Вид термической обработки определяется не характером изменения температуры во времени, а типом фазовых и структурных изменений в металле.

## 2. ОТЖИГ СТАЛИ

**Отжиг I рода** частично или полностью устраняет отклонения от равновесного состояния, возникающие при предыдущей обработке (литье, ковке, штамповке и т.д.), причем при его проведении не происходит фазовых превращений.

К отжигу I рода (рис. 1) относятся:

- гомогенизационный (диффузионный) отжиг;
- рекристаллизационный и дорекристаллизационный отжиг;
- отжиг уменьшающий напряжения.

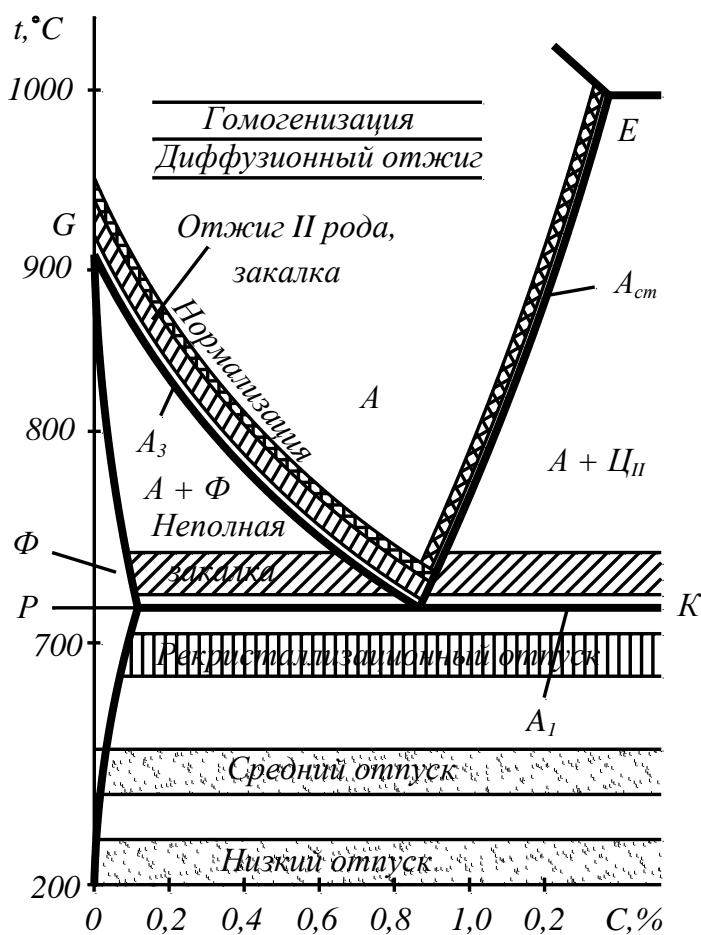


Рисунок 2. - Левый угол диаграммы Fe – Fe<sub>3</sub>C и температурные области при термической обработке сталей

**Цель гомогенизационного отжига** - устранение ликвации (выравнивание химического состава) в отливках, в слитках, в легированной стали.

Режим гомогенизационного отжига: нагрев до 1050-1200 °С, выдержка 8-10 часов, охлаждение с печью до 200-250 °С. Продолжительность процесса около 80-100 часов (рис. 2).

**Цель рекристаллизационного отжига** – устранение наклёпа холоднокатанной стали, содержащей 0,1– 0,2% углерода.

Режим рекристаллизационного отжига: нагрев до 600-700 °С ( $T_{\text{РЕКР}} = 0,4 T_{\text{ПЛ}}$  по абсолютной шкале), выдержка, которая зависит от геометрии изделий (для тонких листов 25-30 мин.) и охлаждение с печью.

**Цель отжига для снятия напряжений** - снятие напряжений в деталях из углеродистой стали.

Режим отжига для снятия напряжений: нагрев до 400 – 600 °С, выдержка 2,5 мин на 1 мм толщины детали, охлаждение с печью.

