

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### ВЛИЯНИЕ ЗАКАЛКИ И ОТПУСКА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1. Научиться определять оптимальную температуру нагрева сталей под закалку методом пробной закалки.

1.2. Изучить влияние на структуру и твердость стали:

1.2.1. температуры нагрева под закалку;

1.2.2. температуры отпуска.

1.3. Изучить влияние на твердость стали при закалке:

1.3.1. скорости охлаждения (вида охлаждающей среды);

1.3.2. содержания углерода в стали.

#### 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1. Ознакомление с методическими указаниями к лабораторной работе и поставленной задачей.

2.2. Закалка образцов из углеродистой стали 40 с нагревом до различных температур и охлаждением в воде и измерение твердости.

2.3. Закалка образцов из углеродистой стали 40 с охлаждением, с различной скоростью и измерение твердости.

2.4. Закалка образцов из углеродистых сталей с различным содержанием углерода и измерение твердости.

2.5. Отпуск образцов из стали 40, закаленных с оптимальной температуры нагрева и измерение твердости.

2.6. Построение графических зависимостей  $HV = f(t_{зак})$ ;  $HV = f(\%C)$ ;  $HV = f(t_{отп})$ .

2.7. Изучение микроструктур углеродистой стали 40 после различных температур закалки и отпуска.

2.8. Выводы по работе (о влиянии закалки и отпуска на структуру и свойства углеродистой стали).

#### 3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Термической обработкой называют технологические процессы, состоящие из нагрева, выдержки и охлаждения стальных деталей с целью изменения их структуры и свойств. Это один из самых распространенных в технике и самых эффективных способов изменения структуры и свойств сталей и сплавов, обусловленных протеканием различных фазовых превращений.

Классификация основных видов термической обработки была разработана академиком А.А.Бочваром. Термическая обработка включает четыре основных вида: отжиг, закалку, отпуск и старение.

*Отжигом* называют вид термической обработки, при которой формируются близкие к равновесным структуры материалов, в которых неравновесные состояния возникли в результате предшествующих видов воздействия (литье, ковка, прокатка, сварка и т.п.). Существуют два основных типа отжига - отжиг первого рода, при котором могут не протекать фазовые превращения, например, рекристаллизационный, и отжиг второго рода, сопровождающийся фазовыми превращениями (полный и неполный отжики). При отжиге сталь охлаждают очень медленно, обычно вместе с печью.

*Закалкой* стали называют процесс, при котором металл нагревают до температур, выше температур фазовых превращений и быстро охлаждают для получения неустойчивых состояний. При закалке сталь приобретает высокую твердость.

*Отпуском* предварительно закаленных сталей и сплавов называют технологические операции, проводимые с целью получения более устойчивых структурных состояний. Термин отпуск применяют в тех случаях, когда при закалке материал претерпевает полиморфные превращения.

*Старением* называют процесс распада пересыщенных закаленных твердых растворов, в которых при закалке полиморфных превращений не происходило. Как правило, этот процесс осуществляется при нагреве металла.

Возможность или невозможность проведения того или иного вида обработки определяется на основании анализа диаграмм состояний. Основой для изучения термической обработки стали является диаграмма состояния *железо-цементит*. Приведем общепринятые обозначения критических точек. Критические точки обозначаются буквой А. Нижняя критическая точка обозначается  $A_1$  и соответствует линии *PSK* диаграммы. Верхняя критическая точка  $A_3$  соответствует линии *GSE*. Чтобы отличить критическую точку при нагреве от критической точки при охлаждении, рядом с буквой А ставят букву *c* - при нагреве и *r* - при охлаждении.

Рассматривая структурные превращения в стали, следует выделить три основные структуры:

аустенит (А,  $\gamma$ ) - твердый раствор углерода в  $Fe_\gamma$ ;

мартенсит (М) - перенасыщенный твердый раствор углерода в  $Fe_\alpha$ ;

перлит (П)- эвтектоидная смесь одновременно образующихся феррита и цементита ( $\Phi + Fe_3C$ ).

При термической обработке стали наблюдаются четыре основных превращения.

1. Превращение перлита в аустенит, протекающее выше точки  $A_1$ .
2. Превращение аустенита в перлит, протекающее ниже точки  $A_1$ .
3. Превращение аустенита в мартенсит.
4. Превращение мартенсита в феррито-карбидную смесь.

Возможность протекания указанных превращений определяется соотношением свободных энергий основных структур (рис. 3.1.). Устойчивой в данных условиях является та структура, которая обладает минимальным запасом свободной энергии.

Изменение свободных энергий аустенита  $F_A$ , мартенсита  $F_M$  и перлита  $F_{II}$  с изменением температуры

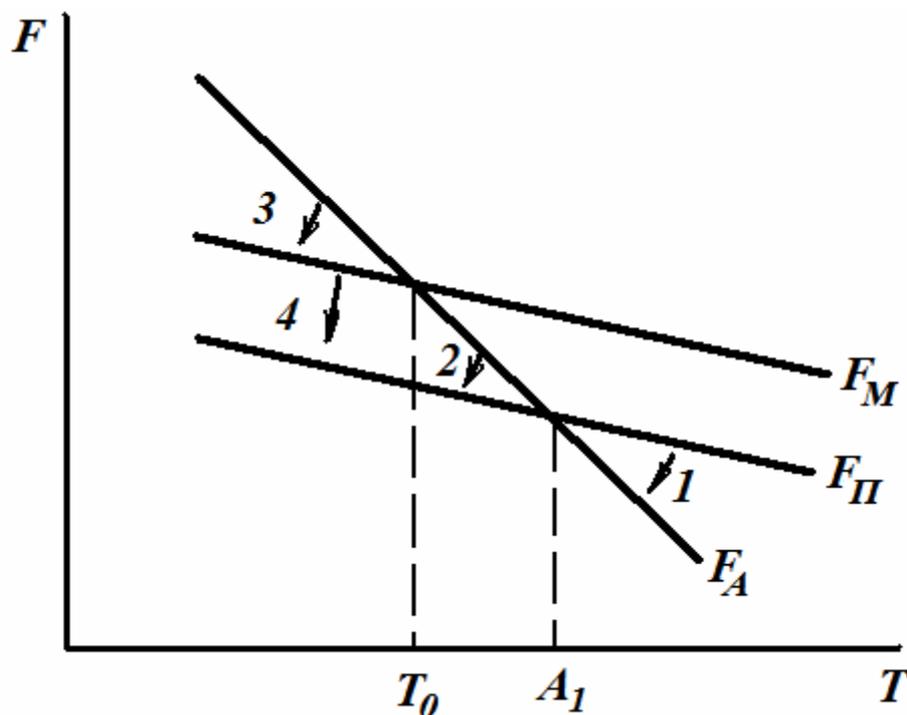


Рис.3.1.

