

Отпуск и старение стали



Для повышения пластичности, вязкости, снижения твердости и уменьшения внутренних напряжений металлические сплавы после закалки подвергаются нагреву. Температура нагрева лежит ниже температуры фазовых превращений и колеблется, как и время выдержки, в довольно широких пределах в зависимости от состава сплава и характера ожидаемой структуры. Такой нагрев для сталей называется **отпуском**.



Отпуск стали (ОС) — это разновидность термической обработки, при которой происходит постепенный нагрев металла с последующим его остыванием. В большинстве случаев отпускную процедуру выполняют на заключительном этапе сразу же после закалки. ОС может выполняться как до, так и после формирования детали из стального полуфабриката. Позволяет устранить **внутренние напряжения** внутри металла, которые негативно влияют на его физическую структуру, свойства.



Заключительной операцией термической обработки является **отпуск** **стали**, который включает в себя:

- нагрев закаленной стали до температур, лежащих ниже критической точки L_c ;
 - выдержку при данной температуре;
 - последующее охлаждение с заданной скоростью.
- При отпуске формируются окончательная структура и свойства изделия.

Отпуск полностью или частично устраняет **внутренние напряжения**, возникающие при закалке. Эти напряжения снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска.



Внутренние напряжения на химическом уровне — это нарушения кристаллической структуры металла. Из-за них происходит неравномерное распределение углерода, легирующих добавок по металлическому сплаву.

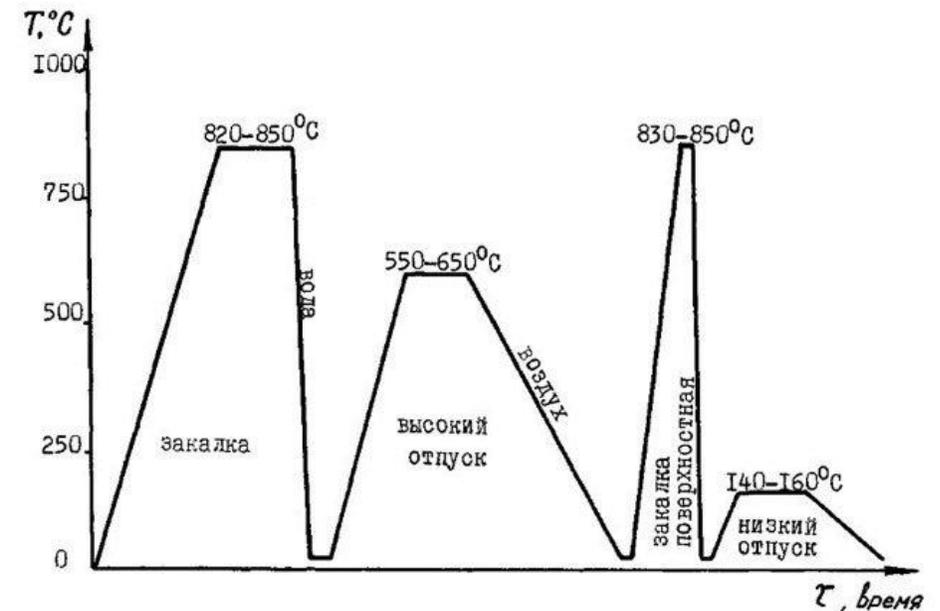
Отпуск позволяет перераспределить эти элементы более равномерно. Это улучшает физико-химические свойства материала (пластичность, прочность, сохранение формы, химическая инертность).



- Нагрев осуществляется с помощью специальных печей в защитной среде (масляные, селитровые или щелочные ванны).
- Способ охлаждения деталей после нагрева — воздушный (обычно) или жидкостной (редко).

