

## Закалка без полиморфного превращения

*Закалку, как и отжиг 2-го рода, можно применять только к тем металлам и сплавам, в которых имеются фазовые превращения в твердом состоянии. Основные параметры закалки — температура нагрева, время выдержки и скорость охлаждения.*

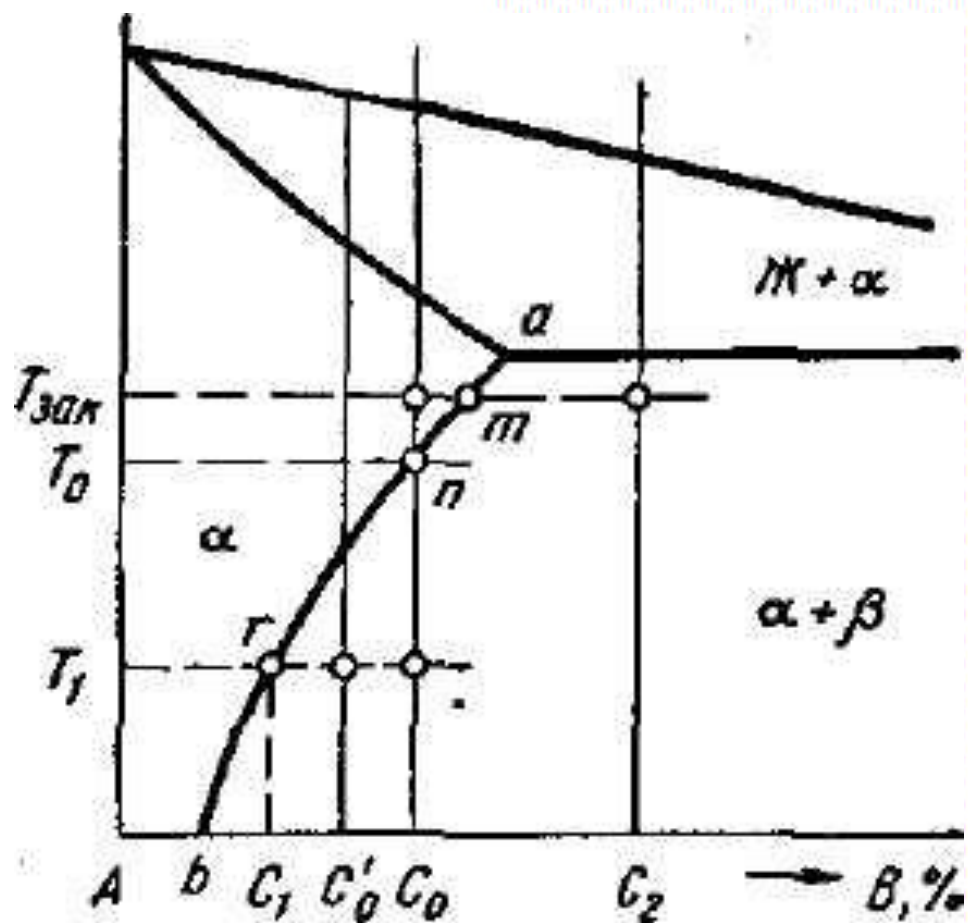
*Закалка без полиморфного превращения — это термическая обработка, фиксирующая при более низкой температуре состояние сплава, свойственное ему при более высокой температуре.*

Закалка без полиморфного превращения применима к любым сплавам, в которых одна фаза полностью или частично растворяется в другой.

Таким образом, при закалке без полиморфного превращения образуется *пересыщенный твердый раствор*. Такая закалка к чистым металлам принципиально неприменима. Рассмотренную на примере сплава  $C_0$  закалку без полиморфного превращения широко применяют к алюминиевым, магниевым, никелевым, медным и другим сплавам, а также к легированным сталям.



## Схема к объяснению заковки без полиморфного превращения



Изменение свойств при закалке зависит от фазового состава и особенностей структуры сплава в исходном и закаленном состояниях, от условий закалки, предыдущей обработки и других факторов.