На машиностроительные заводы углеродистые стали поставляются в отожженном состоянии. Медленное охлаждение стали при отжиге обеспечивает получение равновесной структуры с низкой твердостью и прочностью при высокой пластичности, а, следовательно, и хорошую обрабатываемость резанием и другими методами. После получения деталей их подвергают упрочняющей термической обработке, которая заключается, как правило, в закалке и отпуске.

Закалкой называют термическую обработку, состоящую из нагрева доэвтектоидных сталей до температур выше критической точки  $A_{c3}$ , а заэвтектоидной стали - выше  $A_{c1}$ , выдержке при этой температуре с последующим быстрым охлаждением с критической или более высокой скоростью. При закалке сталь приобретает высокую твердость.

При закалке сталь нагревается до аустенитного состояния. Превращение перлита в аустенит происходит при температуре более высокой, чем указано на диаграмме железо-цементит. Кривые на рис. 3.2. показывают, что чем выше температура, тем быстрее протекает превращение, и что чем быстрее осуществляется нагрев, тем при более высокой температуре происходит превращение. В результате такого нагрева происходит полиморфное превращение в железе  $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$  (кристаллическая решетка железа из объемно-центрированной кубической превращается в гранецентрированную кубическую),

при этом весь углерод, который входил в состав перлита в виде цементита, растворится в гранцентрированной кубической решетке железа. Превращение перлита в аустенит сопровождается измельчением зерна, так как в одном зерне перлита возникает множество зародышей аустенита на границах пластин феррита и цементита. Дальнейший нагрев по окончании превращения вызывает укрупнение аустенитных зерен, скорость роста которых определяется тем, какая используется сталь – наследственно мелкозернистая или наследственно крупнозернистая.

### Превращение перлита в аустенит у эвтектоидной стали

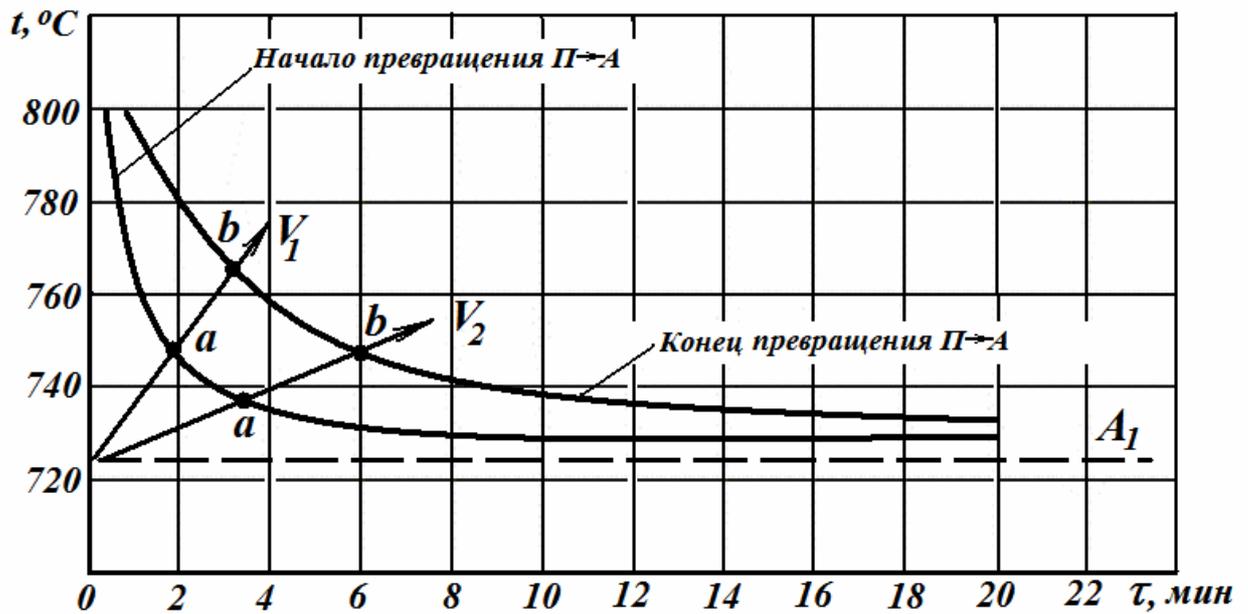


Рис.3.2

Теперь резко охладим сталь, например, погружением в воду, т.е. проведем закалку. Температура стали резко понизится до комнатной. При этом неминуемо происходит обратная перестройка кристаллической решетки - из гранцентрированной в объемноцентрированную ( $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$ ). Но при комнатной температуре подвижность атомов углерода ничтожно мала, и они не успевают при быстром охлаждении выйти из раствора и образовать цементит. В этих условиях углерод как бы насильственно удерживается в решетке  $\text{Fe}_\alpha$ - железа, образуя перенасыщенный твердый раствор. При этом атомы углерода распирают решетку железа, создавая в ней большие внутренние напряжения. Решетка вытягивается вдоль одного направления так, что каждая ячейка из кубической превращается в тетрагональную, т.е. принимает форму прямоугольной призмы (рис.3.3), которая характеризуется показателем тетрагональности ( $c/a > 1$ ). Такое превращение сопровождается и структурными изменениями. Возникает игольчатая структура, известная под названием мартенсита. Кристаллы мартенсита представляют собой очень тонкие пластины ориентированные относительно друг друга под углом 60

или  $120^\circ$ . В поперечном сечении, которое получается на микрошлифе, такие пластины под микроскопом представляются в виде игл.