**Отжиг II рода** основан на использовании диффузионных (нормальных) фазовых (полиморфных) превращений при охлаждении. Целесообразность отжига II рода определяется тем, насколько сильно структурные изменения влияют на свойства металла или сплава.

Различают следующие разновидности отжига второго рода: полный, неполный, изотермический, нормализационный (нормализация).

**Полный отжиг II рода** используется для доэвтектоидных сталей (рис. 2). Режим такого отжига – нагрев на 20-30 °С выше точки  $A_3$ , выдержка, медленное охлаждение со скоростью 100-200 °С в час до 500 °С вместе с печью, далее охлаждение на воздухе. При нагреве структура (Ф + П) превращается в мелкую структуру аустенита, при последующем охлаждении получим мелкую феррито-перлитную структуру.

Заэвтектоидные стали полному отжигу не подвергают, так как получается цементитная сетка по границам зерен перлита.

**Неполный отжиг II рода.** Для заэвтектоидных сталей применяют неполный отжиг: нагрев до температуры между линиями  $A_1$  и  $A_{cm}$  (рис. 2), выдержка, медленное охлаждение (с печью).

При нагреве немного выше  $A_1$  и последующем медленном охлаждении, когда еще мало зерно аустенита, концентрация которого неоднородна и в его составе содержится еще большое количество нерастворившихся карбидов, образуется зернистый перлит. Неполный отжиг для заэвтектоидных сталей называют **сфероидизирующим**.

**Сфероидизирующим отжигом** (отжигом на зернистый перлит) называется нагрев стали на 10-30 °С выше точка  $A_{C1}$  с последующим медленным 20 – 50 °С/ч охлаждением до 650 °С. Часто применяется изотермический режим охлаждения, требующий меньше времени: охлаждение со скоростью 20 – 50 °С/ч до 620 – 680 °С, выдержка при этой температуре 1-3 часа, далее - охлаждение на воздухе.

Одного нагрева выше  $A_1$  и медленного охлаждения иногда бывает недостаточно для полной сфероидизации; эту операцию следует повторять несколько раз, т.е. сталь при отжиге нагревают до 730-740 °С, затем медленно охлаждают до 680 °С, затем снова нагревают до 730-740 °С и т.д. Такой отжиг называется **циклическим или маятниковым**, и он обеспечивает хорошую сфероидизацию цементита.

Цель такого отжига - получать структуру зернистого перлита и цементита в инструментальных сталях для улучшения обрабатываемости на металлорежущих станках. Стали с зернистым перлитом имеют твердость 160-180 НВ. Пластинчатый перлит имеет твердость 180-250 НВ.

**Изотермический отжиг II рода** - нагрев стали на 20-30 °С выше температуры точки  $A_3$ , выдержка, быстрое охлаждение ниже  $A_1$  (до 700-680 °С), при которой сталь выдерживается определенное время для полного изотермического превращения аустенита и образования феррито-перлитной структуры.

Преимущества изотермического отжига перед полным отжигом – это сокращение времени отжига и получение более однородной структуры.

**Нормализационный отжиг II рода (нормализация)** (рис. 2) – это такой вид термической обработки, при которой сталь нагревается на 30-50 °С выше точки  $A_3$  для доэвтектоидных сталей и выше точки  $A_{cm}$  для заэвтектоидных сталей с последующим охлаждением на спокойном воздухе.

В результате получают:

- более тонкое строение эвтектоида (тонкий перлит или сорбит);
- меньшие внутренние напряжения;
- выше твердость и прочность, чем после отжига;
- заэвтектоидные стали без грубой сетки вторичного цементита.

Главное при нормализации - экономия времени и энергии по сравнению с отжигом.

Нормализацию используют как промежуточную технологическую операцию вместо отжига или как окончательную при изготовлении сортового проката (рельсов, уголков, швеллеров и т.д.).

Для всех видов отжига применяют камерные толкательные печи, а также специальные агрегаты.