### Механические свойства сплавов в после отжига и закалки

Сплав	$\sigma_v$ , Н/мм <sup>2</sup>		$\delta$ , %	
	отжиг	закалка	отжиг	Закалка
Д16	20	30	25	23
Бр.Б2	55	51	22	46

Направление и величина изменения свойств в разных сплавах различны.

Встречается ошибочное утверждение, что закалка всегда приводит к упрочнению, причем термины «закалка» и «упрочнение» часто неверно считают синонимами. В действительности же закалка может и упрочнять, и разупрочнять сплав.



**Время выдержки при температуре нагрева под закалку** выбирают так, чтобы завершились процессы растворения избыточных фаз. Чем дисперснее избыточные фазы, тем быстрее они растворяются.

### ***Критическая скорость охлаждения при закалке***

Количественным критерием устойчивости переохлажденного твердого раствора является ***критическая скорость охлаждения*** ( $V_{кр}$ ) — ***наименьшая скорость непрерывного охлаждения, позволяющего избежать распада раствора*** или, точнее, избежать изменение на определенную величину выбранного свойства. Если скорость охлаждения в центре сечения изделия больше  $V_{кр}$ , то изделие прокаливается насквозь. Критическую скорость охлаждения определяют, проводя из точки, соответствующей температуре нагрева под закалку, касательную к С-кривой условного начала распада охлажденного раствора.

### ***Факторы, влияющие на устойчивость переохлажденного раствора***

Устойчивость переохлажденного твердого раствора зависит от системы легирования, содержания легирующих элементов и структуры сплава перед закалкой.



1. Мартенситное превращение протекает при быстром охлаждении углеродистой стали с температур выше  $A_1$ , например в воде, когда подавлен диффузионный распад аустенита на смесь двух фаз (феррита и карбида). Эти фазы резко отличаются по составу от исходного аустенита. Концентрация углерода в мартенсите такая же, как и в исходном аустените. Следовательно, в отличие от перлитного превращения *мартенситное превращение — бездиффузионное*.
2. Превращение аустенита в мартенсит начинается с определенной для каждой марки стали температуры  $M_n$ . Она не зависит от скорости охлаждения.

3. При температуре  $M_n$  превращение только начинается, появляются первые кристаллы мартенсита. *Чтобы мартенситное превращение развивалось, необходимо непрерывно охлаждать углеродистую сталь в мартенситном интервале  $M_n—M_k$ .* Если охлаждение приостановить и выдерживать углеродистую сталь при постоянной температуре внутри этого интервала, то образование мартенсита почти сразу же прекращается. После мартенситного превращения даже при охлаждении стали до температуры  $M_k$  сохраняется некоторое количество остаточного аустенита.

4. В отличие от перлитного *мартенситное превращение в углеродистой стали не имеет инкубационного периода*. Горизонталь  $M_H$  соответствует температуре, ниже которой чрезвычайно быстро, практически мгновенно, образуется некоторое количество мартенсита.

5. Мартенсит образуется в форме пластин, растущих с громадной скоростью (порядка 1 км/с) при любых температурах, в том числе и ниже  $0^\circ\text{C}$ . После «мгновенного» образования мартенситная пластина не растет. *Количество мартенсита при охлаждении ниже точки  $M_H$  увеличивается не вследствие подрастания уже образовавшихся пластин, а в результате мгновенного возникновения все новых и новых пластин*. Эта особенность также резко отличает мартенситное превращение от перлитного. В процессе развития перлитного превращения не только образуются новые, но и растут ранее образовавшиеся колонии.



