

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Ю.П. Егоров, Ю.М. Лозинский, Е.И. Марр

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум
по материаловедению для студентов,
обучающихся по направлению 150700 «Машиностроение»

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Томский политехнический университет
2015

УДК 620.18:669

ББК 34.62

М341

Авторы

Ю.П. Егоров, Ю.М. Лозинский, Е.И. Марр, Р.В. Роот, И.А. Хворова,
Ю.А. Евтюшкин, А.Г. Багинский В.П. Безбородов, Ж.Г. Ковалевская,
О.М. Утьев

М341 **Материаловедение: учебное пособие** / Ю.П. Егоров, Ю.М. Лозинский, Е.И. Марр и др.; Под ред. А.Г. Багинского; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 104 с.

В пособии рассматриваются современные способы исследования структуры и свойств металлических материалов; изложены закономерности формирования структуры и свойств металлических конструкционных материалов. Показана взаимосвязь между структурой и свойствами материалов. Даны современные представления о механизме упрочнения и разупрочнения металлов и сплавов. Рассмотрены широко применяемые и перспективные сплавы чёрных и цветных металлов. Пособие представляет собой лабораторный практикум по курсу «Материаловедение».

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 150700 «Машиностроение».

УДК 620.18:669

ББК 34.62

Рецензенты

Заместитель технического директора ООО «Сибкабель»
Зиборов В. Ю.

Доктор технических наук
Зав. лабораторией физико-химии порошковой металлургии
Института физики прочности и материаловедения СО РАН
Прибытков Г. А.

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2015

© Авторы, 2015

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2015

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, НАКЛЁП И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Цель работы

1. Изучить влияние пластической деформации на структуру и механические свойства металлов.
2. Изучить влияние нагрева на свойства деформированного металла.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Нагревательные печи с термопарами и автоматическими приборами для регулирования температуры.
2. Пневматический ковочный молот.
3. Твердомеры Бринеля ТШ-2.
4. Образцы технически чистой меди.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными положениями работы.
2. Выполнить экспериментальную часть работы.
3. Проанализировать полученные результаты и на основании теоретического материала сделать необходимые выводы.
4. Выполнить одну из задач (по указанию преподавателя) и пояснить решение.

Основные положения

1. Пластическая деформация металлов

Важнейшим и наиболее характерным свойством металлов является *пластичность* - способность претерпевать деформацию (изменять форму и размеры) без разрушения. В сочетании с высокой прочностью это свойство делает металлы незаменимыми для современной техники. Деформация, которая исчезает после снятия нагрузки, - это *упругая деформация*. Часть деформации, которая остается после снятия нагрузки, - это *пластическая деформация*. Чем больше остаточная деформация металла до разрушения, тем выше его пластичность.

При упругом деформировании под действием внешней силы изменяется расстояние между атомами, и в кристаллической решётке возникают дополнительные силы притяжения или отталкивания. Снятие нагрузки устраняет причину изменения межатомного расстояния, атомы становятся на прежние места под действием дополнительных сил, существующих между ними, и упругая деформация исчезает.

Значительно более сложно проходит процесс пластической деформации, которая осуществляется при напряжениях, бóльших предела упругости металла.

В конечном итоге пластическая деформация представляет собой сдвиг одной части кристалла относительно другой. Каков же механизм этого процесса? Естественно предположить одновременное смещение всех атомов одного слоя по отношению к атомам соседнего слоя по плоскости сдвига *MM* (рис. 1) – так сколь-

зят бумажные листы в пачке бумаги при сдвиге её верхней части. Усилие, которое надо приложить для осуществления такого сдвига, можно подсчитать и таким образом определить теоретическую прочность. Такой расчёт был сделан Я.И. Френкелем, и получилось, что для железа прочность должна быть равна 1300 кгс/мм^2 , тогда как в действительности предел прочности железа 15 кгс/мм^2 , т. е. в 100 раз меньше.