Качество отпуска стали зависит от следующих физических параметров термической процедуры:

- **Температура нагрева.** ОС может выполняться при температурах от 100 до 700 градусов, а чем выше будет температура нагрева, тем выше лучше будет качество обработки. Объясняется эта зависимость тем, что при более высоких температурах происходит более глубокое изменение структуры кристаллической решетки. В основном за счет процессов полигонизации, рекристаллизации.
- **Длительность нагрева.** Длительность ОС обычно составляет от 1 до 3 часов, хотя существуют и более длительные форматы. Все основные процессы в материале проходят в первые 20-40 минут. Дополнительная выдержка нужна для равномерного распределения атомов углерода, железа, легирующих добавок по всей толщине материала.
- **Скорость остывания.** Здесь правило предельно простое — чем медленнее будет проходить остывание, тем выше будет качество материала. Чтобы замедлить остывание, металлурги используют различные уловки, хитрости. Главная хитрость — это помещение материала в масляную, селитровую или щелочную среду, которая замедляет остывание материала.



Виды отпуска стали

Главный технический параметр ОС — это температура нагрева.

Различают 3 типа ОС — высокий, средний и низкий. Конечно, высокотемпературный отпуск является оптимальным средством обработки, поскольку чем выше температура нагрева, тем более активно будет происходить рекристаллизация металла. Однако низко- и среднетемпературные способы обработки также имеют практическую пользу, которую не стоит недооценивать. Ниже мы рассмотрим каждый тип ОС по отдельности.

Высокий отпуск стали —

это вариант отпускной обработки при температуре от 500 до 700 градусов. **Данный способ является самым эффективным, поскольку при таком нагреве происходит полигонизация и рекристаллизация материала, что позволяет устранить все напряжения внутри металла.** Обычно длится от 2 до 3 часов. В случае обработки сложных конструкций рекомендованное время может увеличиваться до 6 часов.

В ходе высокого отжига происходит процесс **рекристаллизации** (приводящей вещество в состояние большей термодинамической устойчивости) в сочетании со сфероидизацией цементита. Частицы цементита приобретают округлую форму размером от 0,5 до 2 мкм., приобретается структура сорбита отпуска с зернистой формой. Сорбит отпуска наделяет сталь повышенной ударной вязкостью. Легированные стали приобретают структуру зернистого перлита. Обеспечивается структурная стабильность, снимается внутреннее напряжение.



Главный недостаток высокотемпературного отпуска — это небольшое снижение прочности материала. Поэтому методика не годится для обработки деталей, которые во время эксплуатации будут испытывать сверхвысокую нагрузку. Высокотемпературная методика распространяется на все виды стали, однако обратите внимание, что в случае некоторых легированных сплавов во время обработки может возникнуть так называемая обратимая высокотемпературная хрупкость.

Основная особенность среднего отпуска —

активная диффузия углерода без полигонизации и рекристаллизации сплава. В случае среднетемпературной обработки улучшается упругость материала, повышается его релаксационная стойкость. Температура отпуска стали в данном случае находится в пределах от 350 до 500 градусов. Средний срок проведения обработки — 2-4 часа. Оптимальная среда — маслянистая или щелочная. Средняя обработка хорошо подходит для прочных деталей сложной формы — рессоры, пружины, ударные конструкции.

На практике данная технология используется редко в связи с рядом ограничений:

- В температурной диапaзоне от 250 до 300 градусов находится так называемый островок хрупкости первого рода, которого следует избегать. Одновременно с этим при температуре выше 500 градусов находится другой островок хрупкости второго рода (его тоже рекомендуется избегать).
- Методика не имеет преимуществ в сравнении с альтернативными технологиями (низкой и высокой). Одновременно с этим слабые печи для обработки обычно не могут нагревать рабочую среду до таких температур, а более сильные печи могут нагреваться до более высоких температур, что неудобно с практической точки зрения.



Низкий отпуск стали —

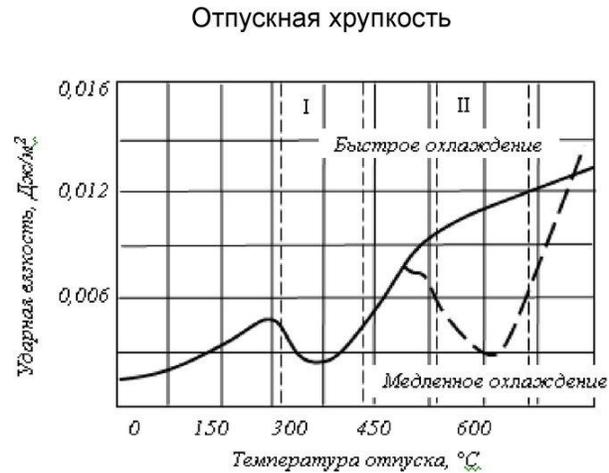
методика обработки стального сплава или изделия, при которой нагрев осуществляется до температуры от 100 до 250 градусов. Срок обработки обычно составляет 1-3 часа в зависимости от типа детали, ее габаритов. Во время низкотемпературной обработки происходит диффузия частиц углеродистых компонентов без полигонизации и рекристаллизации атомной решетки. **Это позволяет повысить некоторые физические характеристики материала — прочность, пластичность, твердость, химическую инертность.**