Атомная решетка тетрагонального мартенсита:  
светлые кружки - атомы железа, черные кружки - атомы углерода.

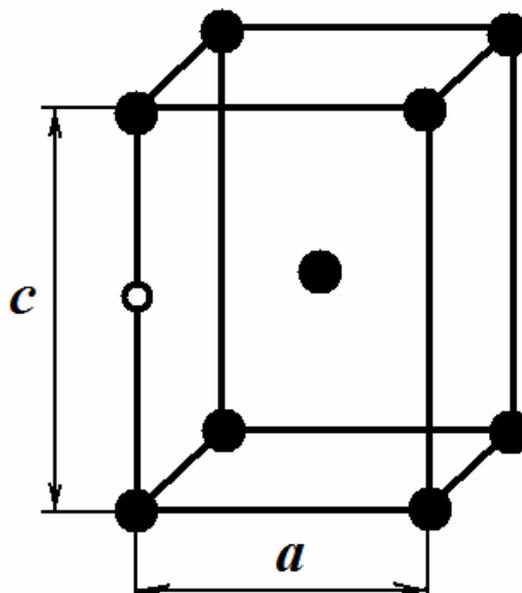


Рис.3.3

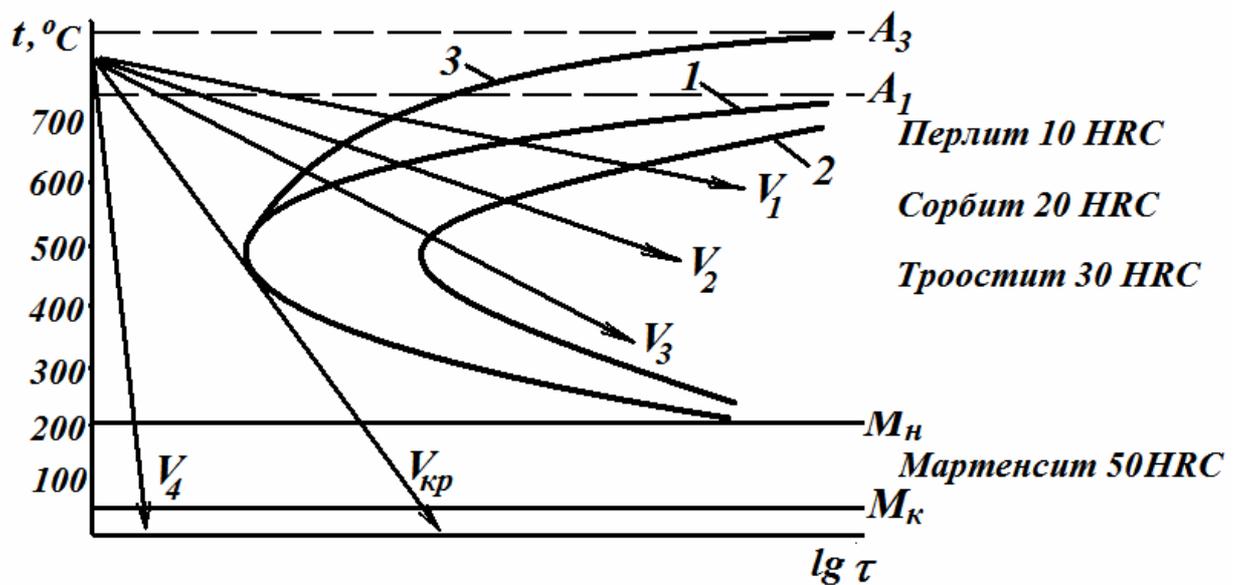
Удельный объем мартенсита больше удельного объема аустенита, из которого этот мартенсит образуется, поэтому образование мартенсита сопровождается возникновением больших внутренних напряжений, а это приводит к появлению большого числа дислокаций в кристаллах мартенсита. Если закаленную сталь с мартенситной структурой попытаться деформировать, то многочисленные дислокации, двигаясь в различных направлениях, будут встречаться и блокировать друг друга, взаимно препятствуя их дальнейшему перемещению. Таким образом создаются многочисленные препятствия для движения дислокаций, что повышает сопротивление пластической деформации, а следовательно, увеличивает твердость и прочность стали. Твердость мартенсита HB 6000-7000 МПа, (HRC 62-66), а показатели пластичности  $\delta$ ,  $\psi$  и ударная вязкость КСЧ близки к нулю.

Мартенсит в структуре стали образуется только при охлаждении с критической скоростью  $V_{кр}$  или более высокой. При охлаждении с меньшей скоростью, например, в масле, а не в воде, образуется структура троостит, на воздухе - сорбит (названия даны по именам ученых Трооста и Сорби) По своему строению сорбит и троостит сходны с перлитом, т.е. представляют смеси феррита с цементитом, но отличаются степенью дисперсности (толщиной пластин) феррита и цементита.

Критическая скорость охлаждения, обеспечивающая превращение аустенита в мартенсит, может быть определена по диаграмме изотермического распада аустенита (рис.3.4). Диаграмма строится на основе исследования превращения переохлажденного аустенита при постоянных температурах. Начало и конец превращения перлита в

аустенит на этой диаграмме представляются в виде двух С – образных кривых. Диаграмма строится в координатах *температура - время*. В этих же координатах изображаются и кривые охлаждения, что позволяет их совместить. В доэвтектоидных сталях превращению аустенита в перлит предшествует выделение феррита, а в заэвтектоидных - цементита.

Диаграмма изотермического распада аустенита в стали 40 и кривые охлаждения



1 – начало превращения перлита в аустенит; 2- конец превращения перлита в аустенит; 3 – начало выделения феррита

Рис.3.4

Линия  $V_1$ , характеризующая медленное охлаждение, пересечет С – образные кривые при высокой температуре, и продуктом распада аустенита будет перлит с низкой твердостью. При повышении скорости охлаждения ( $V_2, V_3$ ) кривые охлаждения пересекают линии диаграммы при более низких температурах и образуются более дисперсные смеси феррита и цементита - сорбит и троостит. Если же охлаждать аустенит со скоростью выше критической ( $V_4$ ), то распад аустенита в феррито-цементитные смеси не успевает произойти, аустенит переохладится до низких температур и превратится в мартенсит, т.е. произойдет закалка.