Объяснение реального механизма сдвиговых процессов дает теория **дислокаций** – особого рода линейных несовершенств (дефектов) кристаллической решётки. Представления о дислокациях были введены в металлофизику для того, чтобы объяснить несоответствие между наблюдаемой и теоретической прочностью кристаллов и описать механизм скольжения атомных слоёв при пластической деформации кристаллов. Если на первых этапах развития этой теории представления о дислокациях были предположительными, то затем были получены прямые доказательства их существования, а в настоящее время имеются многочисленные данные наблюдения дислокаций.

Наиболее простой и наглядный способ образования дислокаций в кристалле – сдвиг (рис. 2, *a*). Если сдвиг произошел только в части плоскости скольжения и охватывает площадку *ABCD*, то граница *AB* между участком, где скольжение уже произошло, и ненарушенным участком в плоскости скольжения и будет дислокацией. Атомная плоскость, перпендикулярная к плоскости скольжения и проходящая через *AB*, является как бы лишней и её называют **экстраплоскостью**, а дислокацию *AB* – **краевой дислокацией**, обозначаемой знаком \perp .

Возможны и другие виды дислокаций, например, **винтовая** (рис. 3, *a*) или **смешанная** (рис. 4, *a*). Винтовая дислокация получила свое название из-за того, что кристалл при этом можно считать состоящим из одной атомной плоскости, закрученной по винтовой поверхности вокруг линии дислокации *AB* (рис. 3, *a*).

Нетрудно увидеть, что движение дислокаций через кристалл вызывает пластическую (необратимую) деформацию кристалла (рис. 2–4, *б, в, г*). Перемещение дислокаций происходит по схеме, изображённой на рис. 5.

Из схемы (рис. 5) видно, что для перемещения дислокации на одно межатомное расстояние каждый атом экстраплоскости и плоскости в нижней части кристалла смещается на величину значительно меньше межатомного расстояния. При поочерёдном (эстафетном) смещении атомов дислокация может скользить на большие расстояния (через весь кристалл), вызывая его пластическую деформацию.

Для сдвига одной части **идеального** кристалла относительно другой необходимо **одновременно** разорвать **все** межатомные связи между граничными атомами по обе стороны от плоскости скольжения (рис. 1).

В **реальном** металле **при перемещении дислокации** по плоскости скольжения **одновременно** разрываются межатомные связи **только между двумя соседними цепочками атомов** ограничивающими (рис. 5).

Именно этим объясняется более низкое значение сдвигающего напряжения и прочности у реальных металлов.

Интересно, что и в живой природе используется дислокационный принцип движения, например, змеи и гусеницы обычно ползают за счет образования

складки («положительной дислокации») около хвоста и продвижения этой складки в сторону головы.

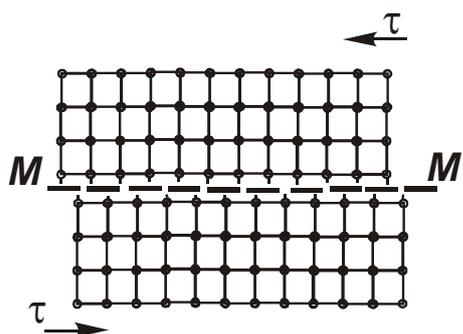


Рис. 1

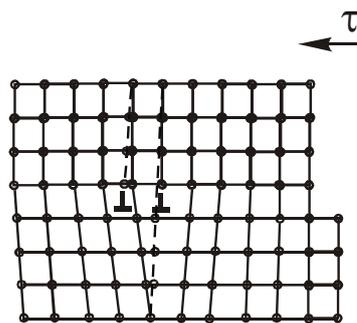
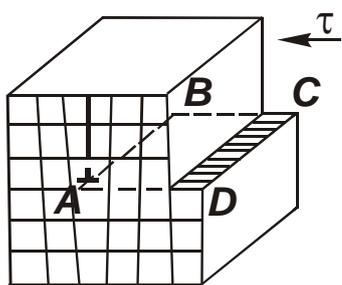
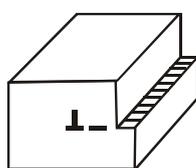