5. Между решетками кристаллов мартенсита и исходного аустенита имеется определенное ориентационное соотношение, *закономерная ориентировка решетки мартенсита по отношению к решетке аустенита*, в то время как при перлитном превращении решетки фаз, входящих в эвтектоидную смесь, могут быть и произвольно ориентированы по отношению к решетке исходного аустенитного зерна.
6. При мартенситном превращении в углеродистых сталях *на плоской полированной поверхности образца образуется характерный рельеф*, свидетельствующий об изменении формы превращенного объема аустенита. При перлитном превращении такой рельеф не возникает. Характерный рельеф на исходной плоской поверхности образца может служить главным внешним признаком мартенситного превращения в стали.

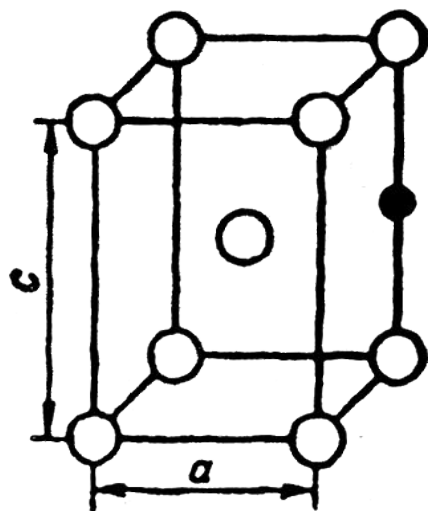




### *Основные закономерности мартенситных превращений.*

При аустенитно-мартенситном превращении происходит только перестройка решетки без изменения концентрации реагирующих фаз. **Мартенсит в стали - это пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе с такой же концентрацией, как и у исходного аустенита.** Так как растворимость углерода в  $\alpha$ -фазе равна всего лишь 0,01 %, то мартенсит является пересыщенным твердым раствором.

Для кристаллической структуры мартенсита характерна тетрагональность, т. е. то, что соотношение осей  $c/a$  в решетке мартенсита больше 1 (рис. 3). Тетрагональность мартенсита— это прямое следствие содержания в растворе углерода.

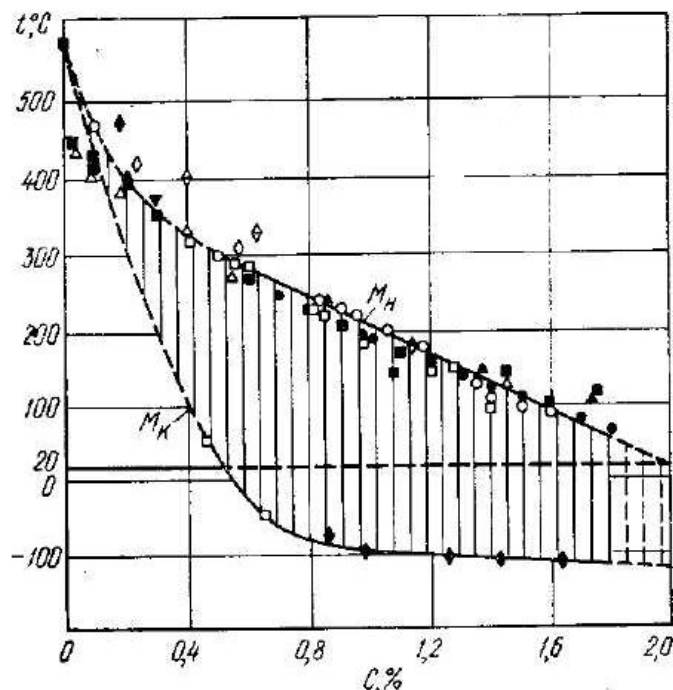


Тетрагональная  
кристаллическая ячейка



## Влияние состава стали на мартенситное превращение

Состав стали особенно сильно отражается на температурных точках мартенситного превращения ( $M_H$  и  $M_K$ ). Увеличение содержания углерода приводит к снижению всего интервала мартенситного превращения.