Минимальная скорость охлаждения, необходимая для переохладения аустенита до мартенситного превращения, называется *критической скоростью закалки* ( $V_{кр}$ ).

Превращение аустенита в мартенсит протекает в определенном температурном интервале: начинается при температуре  $M_n$  и заканчивается при температуре  $M_k$  (эти температуры называют мартенситными точками). Положение мартенситных точек зависит от содержания углерода в стали. Точка  $M_k$  в заэвтектоидных сталях лежит в области отрицательных температур, что приводит к присутствию в стали после закалки остаточного аустенита.

Результаты закалки во многом зависят от правильного выбора температур нагрева под закалку, которые определяются положением критических точек  $A_1$  или  $A_3$ . В первом приближении температура нагрева при термической обработке может быть определена по диаграмме *железо-цементит* (рис.3.5), по следующим зависимостям: для доэвтектоидных сталей  $t = A_{с3} + (30\div 50)^\circ\text{C}$  (полная закалка); для заэвтектоидных сталей  $t. = A_{с1} + (30\div 50)^\circ\text{C}$  (неполная закалка) В случае нагрева доэвтектоидной стали ниже оптимальной температуры происходит неполное превращение перлита и феррита в аустенит, и после закалки вместе с мартенситом будет присутствовать мягкий феррит. Нагрев заэвтектоидных сталей до температур ниже оптимальных практически не изменяет исходную структуру. Нагрев под закалку выше оптимальной температуры вызывает рост зерна аустенита, что приводит к образованию при охлаждении крупноиглочатого мартенсита и снижает ударную вязкость (надежность). Заэвтектоидные стали нагревают при закалке выше  $A_{с1}$ , т.к. присутствующий после охлаждения наряду с мартенситом цементит не снижает твердости, а перегрев не только вызывает рост игл мартенсита, но и увеличивает количество остаточного аустенита.

Оптимальный интервал температур закалки углеродистой стали

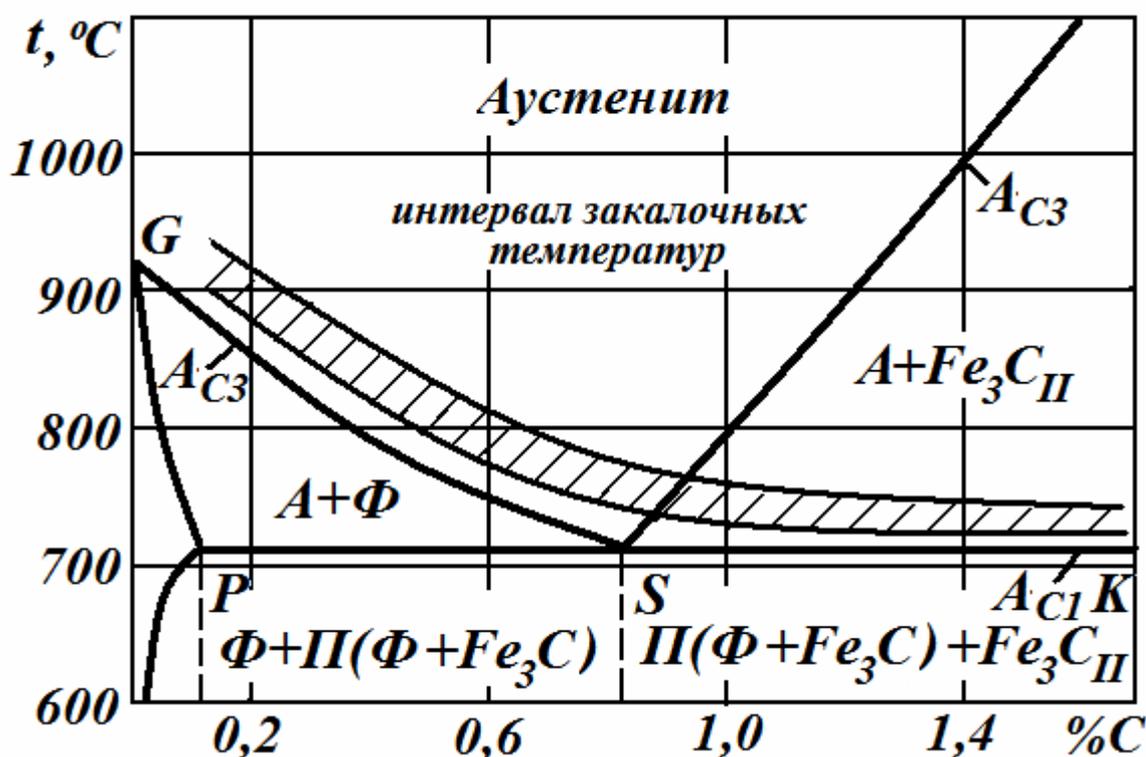


Рис. 3.5

Углеродистые стали содержат, наряду с железом и углеродом, постоянные примеси: Mn, Si, S, P и другие элементы, которые смещают положение критических точек. Поэтому для определения температуры закалки стали используют экспериментальный метод пробной закалки. Сущность метода состоит в том, что из исследуемой стали в отожженном состоянии изготавливают образцы, которые закалывают с различных

температур в интервале предполагаемого нахождения критических точек (ниже предполагаемых  $A_{c1}$  и выше  $A_{c3}$ ). Охлаждение образцов производится со скоростью выше критической. Поскольку целью закалки является получение высокой твердости стали, то после закалки на образцах измеряется твердость и по максимальному значению твердости определяется оптимальная температура закалки данной стали.

