

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы

1. Изучить теоретический материал по теме работы.
2. Получить представление об операциях термической обработки, применяемых для упрочнения и разупрочнения углеродистых сталей. Изучить взаимосвязь между содержанием углерода в стали, структурой и механическими свойствами стали после термической обработки.
3. Научиться выбирать режим термической обработки стали для получения необходимых в эксплуатации свойств.
4. Выполнить индивидуальное задание.

Основные сведения по теме работы

Термическая обработка – совокупность операций нагрева и охлаждения с целью изменить структуру и свойства сплава в нужном направлении.

Любую операцию термической обработки можно представить графически в виде кривой в координатах «температура – время», включающей участки нагрева, выдержки и охлаждения. Главные параметры, определяющие результат термической обработки, – *температура нагрева t_n , время выдержки τ_v и скорость охлаждения $v_{охл}$* . (рис. 6.1).

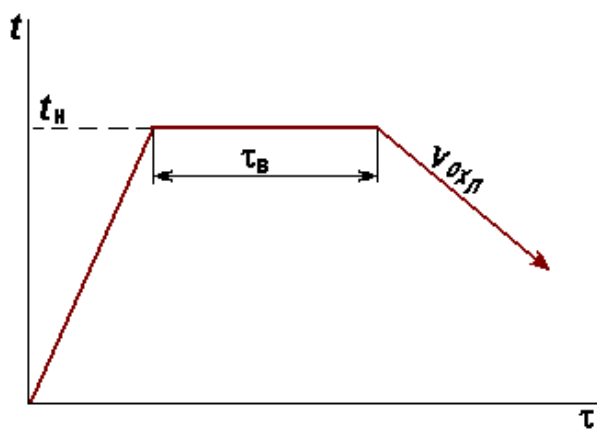


Рис. 6.1. Графическое изображение режима термической обработки

Различают *упрочняющую* термическую обработку, при которой повышаются твёрдость, прочность и износостойкость, и *разупрочняющую* обработку, повышающую пластические свойства и вязкость, но снижающую твёрдость и сопротивление деформации и разрушению.

Для стальных изделий широко применяются оба варианта термической обработки.

Термическая обработка стали основана на фазовых превращениях,

происходящих при её нагреве выше критических температур и охлаждении с различными скоростями. Благодаря разной растворимости углерода в железе с ОЦК и ГЦК решёткой, существует возможность значительного упрочнения стали в результате закалки. Получаемый при закалке пересыщенный твёрдый раствор углерода в α -железе можно подвергнуть отпуску для получения более равновесных структур. При этом в зависимости от режима отпуска можно получить широкий спектр механических характеристик стали, что обуславливает её применение для деталей и конструкций, работающих в разных условиях нагружения.

Превращения при нагреве стали

Температуры превращений, или критические точки, при нагреве стали принято обозначать (рис. 6.2):

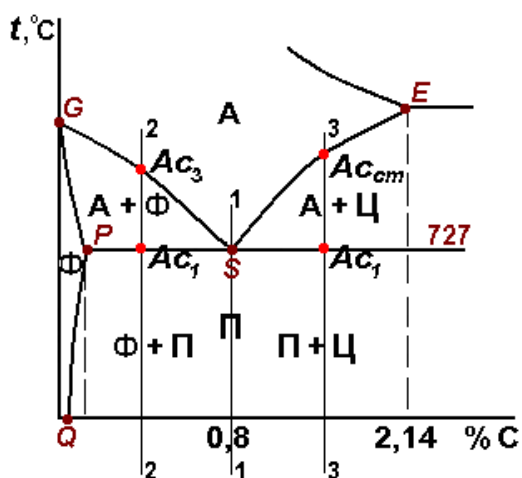


Рис. 6.2. Критические точки при нагреве стали

- начало превращения феррита в аустенит ($\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\gamma$) — A_{c1} (эти точки расположены на линии PSK);
- завершение превращения феррита в аустенит ($\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\gamma$) — A_{c3} (эти точки лежат на линии GS);
- окончание растворения цементита в аустените — A_{cm} (точки находятся на линии SE).

Точки A_2 относятся к магнитному, а не фазовому превращению.