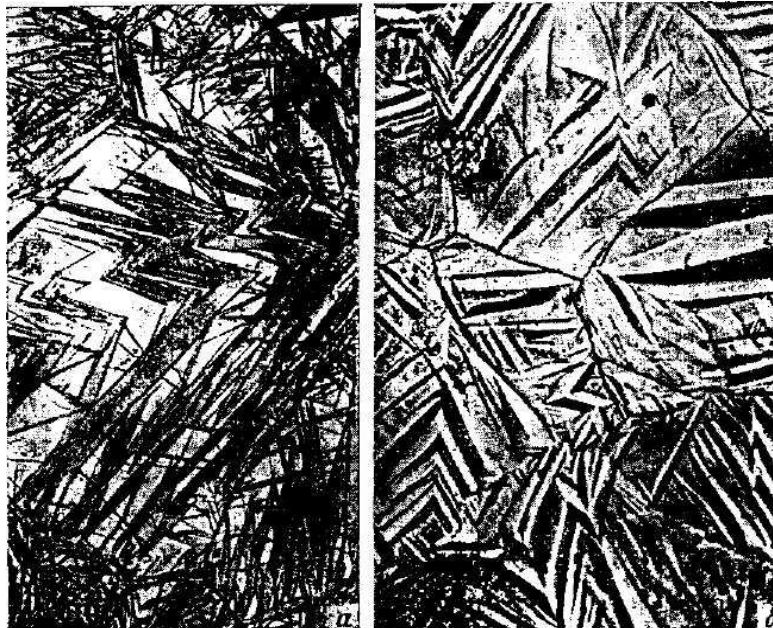
**Зависимость температуры начала и конца мартенситного превращения от содержания углерода в стали**

## ***Влияние скорости охлаждения на температуру образования мартенсита.***

Опытами было показано, что при непрерывном охлаждении аустенита при скорости от  $V_k$  (для углеродистой стали она примерно составляет 150 град/с) до сверхвысоких скоростей охлаждения ( $\sim 10000$  град/с) не удалось снизить температуры начала мартенситного превращения.

Следовательно, температура превращения аустенита в мартенсит не зависит от скорости охлаждения.

**Типичная структура мартенсита закаленной стали имеет характерный игольчатый вид**



(а) –  
мартенситные иглы в  
крупнозернистом  
аустените, х500;  
структура  
мартенсита (б) и  
микрорельеф на  
поверхности  
полированного  
шлифа в той же  
стали (в) после  
образования  
мартенсита, х 400.

## Влияние пластической деформации на мартенситное превращение

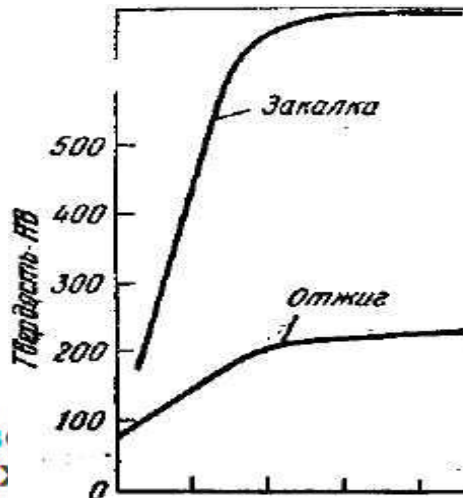
Пластическая деформация, не вызывающая образования мартенсита непосредственно в период деформирования, может повлиять на кинетику мартенситного превращения при последующем охлаждении

## Влияние закалки на свойства стали

Упрочнение при закалке

Важнейшее явление, сопровождающее закалку на мартенсит,— упрочнение, повышение твердости. Именно благодаря упрочнению и была открыта в древности, а затем широко использована закалка сталей.

Способность стали к повышению твердости при закалке называется **закаливаемостью**. Закаливаемость характеризуется максимальной твердостью, которая может быть получена при закалке данной марки стали на поверхности изделия.



**Влияние  
содержания  
углерода в стали на  
закаливаемость**



Видманштеттов феррит образуется в интервале от  $A_3$  минус  $50^\circ C$  до  $600—550^\circ C$ . С увеличением содержания углерода в стали доля видманштеттова феррита в структуре уменьшается.