Скорость охлаждения выше критической при закалке исследуемой в данной работе стали 40 обеспечивает охлаждение в воде. Для изучения влияния скорости охлаждения на твердость стали после закалки проводится охлаждение ее в масле и на воздухе. Охлаждающая способность этих сред показана в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Характеристика различных закалочных сред

Закалочная среда	Скорость охлаждения в различных интервалах температур, град/с	
	350 – 600°С	200 – 300°С
Вода техническая, 20 °С	600	270
Минеральное масло	150	25
Воздух	3-5	1

На практике вид охлаждающей среды выбирают, в основном, в зависимости от назначения деталей, их конфигурации и степени легированности. При оптимальном режиме закалки в интервале температур до изгиба С-образных кривых (рис.3.4) необходимо охлаждать с высокой скоростью, а в интервале температур  $M_n$  -  $M_k$  охлаждать медленно. Такой режим исключает превращение аустенита в феррито-цементитные смеси в верхнем интервале температур и уменьшает напряжения при образовании мартенсита.

В связи с тем, что стали по-разному повышают свою твердость при закалке, вводится понятие закаливаемости. Под закаливаемостью понимают способность стали приобретать высокую твердость после закалки. Такая способность зависит главным образом от содержания углерода в стали: чем больше углерода, тем выше твердость. Объясняется это тем, что с повышением содержания углерода увеличивается число атомов углерода, насильственно удерживаемых при закалке в кристаллической решетке  $\alpha$ -железа, т.е. увеличивается перенасыщенность мартенсита и его тетрагональность. В результате возрастают внутренние напряжения, что в свою очередь способствует увеличению числа дислокаций и возникновению блочной структуры. В работе исследуется закаливаемость стали 20 (0,2 %С), стали 40 (0,4 %С) и стали У7 (0,7 %С), для чего проводится закалка образцов из этих сталей с оптимальных (в зависимости от содержания углерода) температур и измеряется их твердость.

Высокие структурные и термические напряжения, а также повышенная твердость и хрупкость стали, закаленной на мартенсит, вызывают необходимость проведения отпуска.

*Отпуском* называется заключительная операция термической обработки, состоящая в нагреве закаленной стали до температуры ниже критической  $A_{c1}$ , выдержке при этой температуре и последующем медленном или быстром охлаждении. Цель отпуска -

уменьшение напряжений в стали, повышение вязкости, пластичности и снижение твердости. В результате отпуска неустойчивые структуры закалки переходят в более устойчивые. В зависимости от температуры различают три разновидности отпуска: низкий, средний и высокий.

При низком отпуске закаленную сталь нагревают до температур 150-250 °С. Под действием повышенной температуры атомы углерода приобретают более высокую подвижность и благодаря этому частично выходят из мартенсита (перенасыщенного твердого раствора в  $\alpha$ -железе). Они образуют метастабильный карбид  $Fe_2C$ . При этом внутренние напряжения в кристаллической решетке железа и ее тетрагональность уменьшаются, а, следовательно, снижается склонность к хрупкости закаленной стали. Образующиеся карбиды имеют малые размеры и металлографически не обнаруживаются. Образующаяся смесь дисперсных карбидов и мартенсита с пониженным содержанием углерода называется мартенситом отпуска. При температурах выше 200 °С остаточный аустенит превращается в мартенсит отпуска. Твердость стали сохраняется высокой (у стали с содержанием углерода 0,7% - HRC 59-63). Низкому отпуску подвергают режущий и измерительный инструменты, а также детали после поверхностной закалки и цементации.

При среднем отпуске нагрев закаленной стали производят до температур 300-450 °С. При этом полностью завершается процесс выделения углерода из пересыщенного твердого раствора и мартенсит превращается в феррит. Карбид  $Fe_2C$  преобразуется в цементит  $Fe_3C$ . Образуется структура, состоящая из феррита, в котором равномерно распределены мельчайшие частицы цементита, называемая трооститом отпуска. Средний отпуск уменьшает внутренние напряжения в большей степени, чем низкий отпуск, приводит к значительному снижению твердости (у эвтектоидной стали HRC 45-50) и обеспечивает высокие пределы упругости и выносливости. Применяется главным образом после закалки пружин и рессор.

При высоком отпуске закаленную сталь нагревают до температур 500-650 °С. Такой нагрев приводит к коагуляции цементитных частиц - мелкие частицы сливаются в более крупные и в результате снижается твердость (HRC 30-45). Феррито-цементитную смесь более грубого строения, чем троостит, называют сорбитом отпуска. Высокий отпуск почти полностью (на 90-95%) устраняет внутренние напряжения, поэтому его применяют для многих ответственных деталей и инструментов, работающих в условиях динамической нагрузки: валов, шатунов, молотовых штампов и др. Закалка с высоким отпуском одновременно повышает временное сопротивление, предел текучести, относительное сужение и особенно ударную вязкость. Термическую обработку, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют улучшением. Отпуск выше 650 °С уже не повышает пластичность. Структура стали после такого отпуска состоит из достаточно грубой смеси феррита и цементита, которая называется зернистым перлитом или перлитом отпуска. Таким образом, от неравновесной (метастабильной) структуры мартенсита закалки с повышением температуры отпуска сталь все больше приближается к равновесному состоянию. При этом существенно изменяются и свойства стали (рис.3.6).

Следует отметить, что, несмотря на одинаковое название структур (троостит, сорбит, перлит) после отпуска со структурами, полученными непосредственно при распаде аустенита и одинаковую физическую природу (смеси феррита и цементита), структуры после отпуска имеют более высокие механические свойства, так как их строение зернистое, а не пластинчатое.