Следует обратить внимание на то, что точки A_{c3} и A_{cm} — свои для каждой стали, а точка A_{c1} — одна для всех углеродистых сталей: 727°C .

Основные виды термообработки стали — отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг

Отжиг является разупрочняющей термической обработкой.

Отжигом I рода называют нагрев стали с неравновесной в результате предшествующей обработки структурой до (или ниже) температуры фазового превращения.

Обычно причиной появления неравновесной структуры является холодная обработка давлением или ускоренное охлаждение после горячей обработки. Температурный режим отжига I рода не связан с фазовыми превращениями в стали.

Цель: Перевести сталь в более устойчивое, равновесное состояние.

Пример: *рекристаллизационный отжиг* для снятия наклёпа; *смягчающий отжиг* для улучшения обрабатываемости резанием (его ещё называют *низким*).

Отжигом II рода называют нагрев стали выше температуры фазового превращения с последующим медленным охлаждением (вместе с печью).

Цель: Получить устойчивое, равновесное состояние (как на диаграмме).

Разновидности:

1) *Полный отжиг* доэвтектоидных (конструкционных) сталей выполняется с целью полной фазовой перекристаллизации.

Для этого сталь нагревают на $30\text{--}50^\circ$ выше критической точки A_{c3} (т. е. линии GS) и после небольшой выдержки медленно охлаждают. Практически детали охлаждаются вместе с печью со скоростью $30\text{--}100^\circ\text{C/ч}$ (рис. 6.3).

При нагревании феррит и перлит доэвтектоидной стали превращаются в аустенит. Затем, при медленном охлаждении, распад аустенита происходит в верхней части C-образной диаграммы с образованием новых зёрен феррита и перлита. Таким образом, если структура была дефектная (крупные зёрна, зёрна

искажённой формы и т. п.), то при полном отжиге она исправляется, получается однородной и мелкозернистой. Сталь после отжига имеет хорошие пластические свойства и низкую твёрдость. Это обеспечивает хорошую обрабатываемость стали резанием и давлением.

Отжиг полностью снимает остаточные напряжения.

2) *Неполный отжиг* заэвтектоидных (инструментальных) сталей выполняется с целью получения структуры зернистого перлита. Для этого сталь нагревают на $30-50^\circ$ выше критической точки A_{c1} (т. е. линии PSK). Применяют несколько различных режимов (рис. 6.4).

В результате отжига цементитные пластины растворяются только отчасти, и при охлаждении получаются сферические, а не пластинчатые кристаллы цементита. Поэтому такой отжиг называют еще *сфероидизирующим*. Инструментальные стали со структурой зернистого перлита мягче и пластичнее, чем с пластинчатым перлитом. Этот способ отжига повышает обрабатываемость стали и улучшает её структуру перед закалкой.

При неполном отжиге доэвтектоидной стали ферритная составляющая структуры не изменяется, так как феррит сохраняется при нагреве. Поэтому полного исправления структуры не происходит.

3) *Диффузионный отжиг* стальных отливок и поковок выполняют с целью устранения неоднородности литой или деформированной структуры. Устранение микроликвации достигается за счет диффузионных процессов. Поэтому, чтобы обеспечить высокую скорость диффузии, сталь нагревают до высоких температур в аустенитной области (близких к солидусу). Для сталей это чаще всего температуры $1000-1200^\circ\text{C}$. При этих температурах делается длительная выдержка (8–15 ч) и затем медленное охлаждение. Выравнивание состава стали улучшает механические свойства, особенно пластичность.

Температурные интервалы нагрева стали при отжиге показаны на рис. 6.5.

Нормализация

Нормализация является разновидностью отжига II рода с ускоренным охлаждением.