### *Влияние легирующих элементов на перлитное превращение*

Легирующие элементы оказывают чрезвычайно важное для практики влияние на кинетику распада аустенита. За исключением кобальта, все широко используемые легирующие элементы, растворенные в аустените (Cr, Ni, Mn, W, Mo, V и др.), замедляют перлитное превращение, сдвигая верхнюю часть С-кривой вправо.

Легирующие элементы могут замедлять перлитное превращение по следующим причинам:

1) из-за образования специальных карбидов и необходимости диффузионного перераспределения в аустените легирующих элементов, атомы которых несравненно менее подвижны, чем атомы углерода;

2) из-за замедления диффузии углерода;

3) из-за уменьшения скорости полиморфного превращения.



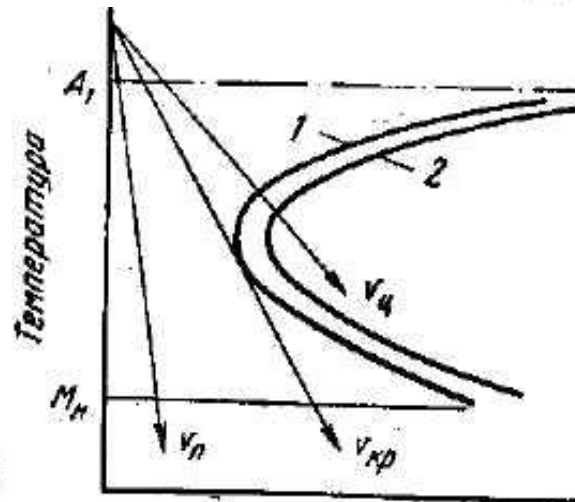
## Изменение пластичности при закалке

Закалка углеродистых сталей приводит к резкому снижению всех показателей пластичности. Относительное удлинение и сужение закаленных высокоуглеродистых сталей равны нулю.

### Прокаливаемость и критическая скорость охлаждения

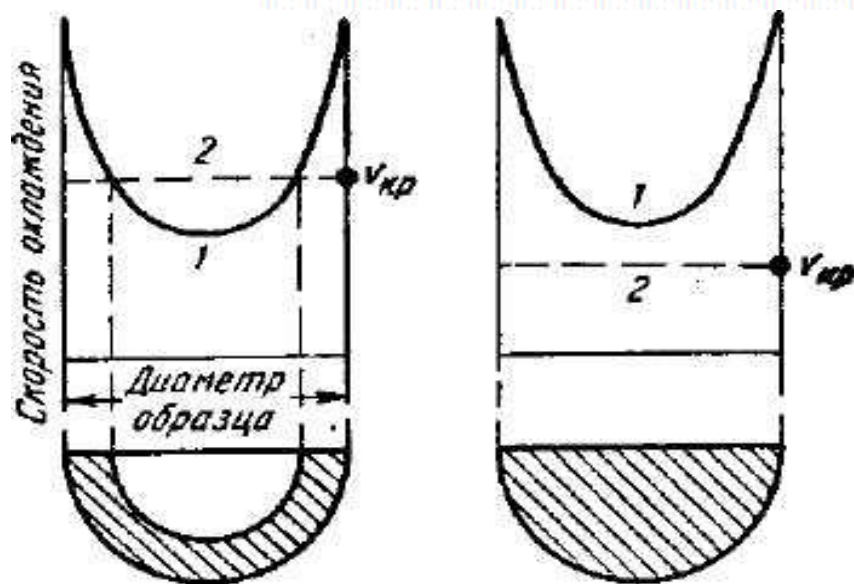
При закалке на мартенсит сталь должна охлаждаться с закалочной температуры так, чтобы аустенит, не успел претерпеть распад на феррито-карбидную смесь, переохладился ниже точки  $M_H$ . Для этого скорость охлаждения изделия должна быть выше критической.

