

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

## ЗАКАЛКА СТАЛИ

*Цель работы:* ознакомиться с теорией и технологией проведения закалки и провести закалку углеродистой стали.

*Необходимые приборы и материалы:* микроскоп ММУ-3 или МЕТАМ-Р, шлифовальная и полировальная машины, твердомеры ТШ-2М и ТАК КАК-2, микроскоп ПМБ-6, электропечь СНОЛ, клещи, емкости с охлаждающими жидкостями, фильтровальная бумага, вата, травитель, спирт, паста ГОИ и образцы из углеродистой стали.

*Задача работы:*

### **1. Назначить режим закалки:**

- а) температуру закалки в зависимости от марки стали;
- б) продолжительность нагрева и выдержки образца в печи;
- в) охлаждающую среду.

### **2. Замерить твердость до и после закалки и сделать вывод.**

#### *Теоретическая часть*

Закалкой называется процесс термической обработки, состоящей из нагрева стали до температуры выше критической выдержки при этой температуре и последующего охлаждения со скоростью, превышающей критическую. Закалка не является окончательной термической операцией. Чтобы уменьшить хрупкость и напряжения, вызванные закалкой и получить требуемые механические свойства, сталь после закалки подвергают отпуску.

Закалку с последующим отпуском инструментальных сталей проводят с целью получения твердости, прочности и износостойкости, а конструкционных - с целью получения достаточной прочности, твердости при высокой пластичности и вязкости, а для деталей, работающих в условиях износа, и высокой износостойкости.

Высокую твердость, прочность и износостойкость сталям после закалки обеспечивает образующаяся структура мартенсита. Мартенситом называется перенасыщенный твердый раствор углерода в альфа-железе с тетрагональной кристаллической решеткой (см. рис.1).

#### Механизм образования мартенсита

При комнатной температуре структура стали состоит: из феррито-цементитной смеси, называемой перлитом, у эвтектоидной стали; из

феррита и перлита у доэвтектоидной стали и перлита и цементита у заэвтектоидной стали.

Феррит - твердый раствор углерода и других примесей в альфа-железе с объемноцентрированной кристаллической (О.Ц.К.) решеткой. Растворимость углерода мала и при комнатной температуре составляет 0,006 %.

Цементит - химическое соединение углерода с железом со сложной ромбической плотноупакованной решеткой, содержащее 6,67% углерода.

Температуру нагрева стали выбирают таким образом, чтобы образовалась структура аустенита.

Аустенит - твердый раствор углерода и других примесей в альфа-железе с кубической гранецентрированной (Г.Ц.К.) решеткой. Растворимость углерода зависит от температуры и изменяется в пределах от 0,8-2,14%.

При нагреве стали до температуры выше критической будет протекать полиморфное превращение альфа-железа в гамма-железо, т.е. превращение феррита в аустенит с одновременным растворением цементита в аустените, т.к. растворимость углерода в аустените велика, то весь углерод, находящийся в стали, будет в нем растворяться.

При нагреве доэвтектоидной или заэвтектоидной стали процесс аустенизации осложняется превращением структурно свободного феррита в аустенит или растворением избыточного цементита в аустените. Чем больше в стали углерода, тем быстрее протекает процесс аустенизации, что объясняется увеличением количества цементита, а, следовательно, и ростом суммарной поверхности раздела феррита и цементита, на которой образуются кристаллы аустенита.

*Примечание:* у сталей, легированных тугоплавкими элементами, часть углерода будет оставаться в виде: WC, VC, TiC и т.д.

В процессе выдержки образца в печи происходит полный прогрев изделия и выравнивание состава аустенита, т.к. аустенит, образовавшийся на феррите, будет низкоуглеродистым, а на границе с цементитом - высокоуглеродистым.