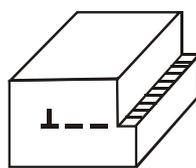
Рис. 5



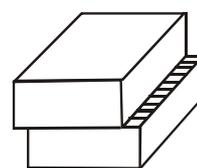
a



б

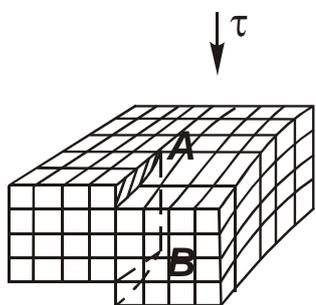


в

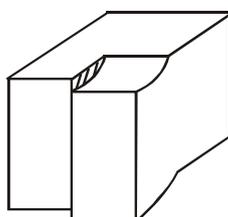


г

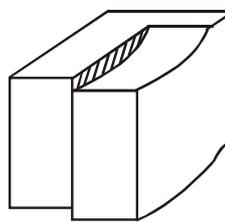
Рис. 2



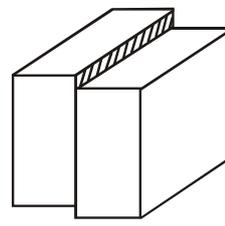
a



б

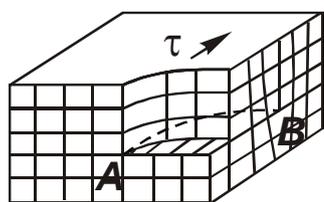


в

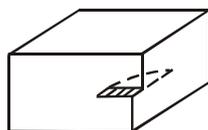


г

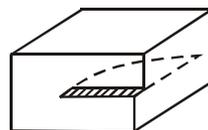
Рис. 3



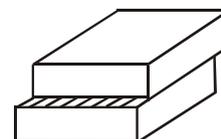
a



б



в



г

Рис. 4

2. Наклёп и рекристаллизация металлов

Наиболее впечатляющее свойство металлов – способность их к деформационному упрочнению.

Явление упрочнение металла в процессе пластической деформации называется **наклёпом**, или нагартовкой.

Из дислокационной теории следует, что для **повышения** прочности металлов необходимо каким-либо образом **затруднить движение** дислокаций. Существует несколько способов упрочнения или закрепления дислокаций, одним из них является упрочнение кристалла пластической деформацией.

Ранее рассмотренный простейший способ введения дислокаций в кристалл при сдвиге показывает, что рост пластической деформации увеличивает количество дислокаций в кристалле. Чем сильнее воздействие на металл, тем больше в нём образуется дислокаций.

На начальной стадии деформация происходит за счёт скольжения относительно небольшого количества дислокаций. В процессе деформирования количество движущихся в кристалле дислокаций постоянно увеличивается, что затрудняют их скольжение. Возникают скопления дислокаций, которые уже неспособны перемещаться по кристаллу.

Такие закреплённые дислокации затрудняют движение вновь возникающих дислокаций, т. е. упрочнение металла создается самими дислокациями. В этом случае говорят об упрочнении металла пластической деформацией или просто о **наклёпе** металла.

Пластическая деформация оказывает существенное влияние на механические свойства металла и его структуру (рис. 6).