*Критическая скорость охлаждения – это минимальная скорость, при которой аустенит еще не распадается на феррито-карбидную смесь.*



Определение критической скорости закалки по C-диаграмме:  $V_{ц}$  и  $V_{п}$  – скорости охлаждения центра и поверхности изделия; 1 – начало распада аустенита; 2 – окончание распада аустенита.





#### Прокаливаемость цилиндра:

а — несквозная прокаливаемость; б — сквозная прокаливаемость: 1 — кривая распределения скоростей охлаждения по диаметру цилиндра; 2 — критическая скорость охлаждения (заштрихован слой, закаленный на мартенсит)

*С ростом температуры нагрева и выдержки перед закалкой прокаливаемость стали увеличивается, причем первый фактор более эффективен.*



## Характеристики прокаливаемости

Простейшей характеристикой является *глубина прокаливаемости* изделия в определенном охладителе. Глубину прокаливаемости можно определить *методом пробной закалки* по излому, макрошлифу и распределению твердости в сечении изделия. Закаленная на мартенсит сталь хрупка; в закаленной зоне изделие имеет ровный мелкозернистый, матово-серый, часто фарфоровидный излом. Непрокаленная сердцевина — более вязкая; у нее неровный, шероховатый, слегка волокнистый излом. Граница между этими двумя зонами очень хорошо видна в изломе.

Глубиной прокаливаемости условно считают расстояние от охлаждаемой поверхности до слоя с полумартенситной структурой (50% троостита и 50% мартенсита).

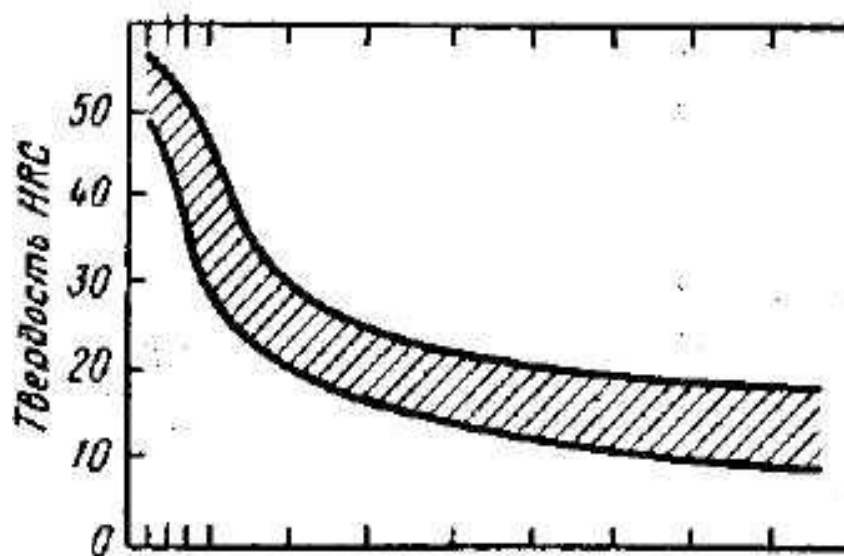
Для определения прокаливаемости углеродистых и легированных сталей, за исключением закаливающих на воздухе, широко применяют стандартный *метод торцовой закалки*.





Стандартный образец после нагрева в печи быстро переносят в специальную установку, в которой его охлаждают струей под определенным напором только с торца. После полного охлаждения образца по его двум диаметрально противоположным образующим сошлифовывают площадки на глубину 0,5 мм. По длине этих площадок через 1,5—3 мм измеряют твердость по шкале *HRC* и строят кривую прокаливаемости в координат твердость — расстояние от торца. Чем меньше прокаливаемость стали, тем быстрее падает твердость при удалении от торца.

### Полоса прокаливаемости стали 40



Расстояние от охлаждаемого торца, мм



## Нагрев и охлаждение при закалке сталей

Температура закалки для сталей большинства марок определяется положением критических точек  $A_1$  и  $A_3$ .