Низкий отпуск — универсальная технология, однако по факту ее применяют в основном для отпуска изделий из низколегированных и высокоуглеродистых сталей (ножи, посуда, простые детали). Также нужно избегать нагрева материала выше температуры 250 градусов (в противном случае он попадет в островок хрупкости первого рода, что чревато необратимой порчей металла).



Явление отпускной хрупкости

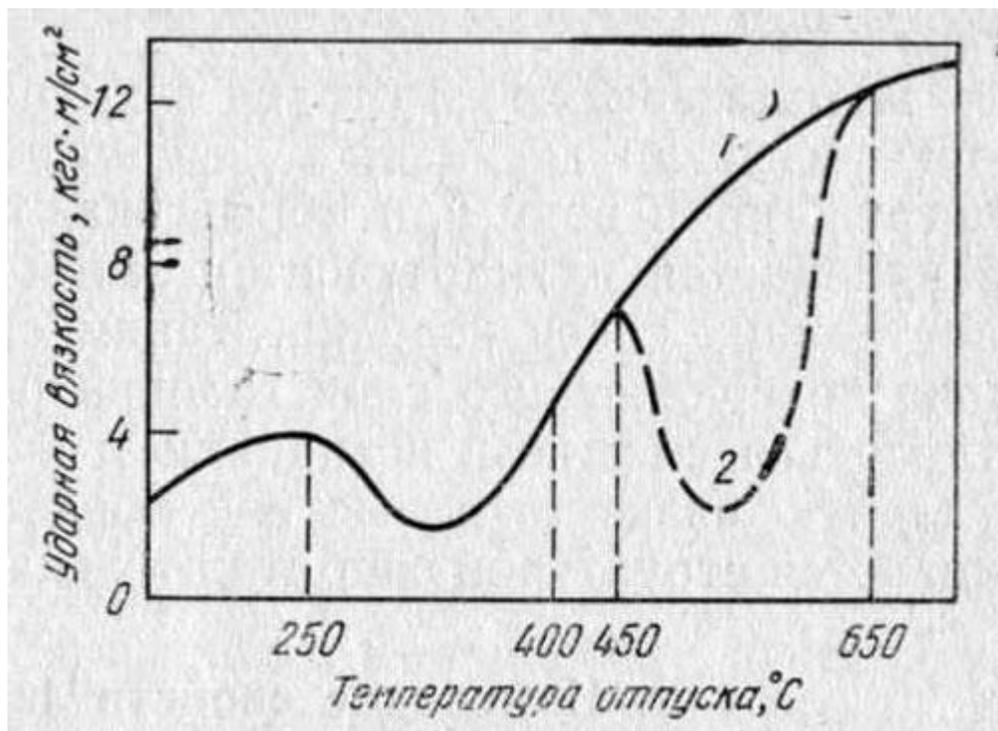
Отпускная хрупкость — процесс изменение ударной вязкости материала. Он становится более хрупким, неустойчивым к физическим нагрузкам. При этом другие характеристики не меняются. Появляются такие изменения могут при температурном диапазоне 250–550 градусов.



- ! Чтобы повысить показатель прочности, нужно провести дополнительную термическую обработку. Однако на втором этапе нагревания и остужения необходимо быстро отсудить заготовку. Для этого её погружают в воду или масло.

Отпускная хрупкость присуща многим сталям.

Сталь в состоянии отпускной хрупкости характеризуется низкой ударной вязкостью. На других механических свойствах при комнатной температуре состояние отпускной хрупкости практически не сказывается.