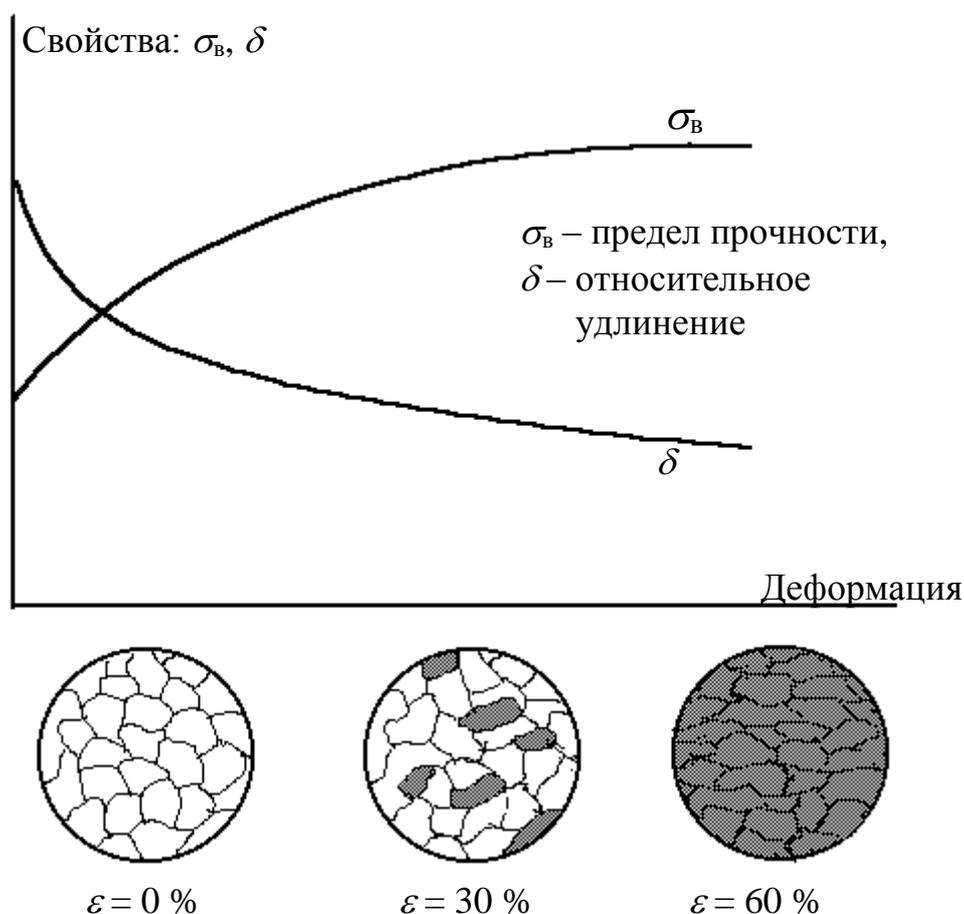


Рис. 6. Изменение структуры и свойств деформированного металла в зависимости от степени деформации

На рис. 6 показано, как под действием приложенной нагрузки зёрна, из которых состоят все технические металлы, начинают деформироваться и вытягиваться; объём зёрен и их количество при этом не изменяется. Внутри каждого зерна, особенно по его границам, сосредотачивается большое количество дислокаций, плотность которых возрастает от 10^6 – 10^7 см⁻² (недеформированный металл) до 10^{10} – 10^{12} см⁻² (после деформации). Кристаллическая решётка зёрен становится искажённой (несовершенной), это состояние является структурно неустойчивым.

С увеличением степени деформации **прочность** металла **увеличивается**, но **уменьшается пластичность** – он становится **хрупким**, что может привести к возникновению трещин и разрушению (при увеличении деформации).

Для снятия наклёпа деформированный металл нагревают, в результате сначала происходят процессы **возврата** и **полигонизации**, приводящие к перераспределению и уменьшению концентрации структурных несовершенств (точечных и линейных дефектов) в кристаллической решётке. При дальнейшем повышении температуры начинается основной процесс, возвращающий наклёпанный металл в устойчивое состояние – рекристаллизация.

Рекристаллизация – это полная или частичная замена деформированных зёрен данной фазы новыми зёрнами той же фазы, имеющими меньшее количество **дефектов** в кристаллической решётке (т. е. более совершенными, рис. 7).