Нормализация заключается в нагреве стали до температур на $50-70^\circ$ выше линии GSE (рис. 6.5) и в охлаждении на воздухе после небольшой выдержки. В этом случае распад аустенита происходит в верхней части С-образной диаграммы,

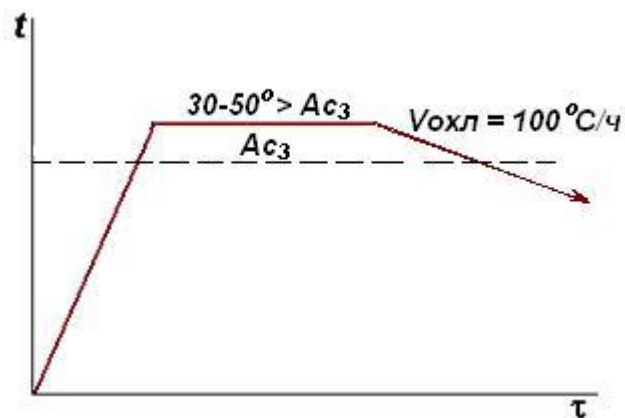


Рис. 6.3. Режим полного отжига

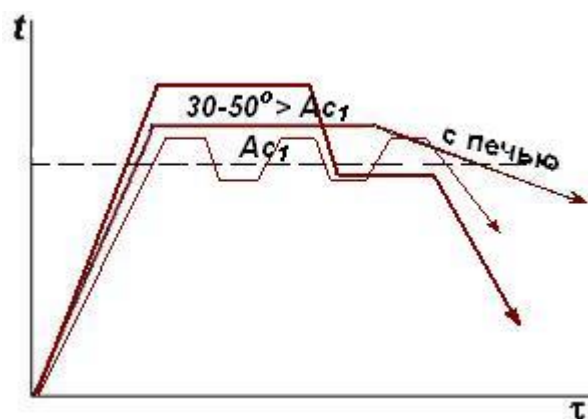


Рис. 6.4. Режим неполного отжига

но при несколько меньших температурах, чем при отжиге. Это связано с более быстрым охлаждением.

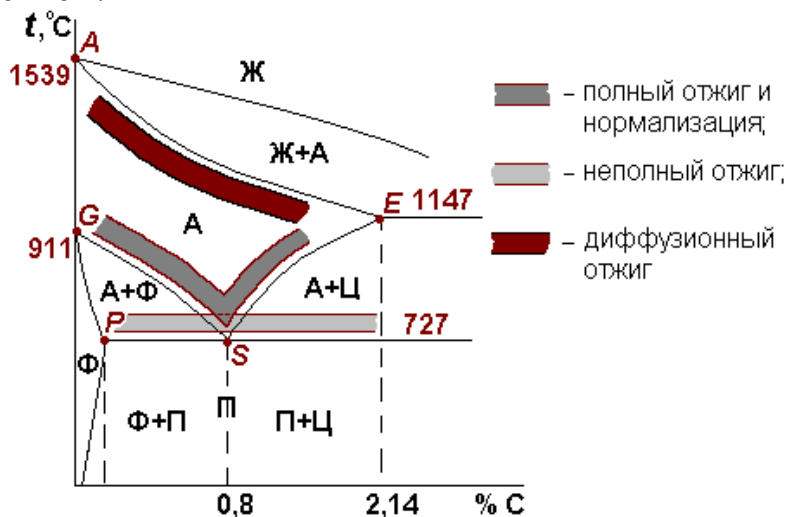


Рис. 6.5. Температурные интервалы нагрева стали при отжиге

Поэтому при нормализации получается более мелкая перлитная структура, чем при полном отжиге. Может даже образоваться сорбит — более мелкая, чем перлит, феррито-цементитная смесь.

Для доэвтектоидных сталей нормализация часто заменяет полный отжиг как более производительная и экономичная операция.

После нормализации сталь твёрже и прочнее, чем после полного отжига. Микроструктура тоже отличается от равновесной: феррит образует сетку вокруг участков перлита. (Кажется, что в стали больше углерода, чем есть на самом деле.)

Закалка

Закалка — это упрочняющая термическая обработка, которая таким образом изменяет структуру стали, чтобы максимально повысить твёрдость и прочность.

Закалка заключается в нагреве стали выше температуры фазового превращения с последующим достаточно быстрым охлаждением (со скоростью больше критической).

Цель: получение неравновесной структуры — пересыщенного твёрдого раствора углерода в α -железе — мартенсита. Практическая цель — получение максимальной твёрдости, возможной для данной марки стали.

Быстрое охлаждение при закалке необходимо, чтобы углерод не успел выделиться из твёрдого раствора — аустенита — и остался в решётке железа после охлаждения.