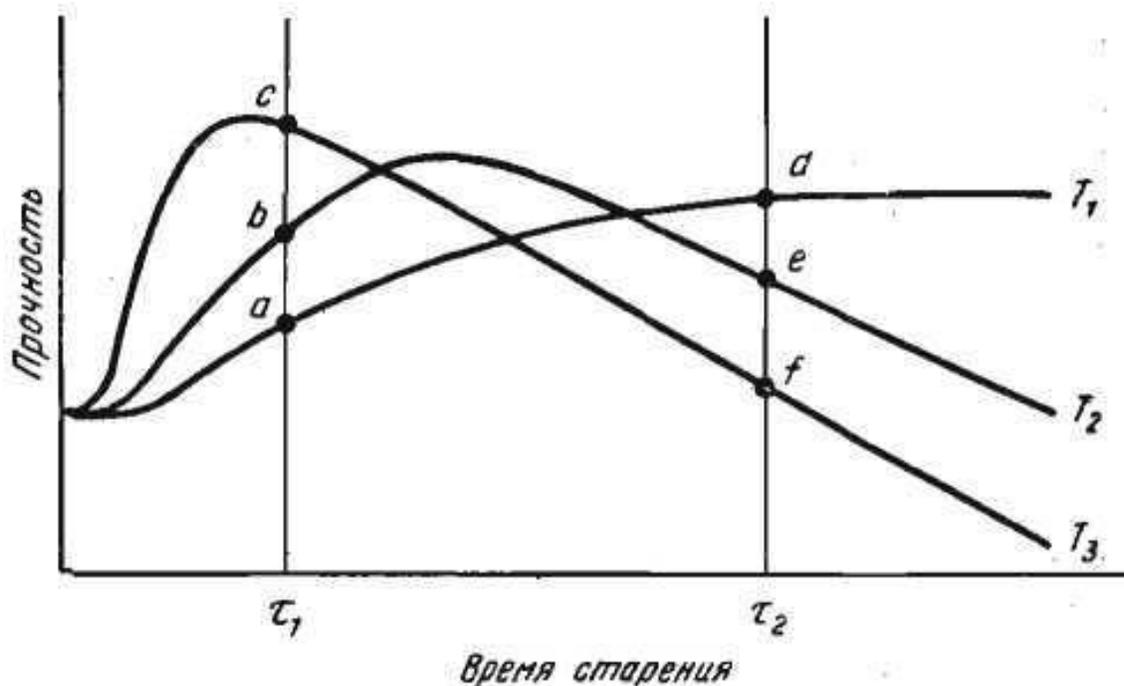


На рисунке схематично показано влияние температуры отпуска на ударную вязкость легированной стали, в сильной степени склонной к отпускной хрупкости.

Во многих легированных сталях наблюдаются два температурных интервала отпускной хрупкости. При отпуске в интервале 250 — 400 °C возникает необратимая, а в интервале 450 — 650 °C — обратимая отпускная хрупкость.

Влияние температуры отпуска на ударную вязкость стали

Старение заключается в переходе сплава от неустойчивого к более устойчивому состоянию. Этот процесс протекает и без нагрева (естественное старение), но в этом случае он растягивается на значительный срок – иногда до нескольких лет. Гораздо интенсивнее протекают процессы старения при повышенных температурах. Принципиальных отличий в процессах, происходящих при отпуске и старении, нет.



Для сталей термин старение и искусственное старение применяется обычно при обозначении нагрева после наклепа изделия и в тех случаях, когда небольшому нагреву подвергаются незакаленные детали. Старение закаленных цветных сплавов обычно приводит к значительному повышению их механических свойств. Некоторые сплавы алюминия (дуралюмин) имеют прочность после отжига 20 кГ/мм^2 , после закалки 25 кГ/мм^2 , а после старения $40 - 45 \text{ кГ/мм}^2$.

Процесс старения

Старение в качестве температурной обработки используется как заключительная операция. Применяется к тем металлам и сплавам, у которых пересыщенный твердый раствор может выделять избыточный компонент и самопроизвольно распадаться.

После проведения процедуры старения у металла увеличиваются твердость и прочность, но при этом снижаются вязкость и пластичность, но эти значения сохраняются на протяжении срока работы.