### 3. ЗАКАЛКА СТАЛИ

#### 3.1. ПОНЯТИЕ ЗАКАЛКИ СТАЛИ. СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

**Закалка** - термическая обработка с нагревом стали до температур, превышающих температуры фазовых превращений с выдержкой и последующим охлаждением металла или сплава со скоростью, превышающей критическую, с целью получения неравновесной структуры (мартенсита), либо пересыщенного раствора.

Результат закалки - повышение твердости и прочности.

Основными параметрами являются температура нагрева и скорость охлаждения. Продолжительность нагрева зависит от нагревательного устройства, по опытным данным на 1 мм сечения затрачивается: в электрической печи – 1,5...2 мин.; в пламенной печи – 1 мин.; в соляной ванне – 0,5 мин.; в свинцовой ванне – 0,1...0,15 мин.

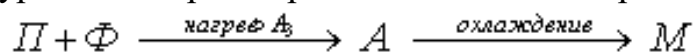
**Время нагрева** при закалке зависит от типа нагревательных устройств, размеров детали, химического состава (теплопроводности) стали, способа загрузки деталей в нагревательное устройство.

В зависимости от температуры нагрева различают следующие виды закалки:

**Полная закалка** применяется для доэвтектоидных сталей. При этом температура нагрева на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше критической температуры  $A_3$ :

$$T_n = A_3 + (30...50)^{\circ}\text{C}$$

Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:

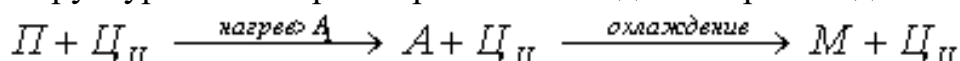


После полной закалки заэвтектоидных сталей получают дефектную структуру грубоиглочатого мартенсита.

**Неполная закалка** применяется для заэвтектоидных сталей. При этом температура нагрева на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше критической температуры  $A_1$ :

$$T_n = A_1 + (30...50)^{\circ}\text{C}$$

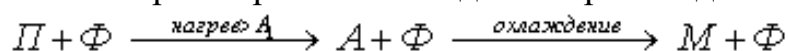
Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:



Т.о. после охлаждения в структуре получают мартенсит с включениями вторичного цементита. Такая структура обеспечивает высокую твердость и износостойкость режущего инструмента.

Верхний предел температур нагрева для заэвтектоидных сталей ограничивается, так как приводит к росту зерна, что снижает прочность и сопротивление хрупкому разрушению. Если температура нагрева заэвтектоидной стали выше  $A_{cm}$  (рис. 2) то после закалки получают дефектную структуру грубоиглочатого мартенсита.

Неполная закалка доэвтектоидных сталей недопустима, т.к. нагрев проводится в интервале температур  $A_1 - A_3$ , в результате структуре остается мягкий феррит. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:



В этом случае оставшийся в структуре остаточный феррит ухудшает свойства доэвтектоидной стали.

Заэвтектоидные стали перед закалкой обязательно подвергают отжигу – сфероидизации, чтобы цементит имел зернистую форму.

### 3.2. ОХЛАЖДЕНИЕ ПРИ ЗАКАЛКЕ

Скорость охлаждения при закалке устанавливают в зависимости от того, какую структуру в детали необходимо получить. Скорость охлаждения зависит от охлаждающей среды, формы изделия, теплопроводности стали.

Для получения требуемой структуры изделия охлаждают с различной скоростью, которая в большей степени определяется охлаждающей средой, формой изделия и теплопроводностью стали.

Режим охлаждения должен исключить возникновение больших закалочных напряжений. При высоких скоростях охлаждения при закалке возникают внутренние напряжения, которые могут привести к короблению и растрескиванию.

Внутренние напряжения, уравниваемые в пределах макроскопических частей тела, называются напряжениями I рода. Они ответственны за искажение формы (коробление) и образование трещин при термообработке. Причинами возникновения напряжений являются:

- различие температуры по сечению изделия при охлаждении;
- одновременное протекание фазовых превращений в разных участках изделия.

Для предупреждения образования трещин необходимо избегать растягивающих напряжений в поверхностных слоях изделия. На характер распределения напряжений при закалке, помимо режима охлаждения, оказывает влияние и температура нагрева под закалку. Перегрев содействует образованию закалочных трещин, увеличивает деформации.