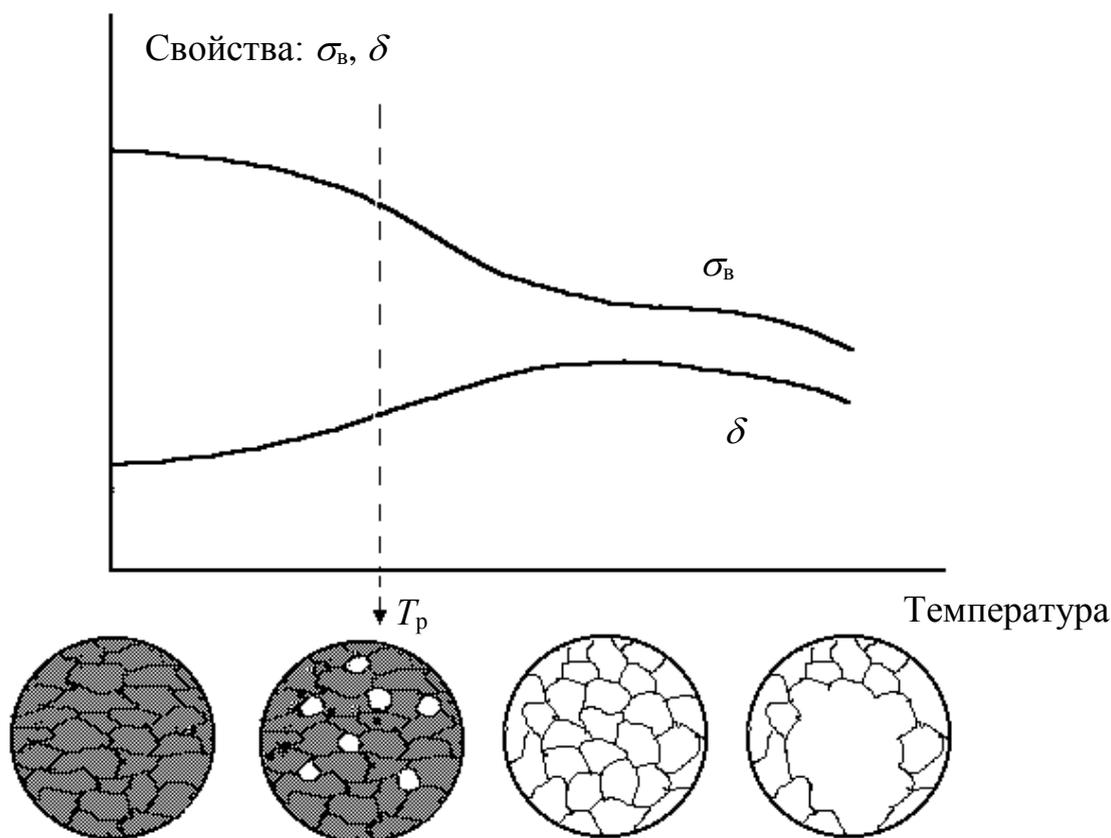


Рис. 7. Изменение структуры и свойств деформированного металла при нагреве

Новые зёрна, зарождающиеся при рекристаллизации, отличаются от деформированных **меньшей плотностью дислокаций**. В качестве центров новых зёрен

выступают области дислокаций, скопившиеся на границах старых зёрен при наклёпе. Рекристаллизация – диффузионный процесс, протекающий в течение какого-то времени (чем выше температура, тем быстрее).

Наименьшую температуру, при которой начинается процесс рекристаллизации и происходит разупрочнение, называют **температурой рекристаллизации**. Между температурой рекристаллизации (T_p) и температурой плавления ($T_{пл}$) металлов существует простая зависимость, определенная металловедом А.А. Бочваром:

$$T_p = \alpha \cdot T_{пл}, \text{ К.}$$

Ниже приведена температура рекристаллизации металлов и сплавов:

$$T_p = (0,1 \div 0,2) \cdot T_{пл} - \text{для чистых металлов,}$$

$$T_p = 0,4 \cdot T_{пл} - \text{для технически чистых металлов,}$$

$$T_p = (0,5 \div 0,6) \cdot T_{пл} - \text{для сплавов (твёрдых растворов).}$$

Температуру начала рекристаллизации определяют металлографическим и рентгеноструктурным методами, а также по изменению свойств. Если T_p определяют по изменению твёрдости, то за T_p принимают температуру, при которой прирост твёрдости, созданный деформацией, уменьшается вдвое (рис. 8).