Чтобы закалить сталь, необходимо правильно выбрать температуру нагрева и скорость охлаждения. Эти два параметра являются определяющими при проведении закалки.

При выборе температуры нагрева действует следующее правило: доэвтектоидные стали нагреваются под закалку на $30\text{--}50^\circ$ выше критической точки A_{c3} , а заэвтектоидные — на $30\text{--}50^\circ$ выше точки A_{c1} (рис. 6.6). Небольшое превышение критической точки необходимо, так как в печах для термообработки неизбежны некоторые колебания температуры относительно заданного значения.

Почему закалочная температура выбирается для доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей по-разному?

В структуре доэвтектоидных сталей ниже линии GS присутствует феррит. Если закалить сталь из этой температурной области, то аустенит превратится в твёрдый и прочный мартенсит, а феррит не изменится, так как он является равновесной фазой. Поскольку феррит очень мягкий, то его присутствие в закалённой стали снижает ее твёрдость. Цель закалки не будет достигнута. Поэтому необходим нагрев до более высоких температур (выше линии GS), где феррит уже отсутствует.

Закалка из однофазной (аустенитной) области, с температур выше A_{c3} , называется *полной*. Так закаливают доэвтектоидные (конструкционные) стали.

Для заэвтектоидных сталей такой высокий нагрев не требуется, так как выше точки A_1 , но ниже линии SE структура состоит из аустенита и цементита. При закалке из этой области аустенит превратится в мартенсит, а цементит сохранится, так как он является равновесной фазой. Наличие в закалённой стали такой твёрдой структурной составляющей полезно, потому что мелкие частицы цементита являются дополнительными препятствиями для движения дислокаций, повышают твёрдость и износостойкость.

Закалка из двухфазной области, где присутствуют аустенит и цементит, или аустенит и феррит, называется *неполной*. Такой закалке подвергают заэвтектоидные (инструментальные) стали.

Критическая скорость охлаждения при закалке углеродистых сталей составляет не менее $400\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Такая скорость достигается при охлаждении в воде или водных растворах солей (NaCl) и щелочей (NaOH), увеличивающих охлаждающую способность воды. При этом деталь необходимо энергично перемещать в закалочной жидкости, чтобы удалять с поверхности металла образующийся пар, который замедляет охлаждение. Критическая скорость охлаждения легированных сталей значительно ниже, поэтому применяют более мягкие закалочные среды – минеральные масла или растворы полимеров.

Закалка является наиболее «жесткой» из всех операций термообработки, так как сталь испытывает резкое снижение температуры. При этом в деталях возникают большие внутренние напряжения. Они складываются из термических напряжений, возникающих из-за разности температур на поверхности и в сердцевине детали при быстром охлаждении, и структурных напряжений, образующихся за счет объёмных изменений при мартенситном превращении.

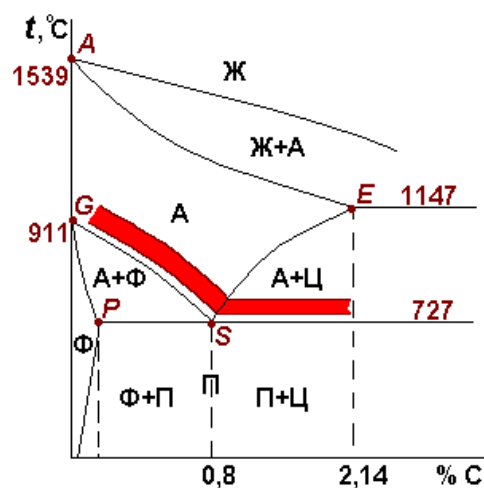


Рис. 6.6. Температурный интервал нагрева стали под закалку

Эти напряжения могут привести к деформации детали и даже образованию трещин. Особенно это опасно в отношении деталей сложной формы, имеющих концентраторы напряжений в виде проточек, отверстий, углов, галтелей и т. п. Для уменьшения закалочных напряжений нужно уменьшить перепад температур в ходе охлаждения при закалке.

По способу охлаждения различают:

1) *Непрерывную закалку (закалку в одной среде)* – (рис. 6.7, кривая 1). Это наиболее простой способ, но при этом в детали появляются большие внутренние напряжения.