Охлаждение нагретой стали ниже температуры 727 градусов (критическая т. А1) вызовет обратное превращение гамма-железа в альфа-железо. Чем выше скорость охлаждения, тем ниже температура этого превращения. При скорости охлаждения, превышающей критическую, превращение гамма- в альфа-железо протекает в области низких температур, и образующийся феррит будет содержать столько же углерода, сколько его содержалось в аустените, т.к. при низких температурах из-за малой подвижности атомов диффузия отсутствует. Следовательно, образующийся твердый раствор углеродом в альфа-железе будет перенасыщен. Атомы углерода занимают октаэдрические поры вдоль оси [001] в решетке альфа-железа и сильно ее искажают, т.е. вместо О.Ц.К. решетки образуется твердый раствор с тетрагональной кристаллической решеткой (рис. 1а). Причем, чем выше содержание углерода в растворе, тем выше степень тетрагональности (C/a), т.к. параметр «C» увеличивается

быстрее, чем параметр «а» понижается (рис.1б). При перестройке решетки атомы не обмениваются местами, а только смещаются друг относительно друга на расстояние, не превышающее межатомное. Таким образом, механизм мартенситного превращения бездиффузионный, сдвиговый.

Температура, при которой начинается превращение аустенита в мартенсит называется температурой начала мартенситного превращения ( $M_n$ ). Превращение продолжается при непрерывном охлаждении до температуры конца мартенситного превращения ( $M_k$ ). Температуры  $M_n$  и  $M_k$  не зависят от скорости охлаждения и определяются только химическим составом стали. Чем больше в стали содержание углерода, тем ниже по оси температур лежат точки  $M_n$  и  $M_k$  (рис. 2).

Влияние легирующих элементов на температуры  $M_n$  и  $M_k$  показано на рис. 3. Мартенситное превращение отличается большой скоростью  $\sim 10^6$  мм/с.

Однако кристаллы растут только до определенной величины, до границы зерна аустенита, а затем их рост прекращается, и дальнейшее развитие превращения осуществляется за счет образования новых кристаллов мартенсита. Мартенсит, по сравнению с другими структурными составляющими имеет наибольший удельный объем. Увеличение удельного объема при образовании мартенсита является одной из основных причин возникновения больших внутренних напряжений, вызывающих коробление и деформацию изделий или даже появление трещин.

Высокая прочность (до 2300 МПа) и твердость (до 67 HRC) обусловлена влиянием внедренных атомов углерода в решетку альфа-фазы, созданием микро- и субмикроскопической неоднородности строения с повышенной плотностью дефектов кристаллического строения. Поверхности раздела кристаллов мартенсита представляют собой труднопреодолимые препятствия для движения дислокаций. Подвижность дислокаций затруднена и в связи с повышенной их плотностью из-за фазового наклепа. Хрупкость мартенсита связана с пониженной подвижностью заблокированных дислокаций, что уменьшает возможность пластической релаксации в местах концентрации напряжений.

### Выбор температуры нагрева стали

При проведении закалки необходимо задать следующие параметры:

- выбрать температуру нагрева стали,
- определить время нагрева и выдержки образца в печи,
- выбрать охлаждающую среду.

### Выбор температуры нагрева стали

Температура нагрева зависит от содержания в стали углерода. Доэвтектоидные стали необходимо нагревать до температуры на 30-50 градусов выше критической точки АС3 (рис.4). В этом случае сталь с исходной феррито-перлитной структурой приобретает аустенитную структуру,

которая при охлаждении со скоростью, превышающей критическую, превращается в мартенситную структуру. Закалку с температуры, лежащей между критическими точками AC1 - AC3, проводить не рекомендуется, т.к. после охлаждения, наряду с мартенситом, сохраняются участки феррита, не претерпевшего превращения в аустенит при нагреве. Присутствие феррита снижает твердость стали после закалки и ее механические свойства после отпуска. Нагрев стали значительно выше критической точки AC3 вызовет рост зерна аустенита, что в свою очередь приведет после охлаждения к образованию крупноиглочатого мартенсита и ухудшению вязкости.