Механические свойства стали 40 в зависимости от температуры отпуска

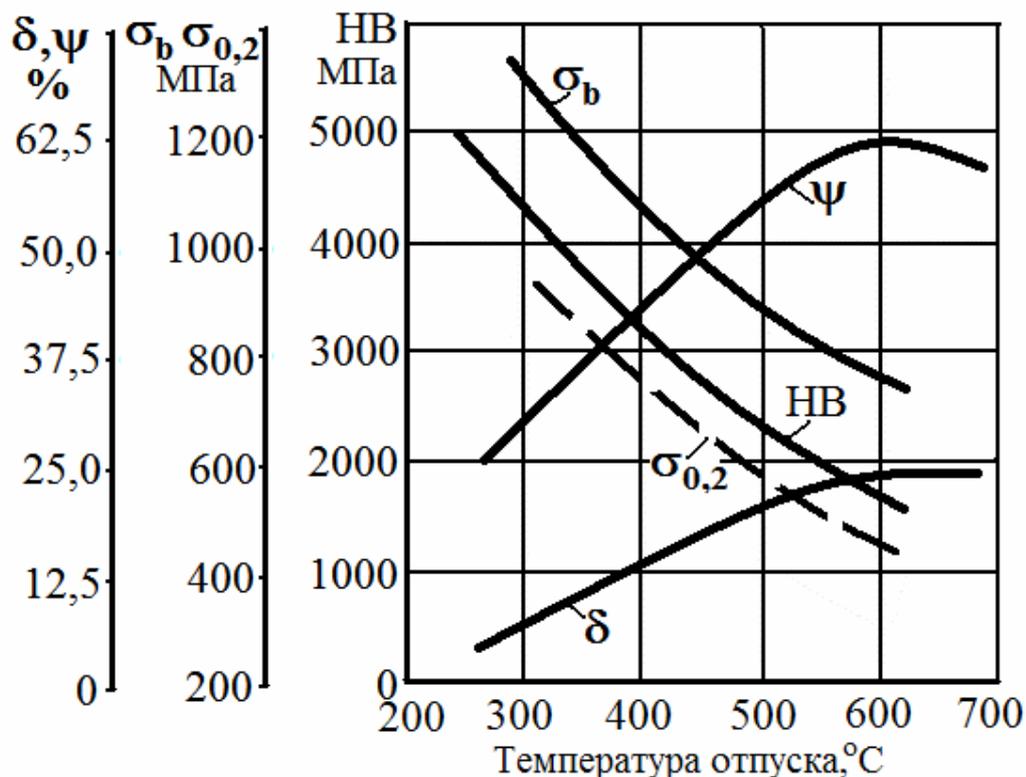


Рис.3.6

В работе проводится отпуск закаленной углеродистой стали 40 при различных температурах, измеряется твердость и изучаются соответствующие микроструктуры.

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 4.1. Для выполнения данной лабораторной работы студентам предоставляются: образцы углеродистых сталей 20, 40, У7 в отожженном состоянии; образцы из стали 40, закаленные с оптимальной температуры; муфельные электропечи; пресс для замера твердости модели ТШ-2; микроскоп для замера диаметра отпечатка при измерении твердости по Бринеллю; щипцы, очки и др.
- 4.2. Перед началом работы студенты знакомятся с оборудованием и правилами его эксплуатации. За знание правил техники безопасности студент расписывается в журнале по технике безопасности.
- 4.3. Последовательность работ
  - 4.3.1. Определить твердость исходной стали 40 (в отожженном состоянии) и занести в таблицу П.1. (см. приложения в конце методических указаний к лабораторной работе).
  - 4.3.2. Произвести закалку образцов из стали 40 по режимам, представленным в таблице

П.1.;

- 4.3.3. Произвести закалку образцов из сталей 20, 40, У7 по режимам, приведенным в таблице П.2.
- 4.3.4. Заточить образцы после закалки, измерить твердость и результаты занести в таблицу П.1 и П.2.
- 4.3.5. Произвести отпуск образцов из стали 40, закаленных с оптимальной температуры нагрева. Режимы отпуска приведены в таблице П.3.
- 4.3.6. Заточить образцы после отпуска, измерить твердость и результаты занести в таблицу П.3.
- 4.3.7. Построить графики: зависимости твердости от температуры закалки по данным табл.П.1.; зависимости твердости от содержания углерода в стали по данным табл. П.2; зависимости твердости от температуры отпуска по данным табл. П.3;
- 4.3.8. Изучить под микроскопом микроструктуры стали 40 после различных режимов закалки и отпуска;
- 4.3.9. Зарисовать микроструктуры в тетради, обозначить отдельные структурные составляющие (схемы указанных микроструктур помещены в приложении рис.П.1,- П.8).

## 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ РАБОТ

- 5.1. Термическая обработка
  - 5.1.1. Образцы на закалку загружаются в печи, предварительно разогретые на заданные температуры.
  - 5.1.2. Продолжительность выдержки образцов по достижении заданной температуры закалки по потенциометру - 20 мин.
  - 5.1.3. Выгрузка образцов из печи производится щипцами в минимальное время, чтобы не охладить образцы и печь,
  - 5.1.4. Закалка образцов производится в воде или масле при непрерывном, энергичном перемещении образцов в охлаждающей среде.
  - 5.1.5. Один образец оставляется после выгрузки из печи для охлаждения на воздухе.
  - 5.1.6. Закаленные образцы укладываются на трафаретки с указанными на них режимами закалки и переносятся на заточку торцов для последующего замера твердости.
  - 5.1.7. Время выдержки при достижении заданной температуры отпуска по потенциометру - 20 мин.
  - 5.1.8. Охлаждение образцов после отпуска в воде.
- 5.2. Подготовка поверхности образцов для замера твердости
  - 5.2.1. При заточке на абразивных кругах следует применять интенсивное охлаждение во избежание перегрева, для чего образцы необходимо периодически помещать в емкость с водой.
  - 5.2.2. Плоскость под замер твердости должна быть выполнена по нормали к

образующей образца, не иметь грубых рисок и других дефектов.

### 5.3. Замер твердости

- 5.3.1. Нагрузка 7500 Н, диаметр шарика 5 мм, выдержка под нагрузкой 10 с (автоматически). Шарик перед испытанием должен быть вытерт насухо.
- 5.3.2. Образец помещается на стол твердомера и вращением маховика испытываемая поверхность поджимается к шарика без усилия. Испытываемая поверхность должна быть перпендикулярна к оси шпинделя.
- 5.3.3. Центр отпечатка должен находиться от края образца на расстоянии не менее диаметра, а от центра соседнего отпечатка - на расстоянии не менее двух диаметров отпечатка.
- 5.3.4. Нажатием на кнопку включается электродвигатель. По окончании испытания пресс автоматически выключается.
- 5.3.5. Вращением маховика стол опускается, образец снимается.
- 5.3.6. С помощью лупы измеряется диаметр отпечатка. Используя переводные таблицы, определяют числа твердости.