Старение стали производится для изменения внутренней структуры после закалки. Полученный твердый раствор феррита пресыщенный углеродом и азотом при нагревании распадается.

В зависимости от количества содержания углерода в сплаве внутренняя структура может приобретать форму:

- дискообразную
(в виде тонких пластинок);
- сферическую;
- кубическую;
- игольчатую.



На рисунке показана модель Орована, которая иллюстрирует перемещение дислокаций. Максимального эффекта добиться возможно при естественном старении, но время затраченное на это будет значительным. Увеличить скорость протекания процесса можно искусственным старением, но при этом прочностные характеристики будут снижены.

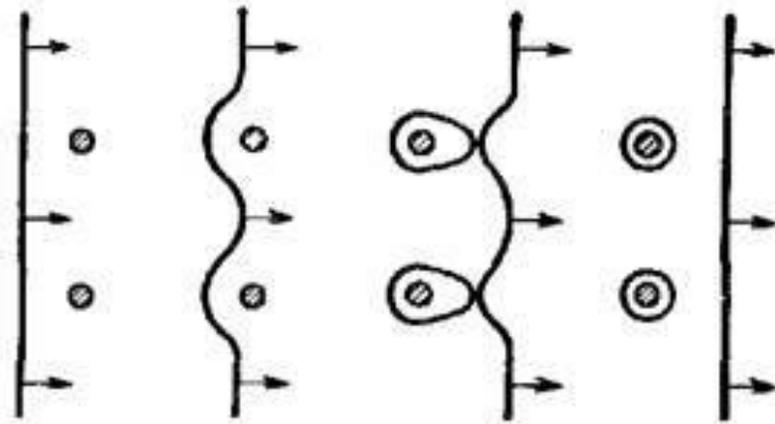


Рис. 38. Петли дислокаций вокруг частиц, пересекающих плоскость скольжения; дислокации перемещаются слева направо (модель Орована)

На графике отчетливо видно, что сокращение времени старения не позволяет получить высокую твердость.

Течение процесса старения во многом зависит от углерода и азота. Особенно это заметно в малоуглеродистых сталях. Азот с уменьшением температуры начинает хуже растворяться в альфа железе. Например, при температуре 590°C растворенного азота содержится $0,1\%$, но уже при 20°C его содержание снижается до $0,004\%$. При старении альфа раствор выделяет нитриды. Поэтому влияние азота менее выражено по сравнению с тем же углеродом при температурном воздействии.

При увеличении углерода в сталях увеличивается эффект изменения структуры, получаемый при термическом воздействии. Объем углерода, максимум которого может раствориться в альфа железе составляет $0,02-0,04\%$. При таком содержании закаленное изделие, подвергнутое естественному старению обладает твердостью в полтора раза выше чем после отжига.

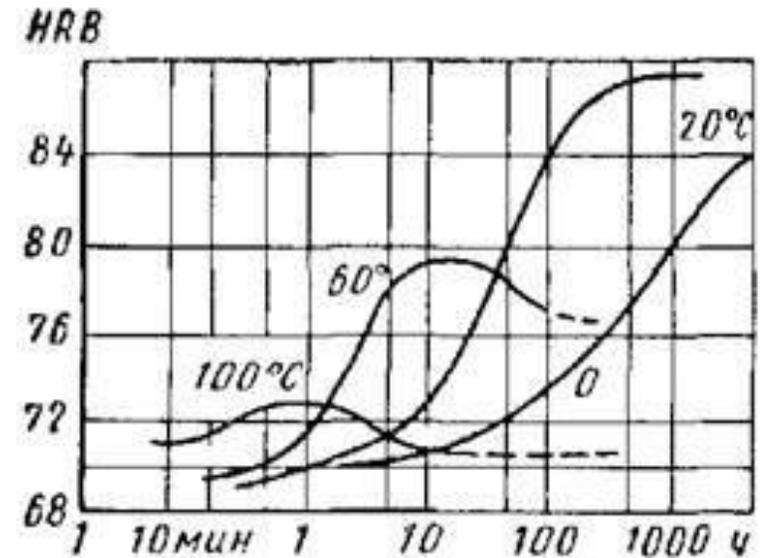


Рис. 39. Изменение твердости закаленной от 730°C низкоуглеродистой стали ($0,06\% \text{C}$) в зависимости от температуры и длительности старения

Механическое и термическое старение

Существует два вида старения металла:

- Термическое
- механическое.