Режим охлаждения должен также обеспечить необходимую глубину закаленного слоя.

Оптимальный режим охлаждения: максимальная скорость охлаждения в интервале температур  $A_1 - M_H$ , для предотвращения распада переохлажденного аустенита в области перлитного превращения, и минимальная скорость охлаждения в интервале температур мартенситного превращения  $M_H - M_K$ , с целью снижения остаточных напряжений и возможности образования трещин. Очень медленное охлаждение может привести к частичному отпуску мартенсита и увеличению количества аустенита остаточного, а следовательно к снижению твердости.

В качестве охлаждающих сред при закалке используют воду при различных температурах (при разных температурах от 18-50 °C), технические масла, растворы солей и щелочей (10 %-ный раствор NaOH в воде, 10 %-ный раствор NaCl в воде), расплавленные металлы, спокойный воздух.

Вода имеет существенный недостаток: высокая скорость охлаждения в интервале мартенситного превращения приводит к образованию закалочных дефектов. С повышением температуры воды ухудшается ее закалочная способность.

Наиболее высокой и равномерной охлаждающей способностью отличаются холодные 8...12 %-ные водные растворы NaCl и NaOH. Они мгновенно разрушают паровую рубашку и охлаждение происходит более равномерно и на стадии пузырькового кипения.

Увеличения охлаждающей способности достигают при использовании струйного или душевого охлаждения, например, при поверхностной закалке.

Для легированных сталей с высокой устойчивостью аустенита используют минеральное масло (нефтяное). Обеспечивающее небольшую скорость охлаждения в интервале температур мартенситного превращения и постоянство закалывающей способности. Недостатками минеральных масел являются повышенная воспламеняемость, низкая охлаждающая способность в интервале температур перлитного превращения, высокая стоимость.

При выборе охлаждающей среды необходимо учитывать *закалываемость* и *прокаливаемость* стали.

**Закаливаемость** – способность стали приобретать высокую твердость при закалке.

Закаливаемость определяется содержанием углерода. Стали с содержанием углерода менее 0,20 % не закаливаются.

**Прокаливаемость** - способность получать закаленный слой с мартенситной и троосто-мартенситной структурой, обладающей высокой твердостью, на определенную глубину.

За глубину закаленной зоны принимают расстояние от поверхности до середины слоя, где в структуре одинаковые объемы мартенсита и троостита.

Чем меньше критическая скорость закалки, тем выше прокаливаемость. Укрупнение зерен повышает прокаливаемость.

Если скорость охлаждения в сердцевине изделия превышает критическую то сталь имеет сквозную прокаливаемость.

Нерастворимые частицы и неоднородность аустенита уменьшают прокаливаемость.

Характеристикой прокаливаемости является *критический диаметр*.

**Критический диаметр** – максимальное сечение, прокаливающееся в данном охладителе на глубину, равную радиусу изделия.

С введением в сталь легирующих элементов закаливаемость и прокаливаемость увеличиваются (особенно молибден и бор, кобальт – наоборот).

### 3.3. СПОСОБЫ ЗАКАЛКИ

В зависимости от формы изделия, марки стали и нужного комплекса свойств применяют различные способы закалки и режимы (рис. 3)