Заэвтектоидные стали нагревают до температуры на 10 - 30 градусов выше критической точки AC1 (рис.4). В результате образуется структура аустенита с сохранением некоторого количества цементита. После охлаждения со скоростью выше критической, структура стали будет состоять из мартенсита, нерастворившихся пластинок цементита и аустенита остаточного (Аост.). Наличие в структуре Аост. объясняется тем, что температура Мк (рис.2) опускается ниже 20 градусов.

Присутствие пластинок цементита в структуре закаленной стали увеличивает ее износостойкость. Поэтому нагрев этих сталей выше критических точек ACm нецелесообразен, т.к. в структуре увеличивается количество Аост. и отсутствует цементит.

*Примечание:* температура нагрева под закалку высоколегированных сталей значительно превышает (на 150-250 градусов) критические точки AC1 и AC3, что необходимо для перевода в твердый раствор труднорастворимых карбидов. Такое повышение температуры нагрева не приведет к заметному росту зерна аустенита, т.к. частицы карбидов, располагаясь по границам зерна аустенита, сдерживают его рост.

#### Определение времени нагрева и времени выдержки образца в печи

Продолжительность нагрева зависит от размеров и формы образца, от химического состава стали, от нагревающей среды, от типа печи, от способа нагрева, от количества образцов и способа их укладки и окончательно устанавливается экспериментальным путем.

Можно рекомендовать следующие практические нормы расчета времени нагрева под закалку образцов из углеродистой стали  $t_n$  (на 1 мм толщины или диаметра): в электрической печи - 1 мин; в соляной ванне - 0,3 мин; в свинцовой ванне - 0,15 мин.

Выдержка образцов в печи составляет 1/5 от времени нагрева ( $t_v$ ).

При нагреве деталей навалом указанные нормы необходимо увеличить в 1,5-2 раза. Таким образом, общее время нахождения образцов в печи составляет сумму времени нагрева и времени выдержки:

$$t_{\text{общ.}} = t_n + t_v$$

## Выбор охлаждающей среды

Скорость охлаждения при закалке необходимо выбирать превышающей скорость критическую.

Критической скоростью закалки называется минимальная скорость охлаждения, при которой аустенит превращается в мартенсит. Величина критической скорости зависит от устойчивости аустенита переохлажденного и, следовательно, зависит от химического состава стали. Углеродистые стали имеют высокую критическую скорость закалки ( 800 - 200 градусов в секунду). Чем выше температура нагрева, тем выше устойчивость переохлажденного аустенита и , следовательно, меньше критическая скорость закалки. Для многих легированных сталей критическая скорость закалки составляет 20-30 градусов в секунду и ниже.

Скорость охлаждения должна быть высокой при температурах наименьшей устойчивости аустенита (650 - 500 градусов), а в области мартенситного превращения (300-200 градусов) ее целесообразно уменьшать, чтобы предотвратить образование новых внутренних напряжений, вызывающих коробление и деформацию закаливаемых изделий и образование трещин.

В качестве охлаждающих (закаливающих) сред для углеродистых и низколегированных сталей используют воду и различные водные растворы, а для легированных сталей с высокой устойчивостью аустенита - масло и воздух.

Свойства воды как закалочной среды улучшаются при добавлении поваренной соли или щелочи, или серной кислоты, т.к. растворы ускоряют охлаждение в области высоких температур и замедляют его в области мартенситного превращения по сравнению с охлаждением в чистой воде. Для равномерного охлаждения образцов необходимо их перемещать в закалочной среде.

## **Экспериментальная часть**

1. Получить у преподавателя образец из углеродистой стали.
2. Изготовить микрошлиф.
3. Замерить твердость на приборе Бринеля.
4. По микроструктуре стали определить содержание в ней углерода и, следовательно, марку стали.
5. Назначить температуру закалки.
6. Рассчитать время нагрева и выдержки образца в печи.
7. Выбрать охлаждающую среду.

Выбор охлаждающей среды необходимо согласовать с преподавателем, т.к. для дальнейшей работы необходимо иметь образцы с различной структурой.

8. Провести закалку образца.

9. Замерить твердость на приборе Роквелла.
10. Оформить отчет по работе.