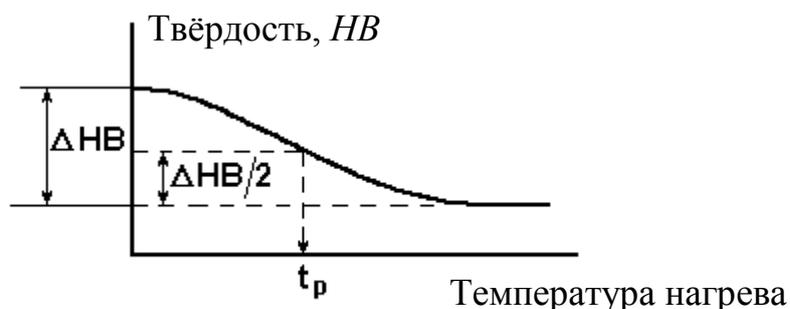


Рис. 8. Определение температуры рекристаллизации по изменению твёрдости при нагреве

Определение температуры рекристаллизации необходимо для назначения режимов **рекристаллизационного отжига** – термической обработки для снятия наклёпа. Температура такого отжига должна быть выше температуры рекристаллизации для данного сплава.

Величина зёрен после рекристаллизации (рекристаллизационного отжига) напрямую зависит от степени деформации металла при наклёпе (рис. 9).

Существует небольшая степень деформации (до 10 %), называемая **критической**, после которой размер новых зёрен, образующихся при рекристаллизации, в несколько десятков раз превышает исходное, недеформированное зерно. Это явление очень часто встречается в деталях машин, которые подвергались обработке давлением с разной степенью деформации: от нуля до больших степеней, и его следует учитывать, так как на участках с крупнозернистой структурой сильно снижается ударная вязкость. Хотя в некоторых других случаях (например, для повышения жаропрочности, получения требуемых электромагнитных свойств) увеличение размера зерна является положительным.

Формирование anomalно крупных рекристаллизованных зёрен в области критической деформации обусловлено наличием малого числа центров рекристаллизации (центров новых зёрен). Новые зёрна зарождаются в первую очередь там, где при наклёпе возникла наибольшая плотность дислокаций. Так как движущиеся дислокации задерживаются и скапливаются на границах зёрен, то именно здесь начнут образовываться и расти новые зёрна в процессе рекристаллизации.

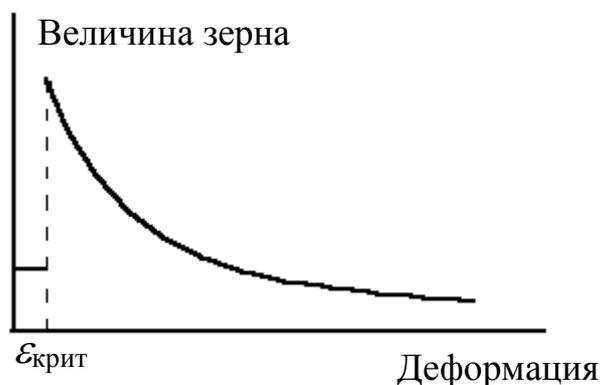


Рис. 9. Влияние степени деформации на величину рекристаллизованного зерна

С увеличением степени деформации размер новых, образовавшихся зёрен уменьшается. Это связано с увеличением плотности дислокаций в деформированном металле и, соответственно, с увеличением числа центров рекристаллизации (центров новых зёрен).

В зависимости от температуры, при которой выполняется обработка давлением, пластическую деформацию разделяют на холодную и горячую.

Холодная деформация – деформация металла, которая осуществляется при температуре ниже температуры рекристаллизации. При холодной деформации увеличивается плотность дислокаций, зёрна вытягиваются в направлении деформации, увеличивается прочность металла и снижается пластичность.

Горячая деформация – деформация металла, которая осуществляется при температуре выше температуры рекристаллизации. При горячей деформации металла (прокатке, ковке, штамповке, прессовании) упрочнение (наклёп), создаваемое в процессе деформации, снимается в результате рекристаллизации в ходе самой деформации.

Задания для выполнения работы

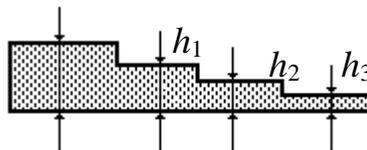
1. Для образцов меди, деформированных на 30–40 %, определить температуру рекристаллизации меди по изменению твёрдости после нагрева на различную температуру (по графической зависимости «твёрдость – температура»). За центр температурного интервала принять температуру рекристаллизации меди, определенную по формуле А.А. Бочвара. Температурный шаг от центра интервала в сторону уменьшения и увеличения температуры принять 50 °С.