Рассмотрим каждый из них более подробно.



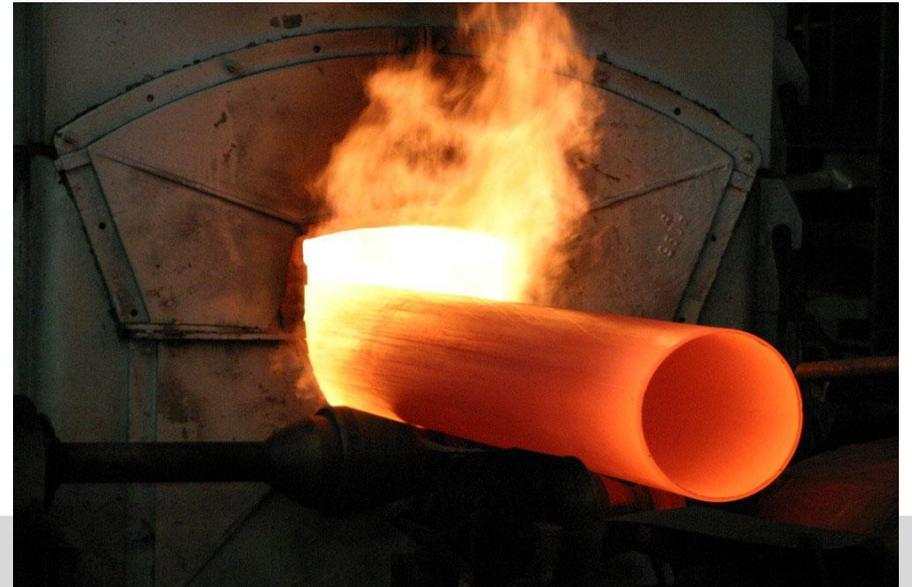
© Концерн «Союзэнерго»

Термическое старение

Фаза упрочняющая металл во время термического воздействия происходит в точке максимума. Здесь проходит метастабильный промежуток раствора в зоне Гинье-Престона. Такой вид упрочнения металлов и сплавов принято называть дисперсионным.

При более длительной выдержке начинается перестаривание, то есть снижение прочностных характеристик. На это влияют:

- коагуляция;
- частичная замена частиц некогерентными.



Виды термического старения металла:

- **Двухступенчатое** – закалка, затем выдержка при температуре замещения, а потом выдерживание с повышенной температурой для получения однородности твердого раствора.
- **Закалочное** – закалка и одна фаза выдержки с естественным охлаждением.
- **Естественное** – для алюминиевых сплавов.
- **Искусственное** – для сплавов из цветных металлов с нагревом до температуры выше той, которая используется для естественной деструкции.
- **Стабилизационное** – высокая температура старения и длительный срок выдержки помогают сохранить размеры и свойства детали.



Механическое старение металла

Деструкция стали при помощи деформирующих усилий происходит в диапазоне температур ниже процесса рекристаллизации. Обусловлено это образованием и движением дислокаций. При холодной пластической деформации увеличивает плотность дислокаций, которые далее еще больше увеличиваются при увеличении нагрузок.

Изменяющиеся механические свойства металла вызывает движение атомов углерода и азота к дислокациям, которые размещены в альфа растворе. Достигнув дислокаций атомы образуют облака (атмосферы Котрелла). Данные скопления препятствуют движению дислокаций, благодаря чему происходит изменение свойств. Появляются присущие состаренным термообработкой деталям свойства.

Если на эффект старения деформированием сильно влияют азот, никель и медь, то с добавками ванадия, титана и ниобия данный эффект полностью пропадает. Поэтому рекомендуется использовать сталь с содержанием алюминия 0,02-0,07%.

Искусственное старение —

это отпуск при невысоком нагреве. При искусственном старении детали нагревают до температуры 120—150 °С и выдерживают при ней в течение 10—35 часов.