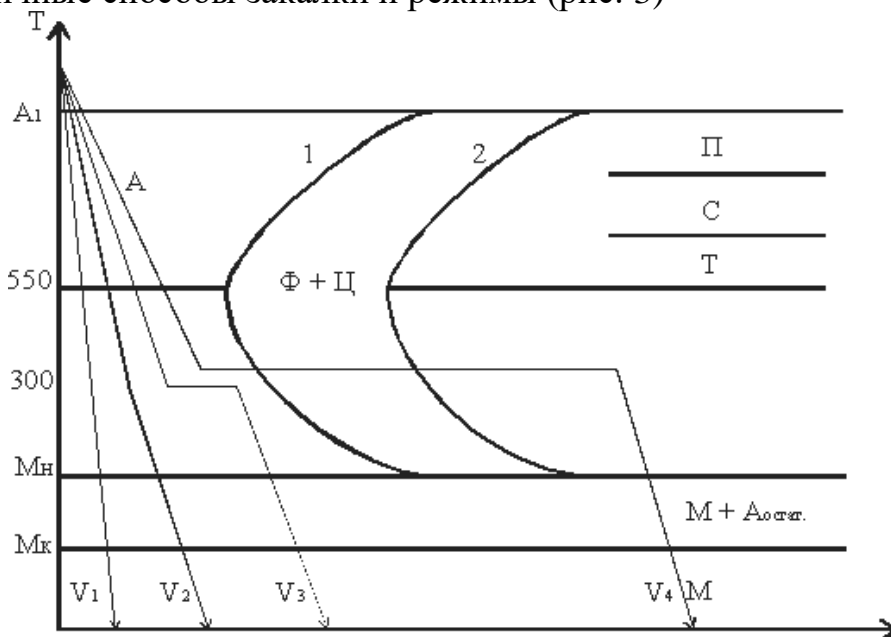


Рисунок 3. - Режимы закалки

#### 1. Закалка в одном охладителе ( $V_1$ )

Нагретую до нужной температуры деталь переносят в охладитель и полностью охлаждают. В качестве охлаждающей среды используют:



- воду – для крупных изделий из углеродистых сталей;
- масло – для небольших деталей простой формы из углеродистых сталей и изделий из легированных сталей.

Основной недостаток – значительные закалочные напряжения.

## 2. Закалка в двух средах или прерывистая ( $V_2$ )

Нагретое изделие предварительно охлаждают в более резком охладителе (вода) до температуры  $\sim 300$  °С и затем переносят в более мягкий охладитель (масло).

Прерывистая закалка обеспечивает максимальное приближение к оптимальному режиму охлаждения.

Применяется в основном для закалки инструментов.

Недостаток: сложность определения момента переноса изделия из одной среды в другую.

## 3. Ступенчатая закалка ( $V_3$ )

Нагретое до требуемой температуры изделие помещают в охлаждающую среду, температура которой на  $30 - 50$  °С выше точки  $M_H$  и выдерживают в течение времени, необходимого для выравнивания температуры по всему сечению. Время изотермической выдержки не превышает периода устойчивости аустенита при заданной температуре.

В качестве охлаждающей среды используют расплавленные соли или металлы. После изотермической выдержки деталь охлаждают с невысокой скоростью.

Способ используется для мелких и средних изделий.

## 4. Изотермическая закалка ( $V_4$ )

Отличается от ступенчатой закалки продолжительностью выдержки при температуре выше  $M_H$ , в области промежуточного превращения. Изотермическая выдержка обеспечивает полное превращение переохлажденного аустенита в бейнит.

**Бейнит** (по имени американского металлурга Э. Бейна, англ. *Edgar Bain*), игольчатый троостит, структура стали, образующаяся в результате так называемого промежуточного превращения аустенита. Бейнит состоит из смеси частиц пересыщенного углеродом феррита и карбида железа.

При промежуточном превращении легированных сталей кроме бейнита в структуре сохраняется аустенит остаточный. Образовавшаяся структура характеризуется сочетанием высокой прочности, пластичности и вязкости. Вместе с этим снижается деформация из-за закалочных напряжений, уменьшаются и фазовые напряжения.

В качестве охлаждающей среды используют расплавленные соли и щелочи.

Применяются для легированных сталей.

## 5. Закалка с самоотпуском

Нагретые изделия помещают в охлаждающую среду и выдерживают до неполного охлаждения. После извлечения изделия, его поверхностные слои

повторно нагреваются за счет внутренней теплоты до требуемой температуры, то есть осуществляется самоотпуск. Применяется для изделий, которые должны сочетать высокую твердость на поверхности и высокую вязкость в сердцевине (инструменты ударного действия: мототки, зубила).

#### 4. ОТПУСК СТАЛИ

Отпуск является окончательной термической обработкой.