2) *Закалку в двух средах, или прерывистую закалку* (рис. 6.7, кривая 2). При этом способе сталь быстро охлаждается в интервале температур 750–400 °С, а

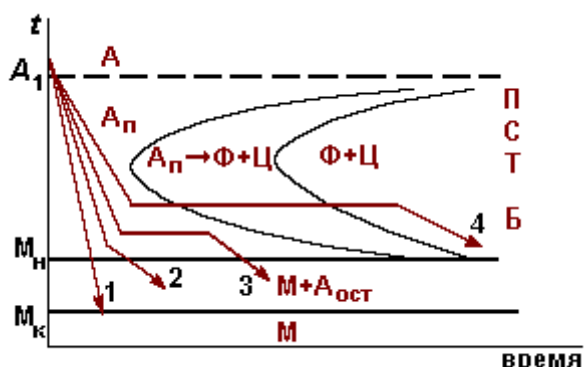


Рис. 6.7. Разновидности закалки по способу охлаждения

затем деталь переносится в другую, более мягкую, охлаждающую среду, и в мартенситном интервале охлаждение происходит замедленно. Это приводит к уменьшению внутренних напряжений и снижает вероятность появления трещин. Примером такой закалки может быть процесс с охлаждением вначале в воде, а затем в масле.

3) *Ступенчатую закалку* (рис. 6.7, кривая 3), при которой нагретую деталь погружают в жидкую среду с температурой на 20-30° выше точки M_n . При этом обеспечивается быстрое охлаждение стали в верхней области температур, а затем делается выдержка, во время которой температура по сечению детали выравнивается, и термические напряжения уменьшаются. Затем детали вынимаются из закалочной ванны, и дальнейшее охлаждение происходит в другой среде, чаще всего на воздухе или в масле. В этом случае мартенситное превращение происходит при медленном охлаждении, в условиях меньших внутренних напряжений. В качестве жидких сред для ступенчатой закалки используют расплавы щелочей, селитры, легкоплавких металлов.

4) *Изотермическую закалку* (рис. 6.7, кривая 4). Она существенно отличается от других способов. Здесь выдержка в охлаждающей среде при температуре бейнитного превращения продолжается до полного распада аустенита. Во всех предыдущих случаях при закалке происходит образование мартенситной структуры, а в этом случае – бейнита.

При изотермической закалке напряжения в детали минимальны, исключается образование трещин, деформации значительно меньше. У некоторых легированных сталей (пружинных, штамповых) этот способ закалки позволяет получать оптимальное сочетание прочности и пластичности.

Итак, ступенчатая и прерывистая закалка уменьшают закалочные напряжения, поскольку разница температур на поверхности и в центре детали уменьшается. Но из-за очень маленького периода существования

переохлажденного аустенита в углеродистых сталях ступенчатую и изотермическую закалку чаще применяют для легированных сталей.

Возможные **дефекты закалки**:

а) *перегрев* – крупное зерно;

б) *пережог* – окисление границ зёрен, очень крупное зерно;

в) *недогрев* – у доэвтектоидных сталей закалка из интервала A_{c1} – A_{c3} приводит к двухфазной структуре (мартенсит + феррит) и низким механическим свойствам;

г) *коробление* и *трещины* – вызываются внутренними напряжениями. Удельный объем мартенсита больше удельного объема аустенита, что вызывает напряжения в структуре стали. Особенно это опасно для деталей сложной формы и при сложении структурных напряжений с термическими, возникшими из-за разности температур на поверхности и в центре детали.

Чтобы избежать коробления, тонкие изделия – пилы, ножовочные полотна, бритвы – охлаждают заневоленными в специальных закалочных прессах.

С технологией закалки тесно связаны два важных понятия.

Закаливаемость – это способность стали получать высокую твёрдость при закалке. Закаливаемость зависит от содержания углерода в стали и характеризуется максимальной возможной твёрдостью (HRC) для данной марки.

Прокаливаемость – это способность стали получать закалённый слой определенной глубины. Скорость охлаждения уменьшается от поверхности детали к центру, поэтому при большой толщине детали может оказаться, что в её сердцевине скорость охлаждения меньше критической (рис. 6.8). В этом случае на мартенсит закалится только поверхностный слой детали, а сердцевина будет незакалённой, с мягкой феррито-перлитной структурой.