Длительная выдержка позволяет, не снижая твердости закаленной стали, стабилизировать размеры деталей.

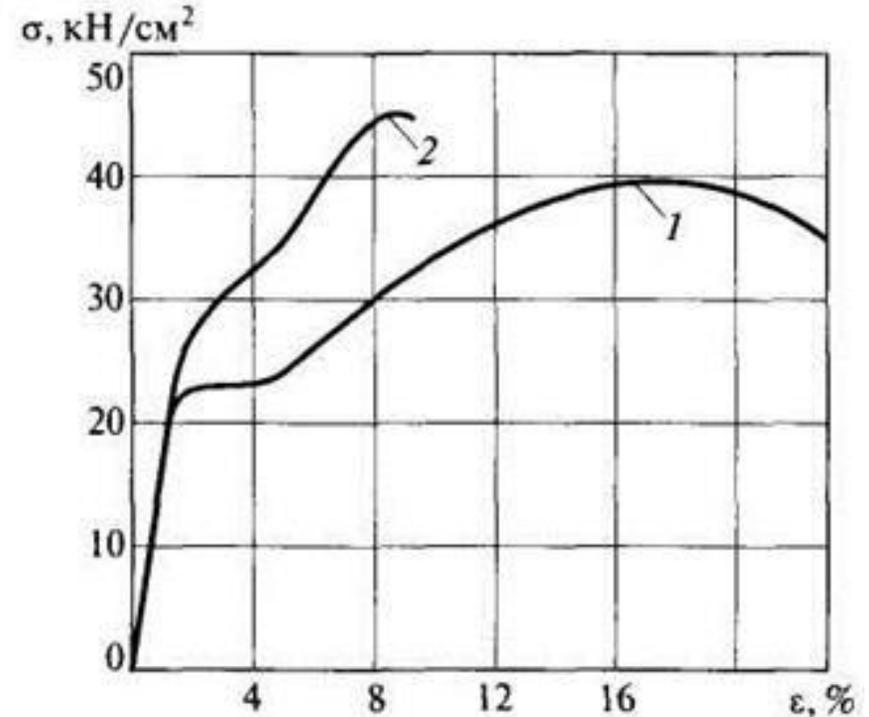


Рис. 1.8. Влияние старения на свойства стали:

1 — сталь в холодном состоянии; 2 — сталь после старения

Искусственное старение металла (термообработка) применяется к тем сплавам, в которых растворимость одного элемента в твердом состоянии значительно снижена.

Это проявляется при снижении температуры. Во время искусственного старения в сталях с низким содержанием углерода, не выше 0,05%, распадается пресыщенный твердый альфа раствор. При этом выделяются избыточные фазы. Такая метаморфоза приводит к тому, что снижается пластичность, но приводит к увеличению твердости и прочности.



Рекомендуемые режимы для проведения старения

Термическая обработка:

- для сталей с высоким содержанием углерода: температура порядка 130°C - 150°C , время выдержки порядка 25-30 часов;
- для сплавов из цветных металлов: температура порядка 250°C , время выдержки порядка 1 часа.

Пластическая обработка:

- для естественного процесса: температура порядка 20°C ;
- для искусственного протекания процесса: температура порядка 250°C , время выдержки порядка 1 часа.

Температура нагрева и время выдержки подбирается индивидуально к каждой марке металла и к сплаву в зависимости от их состава.



Термообработка инструментальных сплавов

Инструментальные сплавы или быстрорежущие металлы, использующиеся для изготовления износоустойчивых инструментов, обязательно подвергаются термообработке. При повышении температур у них не увеличивается показатель пластичности и не снижается прочность.

Чтобы улучшить характеристики инструментальных сплавов, в их состав добавляют легирующие присадки — вольфрам, молибден, ванадий или кобальт. Далее заготовки закаляются при температуре в 1200 градусов.



Заключение



Отпуск считается одним из ключевых этапов термообработки. Он позволяет снять внутреннее напряжение, повысить прочность металла. Важно подобрать правильный температурный режим и скорость охлаждения заготовки. Для охлаждения применяются емкости с различными растворами.

**Спасибо за
внимание!**