Целью отпуска является повышение вязкости и пластичности, снижение твердости и уменьшение внутренних напряжений закаленных сталей.

С повышением температуры нагрева прочность обычно снижается, а пластичность и вязкость растут. Температуру отпуска выбирают, исходя из требуемой прочности конкретной детали.

Различают три вида отпуска:

1. *Низкий отпуск* с температурой нагрева  $T_H = 150...300\text{ }^\circ\text{C}$ .

В результате его проведения частично снимаются закалочные напряжения. Получают структуру – *мартенсит отпуска*.

Проводят для инструментальных сталей; после закалки токами высокой частоты; после цементации.

2. *Средний отпуск* с температурой нагрева  $T_H = 300...450\text{ }^\circ\text{C}$ .

Получают структуру – *троостит отпуска*, сочетающую высокую твердость 40...45HRC с хорошей упругостью и вязкостью.

Используется для изделий типа пружин, рессор.

3. *Высокий отпуск* с температурой нагрева  $T_H = 450...650\text{ }^\circ\text{C}$ .

Получают структуру, сочетающую достаточно высокую твердость и повышенную ударную вязкость (оптимальное сочетание свойств) – *сорбит отпуска*.

Используется для деталей машин, испытывающих ударные нагрузки.

Комплекс термической обработки, включающий закалку и высокий отпуск, называется *улучшением*.

#### Отпускная хрупкость

Обычно с повышением температуры отпуска ударная вязкость увеличивается, а скорость охлаждения не влияет на свойства. Но для некоторых сталей наблюдается снижение ударной вязкости. Этот дефект называется *отпускной хрупкостью* (рис. 4).

**Ударная вязкость** — способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки.

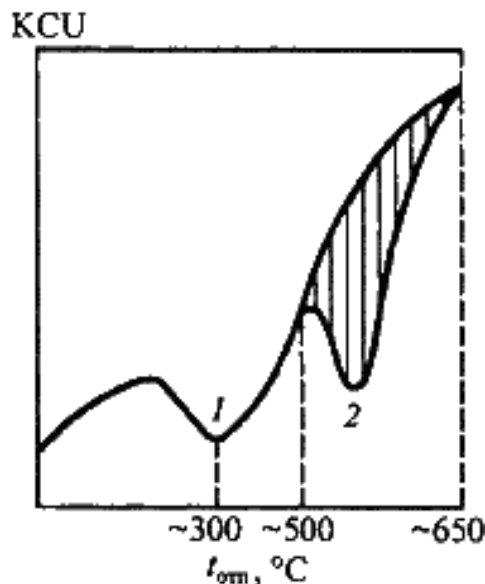


Рисунок 4. - Зависимость ударной вязкости от температуры отпуска

**Отпускная хрупкость I рода** наблюдается при отпуске в области температур около  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Она не зависит от скорости охлаждения.

Это явление связано с неравномерностью превращения отпущенного мартенсита. Процесс протекает быстрее вблизи границ зерен по сравнению с объемами внутри зерна. У границ наблюдается концентрация напряжений, поэтому границы хрупкие.

Отпускная хрупкость I рода “необратима”, то есть при повторных нагревах тех же деталей не наблюдается.

**Отпускная хрупкость II рода** наблюдается у легированных сталей при медленном охлаждении после отпуска в области  $450\dots650\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При высоком отпуске по границам зерен происходит образование и выделение дисперсных включений карбидов. Приграничная зона обедняется легирующими элементами. При последующем медленном охлаждении происходит диффузия фосфора к границам зерна. Приграничные зоны обогащаются фосфором, снижаются прочность и ударная вязкость. Этому дефекту способствуют хром, марганец и фосфор. Уменьшают склонность к отпускной хрупкости II рода молибден и вольфрам, а также быстрое охлаждение после отпуска.

Отпускная хрупкость II рода “обратима”, то есть при повторных нагревах и медленном охлаждении тех же сталей в опасном интервале температур дефект может повториться.

Стали, склонные к отпускной хрупкости II рода, нельзя использовать для работы с нагревом до  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  без последующего быстрого охлаждения.