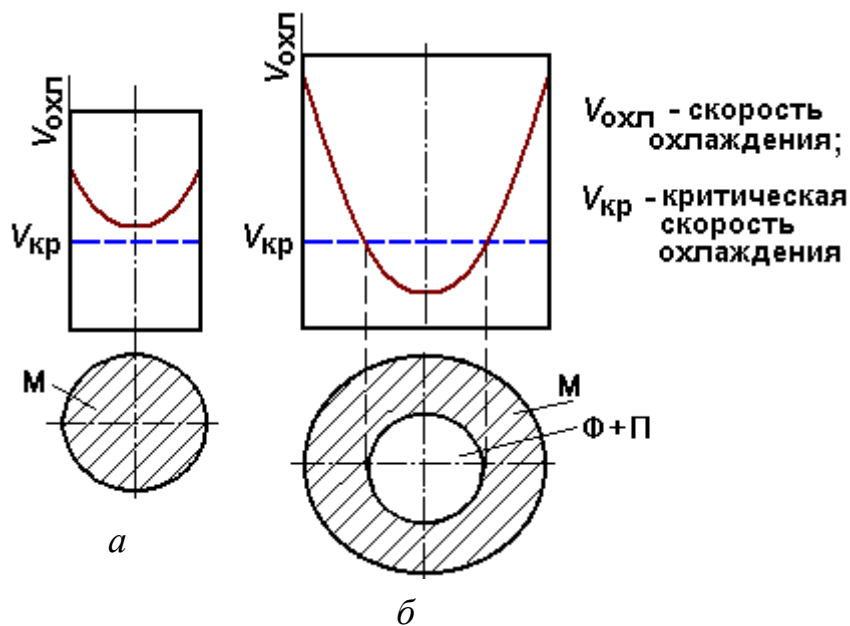


Рис. 6.8. Изменение скорости охлаждения по сечению деталей:
а – малого диаметра; б – большого диаметра

Для характеристики прокаливаемости стали в справочниках приводят величину критического диаметра. *Критический диаметр* – это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в конкретной охлаждающей среде.

Чем больше прокаливаемость стали, тем лучше. Углеродистая сталь при охлаждении в воде имеет критический диаметр всего 10–15 мм. Прокаливаемость стали зависит от содержания легирующих элементов, которые затрудняют диффузионный распад аустенита, уменьшая тем самым критическую скорость охлаждения при закалке. Чем больше легирующих элементов в стали, тем выше её прокаливаемость.

Отпуск

Закалённая сталь очень твёрдая, но она хрупкая, у неё низкая пластичность и большие внутренние напряжения. В таком состоянии изделие не работоспособно, не надёжно в эксплуатации. Поэтому для уменьшения внутренних напряжений и повышения пластичности после закалки всегда следует еще одна операция термической обработки, которая называется отпуск.

Отпуск – это нагрев закаленной стали до температур ниже критических с последующим охлаждением, обычно на воздухе.

Цель отпуска – создание требуемого комплекса эксплуатационных свойств стали, получение более устойчивой, чем после закалки, структуры, уменьшение внутренних напряжений.

Отпуск – последняя операция в технологической цепочке термообработки стали, поэтому полученная при отпуске структура должна обеспечивать свойства, необходимые при работе детали.

В процессе отпуска происходит распад мартенсита за счет выделения из него углерода, тем более полный, чем больше температура и время выдержки. Поэтому уменьшаются внутренние напряжения и плотность дислокаций. Остаточный аустенит при отпуске превращается в мартенсит.

По температуре нагрева отпуск подразделяется на 3 вида: низкий, средний и высокий.

При *низкотемпературном* (или *низком*) *отпуске* (150–200 °С) из мартенсита выделяется часть избыточного углерода с образованием мельчайших карбидных частиц. Но поскольку скорость диффузии здесь еще мала, некоторая часть углерода в мартенсите остается.

Такая структура представляет собой малоуглеродистый мартенсит и очень мелкие карбидные частицы. Ее называют *отпущенный мартенсит*.