### Содержание отчета

1. Основные теоретические материалы по механизму образования мартенсита и выбору температуры, времени и скорости охлаждения.
2. Результаты выполненной работы внести в таблицу 1.

*Таблица 1*

Микроструктура	Марка стали	Температура закали	Время нагрева	Время выдержки	Твердость до закали	Охлаждающая среда	Твердость после закали	
							HRC <sub>3</sub>	HB

3. По изменению твердости после термической обработки сделать вывод.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое закалка и ее назначение?
2. Каков механизм образования мартенсита и его структура?
3. Как определить температуру нагрева стали и обосновать правильность ее выбора?
4. Как определить время нахождения образца в печи и какие факторы на него влияют?
5. Как выбирается скорость охлаждения при закалке?

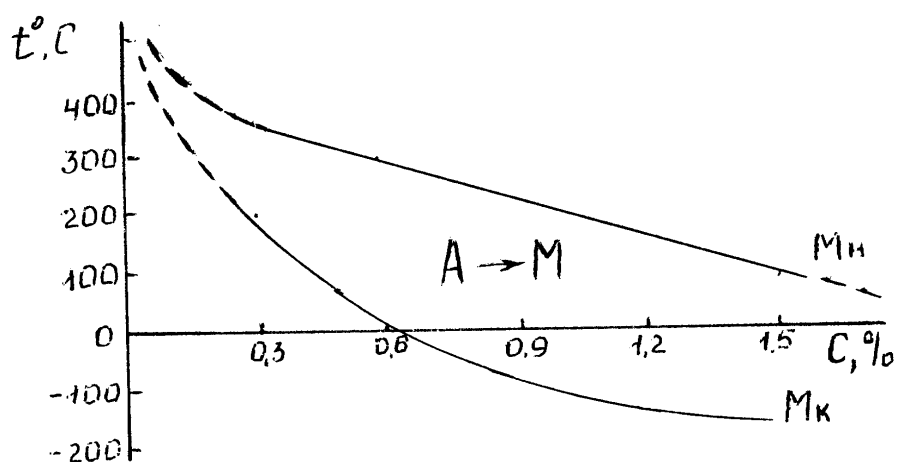
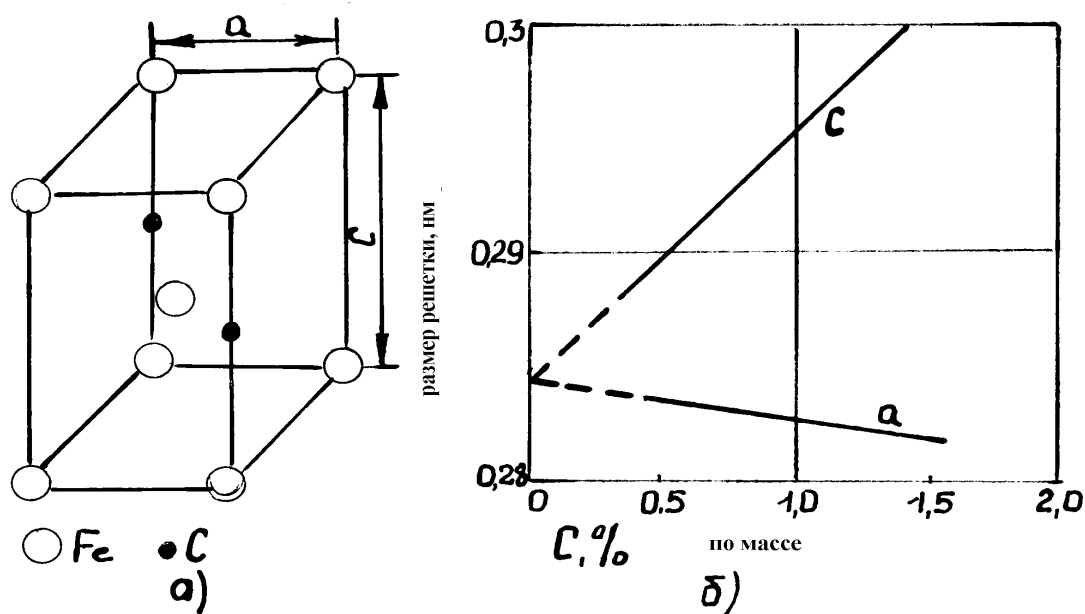


Рис. 1. а) Кристаллическая решетка мартенсита; б) ее параметры в зависимости от содержания углерода в мартенсите.