Для углеродистых сталей температуру закалки можно определить по диаграмме железо — углерод. Обычно для доэвтектоидной стали она должна быть на  $30—50^\circ\text{C}$  выше  $A_{c_3}$ , а для заэвтектоидной стали — на  $30—50^\circ\text{C}$  выше  $A_{c_1}$ . Наследственно мелкозернистая сталь допускает более высокий нагрев. При перегреве наследственно крупнозернистой стали закалка дает структуру крупноигльчатого мартенсита. При закалке с температур в интервале  $A_1 - A_3$  наряду с мартенситом остается избыточный феррит, снижающий твердость закаленной стали и ухудшающий механические свойства после отпуска.

При закалке доэвтектоидной стали с температуры выше  $A_{c_1}$ , но ниже  $A_{c_3}$  в структуре наряду с мартенситом сохраняется часть феррита, который снижает твердость в закаленном состоянии и ухудшает механические свойства после отпуска. Такая закалка называется неполной и, как правило ее не применяют.



Для заэвтектоидных сталей оптимальная температура закалки, наоборот, лежит в интервале между  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  и теоретически является неполной. При закалке в интервале  $A_1 - A_{cm}$  в заэвтектоидных сталях наряду с мартенситом имеется вторичный цементит. Его включения повышают износостойкость стали. Нагрев же выше  $A_{c3}$  опасен и не нужен, так как он не повышает твердости, наоборот, твердость даже несколько падает вследствие растворения избыточного цементита и увеличения остаточного аустенита; при таком нагреве растет зерно аустенита, увеличивается возможность возникновения больших закалочных напряжений, интенсивнее обезуглероживается сталь с поверхности и т. д.

*Таким образом, оптимальной является закалка доэвтектоидной стали от температуры на  $30—50^\circ\text{C}$  выше  $A_{c3}$ , а для заэвтектоидной стали на  $30—50^\circ$  выше  $A_{c1}$ .*



## Время нагрева

Общее время нагрева складывается из времени нагрева до заданной температуры ( $\tau_{\text{н}}$ ) и времени выдержки при этой температуре ( $\tau_{\text{в}}$ ):

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}}.$$

Величина  $\tau_{\text{н}}$  зависит от нагревающей способности среды, от размеров и формы деталей, от их укладки в печи;  $\tau_{\text{в}}$  зависит от скорости фазовых превращений, которая определяется степенью перенагрева выше критической точки и дисперсностью исходной структуры.

## Охлаждение при закалке

Режим охлаждения при закалке должен, с одной стороны, обеспечить необходимую глубину прокаливаемости, с другой стороны, режим охлаждения должен быть таким, чтобы не возникали сильные закалочные напряжения, приводящие к короблению изделия и образованию закалочных трещин.

***Закалочные напряжения*** складываются ***из термических и структурных напряжений***. При закалке всегда возникает перепад температур по сечению изделия. Разная величина термического сжатия наружных и внутренних слоев в период охлаждения обуславливает возникновение термических напряжений.



В качестве закалочных сред наиболее широко используют холодную воду, 10%-ный водный раствор NaOH или NaCl и масла. В табл. 1 приведены значения скорости охлаждения небольших стальных образцов в двух температурных интервалах для различных сред. Пока не найдено такой закалочной жидкости, которая быстро охлаждала бы в перлитном интервале температур и медленно — в мартенситном.

### Скорость охлаждения стали в различных средах

Закалочная среда	Скорость охлаждения, °C/с, в интервалах, °C	
	650 – 550	300 – 200
Вода при 18°C	600	270
Вода при 74°C	30	200
10%-ный р-р NaOH в воде при 18°C	1200	300
Минеральное масло	100 - 150	20 - 50



## Способы закали

Так как нет такой закалывающей среды, которая давала бы быстрое охлаждение в интервале температур  $650\text{—}400^\circ\text{C}$  и медленное охлаждение выше и главным образом ниже этого интервала, то применяют различные способы закали, обеспечивающие необходимый режим охлаждения.