В результате низкого отпуска уменьшаются внутренние напряжения, немного увеличивается вязкость и пластичность, твёрдость почти не снижается. Детали могут работать в условиях, где необходима высокая твёрдость и износостойкость.

Низкий отпуск применяют для режущего и мерительного инструмента, деталей подшипников качения.

Среднетемпературный (или *средний*) *отпуск* проводится при более высоких температурах – 300–450 °С. При этом из мартенсита уже выделяется весь

избыточный углерод с образованием цементитных частиц. Тетрагональные искажения кристаллической решетки железа снимаются, она становится кубической. Мартенсит превращается в феррито-цементитную смесь с очень мелкими, в виде иголочек, частицами цементита, которая называется *трооститом отпуска*.

Средний отпуск ещё уменьшает внутренние напряжения, увеличивает вязкость, при этом прочность остается высокой, а предел текучести и предел выносливости достигают максимума. Такому отпуску подвергают рессоры, пружины и другие упругие элементы, а также штамповый инструмент.

В интервале 500–650 °С скорость диффузионных процессов уже настолько возрастает, что при распаде мартенсита образуется феррито-цементитная смесь с более крупными, сферической формы, зёрнами цементита. Такой отпуск называется *высокотемпературным* (или *высоким*); получаемая структура – *сорбит отпуска*.

В результате высокого отпуска сильно возрастают вязкость и пластичность стали, внутренние напряжения снимаются почти полностью, твёрдость и прочность снижаются, но все же остаются достаточно высокими.

Закалка с высоким отпуском называется *термическим улучшением* стали. Такой обработке подвергают детали машин, работающие в условиях знакопеременных и ударных нагрузок: валы, рычаги, шестерни и др.

Время выдержки при низком отпуске составляет от 1 до 10–15 часов, так как при таких низких температурах диффузия углерода идет медленно. Для среднего и высокого отпуска обычно достаточно 1-2 часов.

Изменение механических характеристик углеродистой стали при отпуске показано на рис. 6.9 и в табл. 6.1.

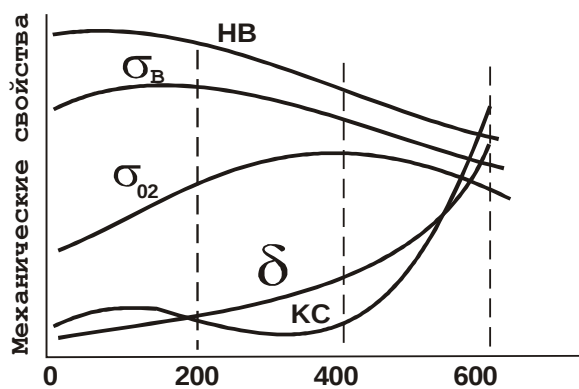


Рис. 6.9. Зависимость механических характеристик стали от температуры отпуска

Таблица 6.1
Влияние термической обработки на механические свойства стали с 0,45 % С

Термическая обработка	$\sigma_{\text{в}}$	σ_{02}	δ	ψ	$KCU,$ МДж/м ²	HV
	МПа		%			
Отжиг	650	450	20	65	0,6	187
Нормализация	730	470	21	60	0,8	198
Закалка и отпуск при 500 °С	970	850	8	55	1,0	280
Закалка и отпуск при 550 °С	950	800	10	60	1,1	269
Закалка и отпуск при 600 °С	870	700	13	65	1,3	255

Итак, с повышением температуры и продолжительности отпуска увеличиваются пластические свойства стали, но снижаются ее твёрдость и прочность. В практике термической обработки стали режим отпуска назначают в соответствии с требуемыми свойствами, которые определяются условиями работы детали.

Поверхностное упрочнение

Для некоторых деталей при эксплуатации необходима высокая твёрдость и износостойкость поверхности в сочетании с хорошей вязкостью в сердцевине. Это касается деталей, работающих в условиях износа с одновременным действием динамических нагрузок (например, шестерни, пальцы, скрепляющие звенья трака гусеничных машин).

В таких случаях подвергают упрочнению не всю деталь, а только тонкий (несколько мм) поверхностный слой.

Поверхностная закалка – это нагрев до закалочных температур только поверхностного слоя детали с последующим быстрым охлаждением и образованием мартенситной структуры только в этом слое.