## 6. УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

- 6.1. При загрузке образцов в электропечь и извлечении их для охлаждения необходимо предварительно отключить печь (потенциометр).
- 6.2. При загрузке и извлечении образцов из печи необходимо пользоваться рабочими рукавицами и щипцами.
- 6.3. При работе на наждачных станках следует:
  - 6.3.1. одевать очки.
  - 6.3.2. образец держать в руке крепко, к наждачному кругу прижимать без большого усилия;
  - 6.3.3. В случае возникших неисправностей немедленно нажать красную кнопку на коробке выключателя и обратиться к лаборанту.

## 7. ПЛАН ОТЧЕТА

Письменный отчет по работе должен включать:

- 7.1. Наименование и цель работы;
- 7.2. Краткий обзор состояния вопроса (привести участок диаграммы состояния железо-цементит с содержанием углерода до 2,14 % (область вторичной кристаллизации) с указанием интервала оптимальных температур закалки доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей (рис.3.2.) и диаграмму изотермического распада аустенита (рис.3.4).
- 7.3. Результаты эксперимента:
  - таблицы с экспериментальными данными;
  - графические зависимости твердости стали от температуры закалки, отпуска, содержания углерода;

рисунки микроструктур шлифов стали 40 после закалки и после отпуска.

#### 7.4. Выводы по работе

7.4.1. Как зависит твердость стали от температуры закалки, отпуска, содержания углерода, скорости охлаждения?

7.4.2. Как связаны получаемые при термической обработке стали структуры со свойствами?

### 8. ПЕРЕЧЕНЬ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ

8.1. Основные виды термической обработки стали, их режимы и назначение:

8.1.1. Отжиг.

8.1.2. Закалка.

8.1.3. Отпуск.

8.1.4. Старение.

8.2. Превращения при нагреве стали.

8.3. Превращения при медленном охлаждении стали.

8.4. Превращения при закалки стали.

8.5. Что такое мартенсит?

8.6. Критическая скорость охлаждения при закалке.

8.7. Оптимальная температура закалки доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей.

8.8. Охлаждающие среды.

8.9. Влияние углерода на твердость стали после закалки.

8.10. Превращения аустенита при непрерывном охлаждении (диаграмма изотермического превращения аустенита).

8.11. Превращения при отпуске стали.

8.12. Влияние температуры отпуска на механические свойства стали 40.

8.13. Виды отпуска.

8.14. Сущность метода пробной закалки.

### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение, М., "Машиностроение, 1980. - 493 с.

2. Гуляев А.П. Металловедение, М., "Металлургия", 1986. - 647 с.

3. Мозберг Р.К. Материаловедение, Галлин, "Валгус", 1976. - 554 с.

4. Под редакцией Б.Н.Арзамасова. Материаловедение, М.: Машиностроение", 1986. - 383 с.

5. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Metallurgy. 2984, 339 с.

6. Болховитинов Н.Ф. Металловедение и термическая обработка. М.: Машиностроение, 1965.

7. Масленников Ф.И. Лабораторный практикум по металловедению. М.: Машиностроение, 1961.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1.

Влияние температуры закалки и скорости охлаждения на твердость стали 40

Номер образца	Температура нагрева, °С	Закалочная среда	Твердость после закалки	
			диаметр отпечатка, мм	НВ, МПа
а) Влияние температуры закалки на твердость стали 40				
1	исходный	-		
2	680	вода		
3	750	вода		
4	800	вода		
5	850	вода		
6	900	вода		
б) Влияние скорости охлаждения на твердость стали 40				
7	850	вода		
8	850	масло		
9	850	воздух		

Таблица П.2.

Влияние содержания на твердость стали 40 после закалки

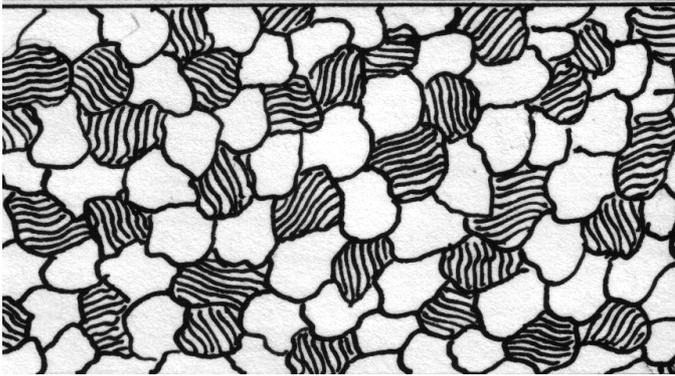
Номер образца	Марка стали	Температура нагрева, °С	Закалочная среда	Твердость после закалки	
				диаметр отпечатка, мм	НВ, МПа
1	Сталь 20	900	вода		
2	Сталь 20	850	вода		
3	Сталь 20	800	вода		

Таблица П.3.

Номер образца	Температура отпуска, °С	Среда охлаждения	Твердость после закалки	
			диаметр отпечатка, мм	НВ, МПа
1	исходный	-		
2	200	вода		
3	300	вода		
4	400	вода		
5	500	вода		
6	600	вода		
7	700	вода		

Схемы микроструктур стали 40 после закалки с разных температур ( $\times 725$ )

Закалка с температуры  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$

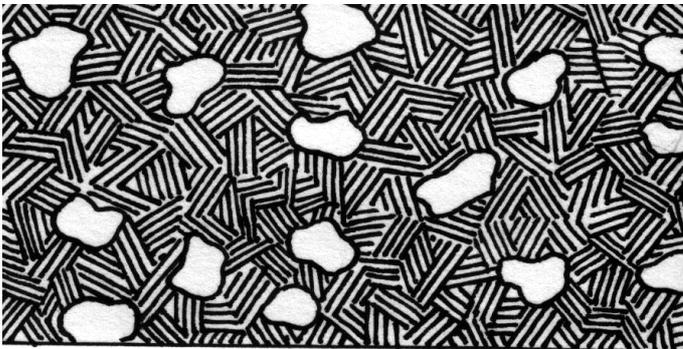


феррит

перлит

Рис. П.1.