Для уменьшения скорости охлаждения в мартенситном интервале применяют *закалку в двух средах*. Вначале деталь погружают в воду и после короткой выдержки в воде переносят в масло. Поэтому такой способ закали называют *закалкой через воду в масло*.

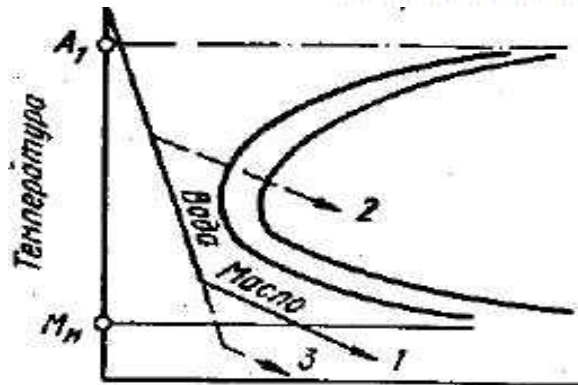


Схема закали через воду в масло (в двух средах): 1 – нормальный режим; 2- недодержка в воде; 3 – передержка в воде

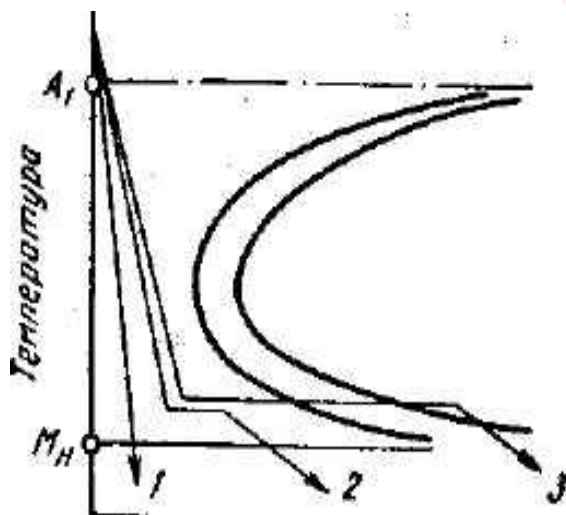


Быстрое охлаждение в воде предотвращает перлитное превращение, а последующее замедленное охлаждение в масле уменьшает закалочные напряжения в мартенситном интервале. Наиболее ответственный момент — выдержка в воде, продолжительность которой устанавливают для каждого конкретного изделия. И передержка, и недодержка в воде могут привести к браку. При недодержке в воде происходит частичный или полный распад аустенита и получается заниженная твердость, а при передержке возникают более сильные закалочные напряжения, которые могут привести к короблению и образованию трещин. Несмотря на такие недостатки, закалку через воду в масло шире применяют в производстве режущего инструмента из углеродистой стали (углеродистая сталь обладает небольшой прокаливаемостью, и режущий инструмент из нее нельзя закаливать в масле).



Другой способ уменьшения скорости охлаждения в мартенситном интервале — *ступенчатая закалка*. Нагретое до температуры закалки изделие быстро погружают в ванну с горячей средой, а затем после некоторой выдержки выдают на воздух или погружают в холодное масло.

При выборе режима ступенчатой закалки помогает С-диаграмма. Температуру горячей среды (температуру «ступеньки») выбирают вблизи мартенситной точки (на 20—30°C выше нее) в области высокой устойчивости переохлажденного аустенита. Время выдержки в горячей среде (длина «ступеньки») должно быть меньше инкубационного периода при соответствующей температуре. Ступенчатая закалка более проста в исполнении, чем закалка через воду в масло, и дает более стабильные результаты.



Закалка в воде и горячих средах: 1 – в воде; 2 – ступенчатая; 3 – изотермическая