Осуществляют такую закалку быстрым нагревом поверхности, при котором сердцевина не успевает прогреваться за счет теплопроводности. При таком нагреве температура по сечению детали резко падает от поверхности к центру.

После охлаждения в сечении детали получаются три характерных зоны с разной структурой и свойствами (рис. 6.10).

В зоне I после закалки получается мартенситная структура с максимальной твёрдостью, так как эта зона нагревалась выше критической температуры A_{c3} .

В зоне II после закалки в структуре, кроме мартенсита, будет присутствовать и феррит. Следовательно, твёрдость там будет ниже.

В зоне III нагрев и охлаждение не приводят к каким-либо изменениям структуры. Значит, здесь сохраняется исходная феррито-перлитная структура с низкой твёрдостью, но высокими пластическими свойствами.

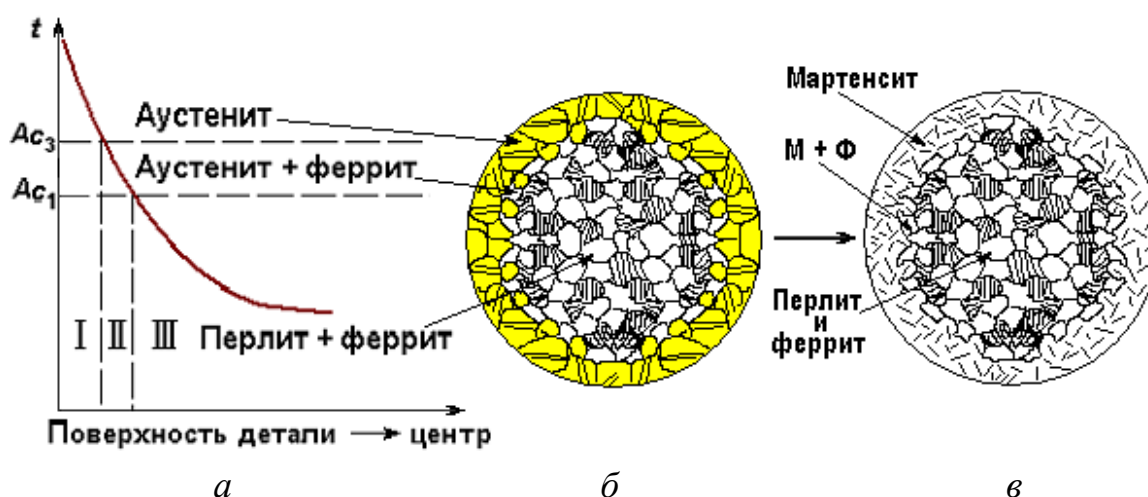


Рис. 6.10. Поверхностная закалка стали:

а – распределение температур по сечению;

б – структура при поверхностном нагреве; в – структура после закалки

После поверхностной закалки деталь может сопротивляться динамическим нагрузкам за счет вязкой сердцевины и хорошо работать в условиях износа благодаря твёрдой поверхности.

Быстрый нагрев поверхности, необходимый при такой технологии, осуществляется чаще всего индукционным способом (*закалка ТВЧ*). Деталь помещается в индуктор, подключённый к генератору тока высокой частоты. Переменное магнитное поле высокой частоты наводит в тонком поверхностном слое металла вихревые токи, и нагрев осуществляется за счет сопротивления металла протеканию этих токов. Немедленно после нагрева, который длится секунды, деталь помещают в спрейер для охлаждения.

Поверхностная закалка должна сопровождаться низким отпускком.

Чем выше частота внешнего переменного магнитного поля, тем тоньше слой, в котором сосредоточены вихревые токи. Поэтому глубина закалённого слоя может легко регулироваться и составляет от десятых долей миллиметра до 3–5 мм. Операцию закалки ТВЧ можно полностью автоматизировать. Способ очень производительный; коробление и окисление поверхности детали при этом минимально.

Иногда для поверхностной закалки используют и другие способы нагрева: газопламенный, лазерный, в расплавах солей, в электролитах. Для такого способа термообработки специально созданы стали пониженной прокаливаемости, например, 55ПП (0,55 % С и не более 0,5 % примесей).