Рис. 2. Влияние углерода на температуры  $M_n$  и  $M_f$ .



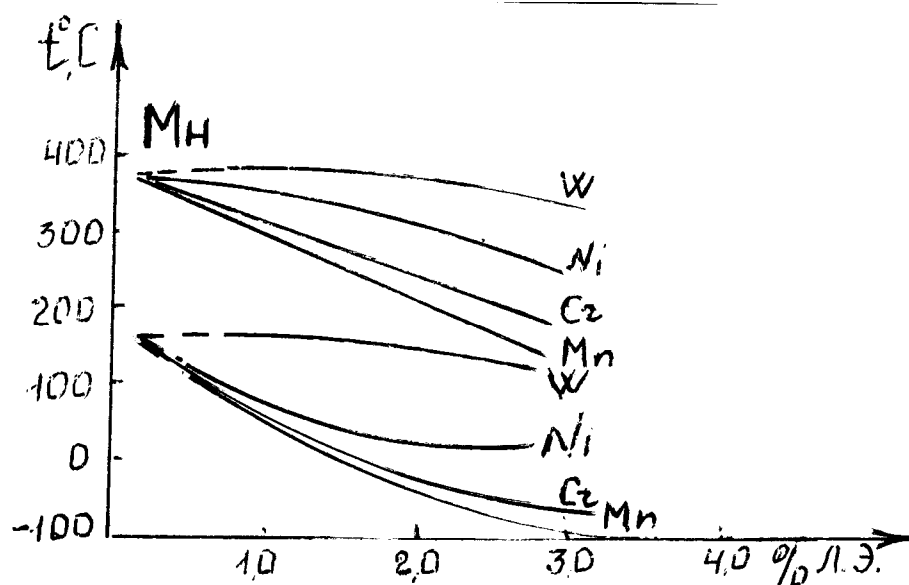


Рис.3. Влияние легирующих элементов на температуры  $M_n$  и  $M_f$ .

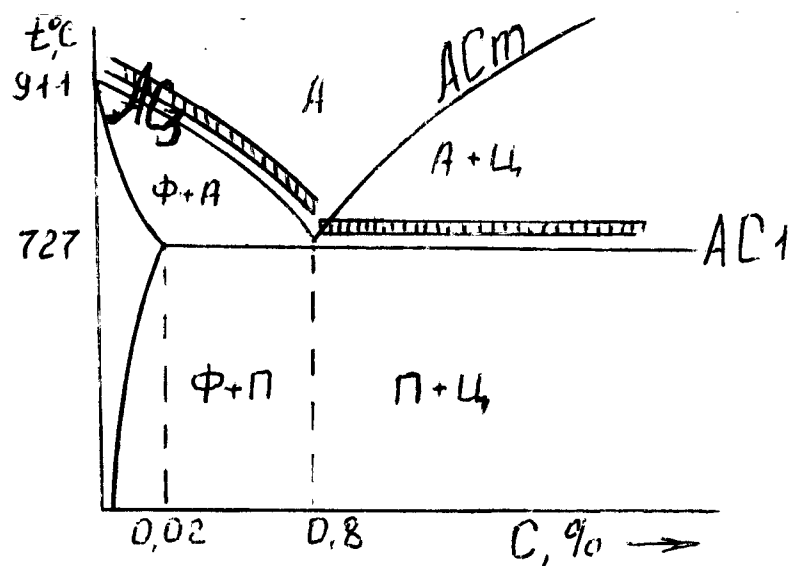


Рис.4. Температурный интервал закалки на диаграмме Fe-Fe<sub>3</sub>C.