Закалка с температуры  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$

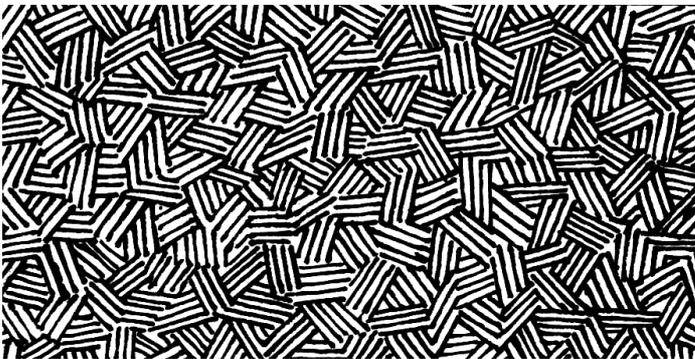


феррит

мартенсит

Рис. П.2.

Закалка с температуры  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$

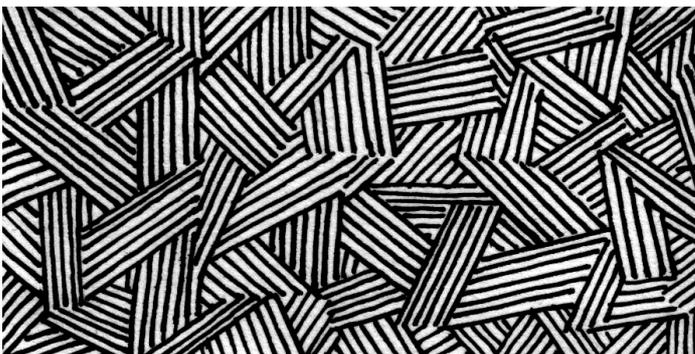


мартенсит

мелкоигольчатый

Рис. П.3.

Закалка с температуры  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$



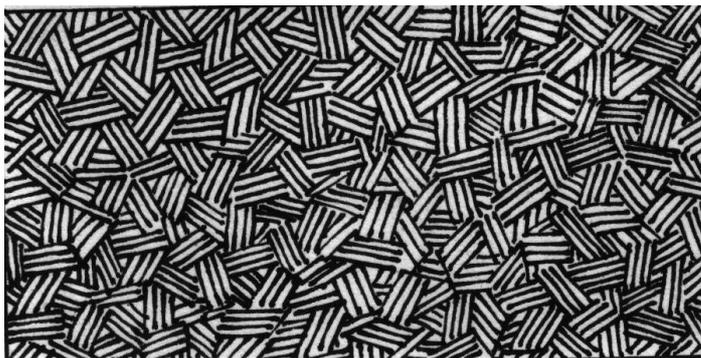
мартенсит

крупноигольчатый

Рис. П.4.

Схемы микроструктур стали 40 после закалки и отпуска при разных температурах ( $\times 725$ )

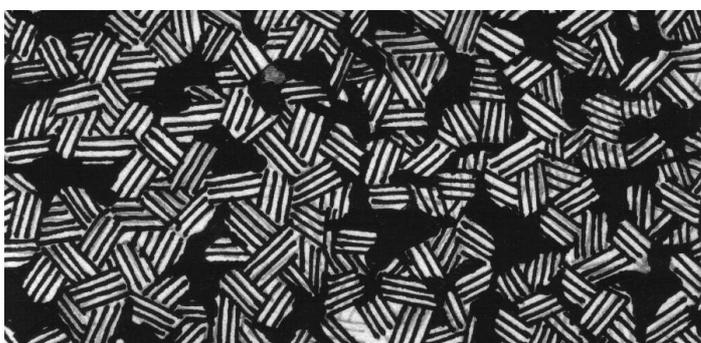
Закалка  $850^{\circ}\text{C}$  + отпуск при  $200^{\circ}\text{C}$



мартенсит  
отпуска

Рис. П.5.

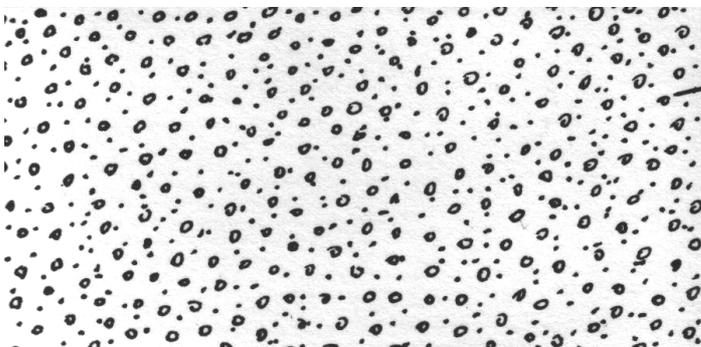
Закалка  $850^{\circ}\text{C}$  + отпуск при  $300^{\circ}\text{C}$



мартенсит  
троостит

Рис. П.6.

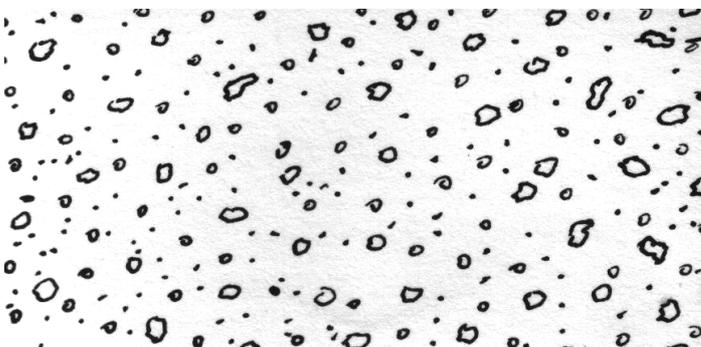
Закалка  $850^{\circ}\text{C}$  + отпуск при  $500^{\circ}\text{C}$



сорбит

Рис. П.7.

Закалка  $850^{\circ}\text{C}$  + отпуск при  $700^{\circ}\text{C}$



зернистый  
перлит

Рис. П.8.