Сравнить температуру рекристаллизации меди, определённую по формуле А.А. Бочвара, и найденную экспериментально; если они отличаются, объяснить причину. Температура плавления меди 1083 °С.

2. Провести холодную деформацию образцов технической чистой меди на различную степень деформации и определить изменение твёрдости деформированных образцов в зависимости от степени деформации.

Степень деформации рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = (h_0 - h_k) \cdot 100 / h_0, \%$$



где h_0 – толщина образца до деформации, h_k – толщина образца после деформации.

Результаты измерений внести в табл. 1 и построить графическую зависимость твёрдости от степени деформации.

Таблица 1

Результаты эксперимента: твёрдость деформированной меди

№ п/п	Исходная толщина h_0 , мм	Конечная толщина h_k , мм	Степень деформации ε , %	Твёрдость, HV	Примечание

3. Провести горячую деформацию образцов технической чистой меди с различной степенью деформации и определить изменение твёрдости горячедеформированных образцов в зависимости от степени деформации. Результаты измерений внести в табл. 1 и построить графическую зависимость твёрдости от степени горячей деформации.

4. Холоднодеформированные образцы меди подвергнуть рекристаллизационному отжигу в течение 10 минут и определить изменение твёрдости отожжённых образцов в зависимости от степени деформации. Результаты измерений внести в табл. 1 и построить графическую зависимость.

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Оборудование и материалы, используемые в работе.
3. Основные положения по деформации, наклёпу и рекристаллизации металлов (кратко).
4. Описание экспериментальной части работы и полученные результаты с необходимым графическим материалом, анализом, выводами.
5. Обоснованное решение указанной преподавателем задачи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.1

МИКРОСТРУКТУРА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы

1. Изучение микроструктуры отожжённых углеродистых сталей.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Металлографические микроскопы.
2. Коллекция шлифов сталей.
3. Альбом фотографий микроструктур углеродистых сталей.
4. Тренажёр «*Диаграмма состояния железа – цементит*».

Порядок выполнения работы

1. Перед выполнением лабораторной работы ознакомиться с основными теоретическими положениями.
2. Изучить с помощью тренажёра стальную часть диаграммы *железо – цементит*.
3. Получить навыки определения под микроскопом элементов структуры стали: феррита, цементита, перлита, для чего:
 - а) рассмотреть фотографии микроструктур в альбоме;
 - б) рассмотреть под микроскопом подобранные шлифы для изучения структурных составляющих и зарисовать схемы рассмотренных структур.
4. Изучить микроструктуру образцов, относящихся к различным классам стали (доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные); определить, к какому из названных классов относится каждый образец. Зарисовать схему микроструктуры рассмотренных образцов и обозначить на рисунках структурные составляющие.
5. В образцах доэвтектоидных сталей определить содержание углерода.

Основные положения

На диаграмме состояния *железо – цементит* (рис. 1) сплавы, относящиеся к сталям, расположены в интервале концентраций углерода до 2,14 %, т. е. левее точки *E*. При температурах ниже 727 °С все отожжённые углеродистые стали состоят из двух фаз – феррита и цементита. **Феррит** – это твёрдый раствор углерода в железе с объёмно-центрированной кубической решёткой (Fe_α). Максимальная растворимость углерода в Fe_α составляет около 0,02 % (точка *P*). **Цементит** – это карбид железа Fe_3C , содержащий 6,67 % С.

При температурах выше линии *GSE* равновесной фазой является **аустенит** – твёрдый раствор углерода в железе с гранецентрированной кубической решёткой (Fe_γ). Предельная растворимость углерода в Fe_γ – 2,14 % (точка *E*).

В результате фазовых превращений в твёрдом состоянии, при малых скоростях охлаждения, в сталях будут образовываться следующие структуры: перлит, избыточный феррит, вторичный цементит и третичный цементит.

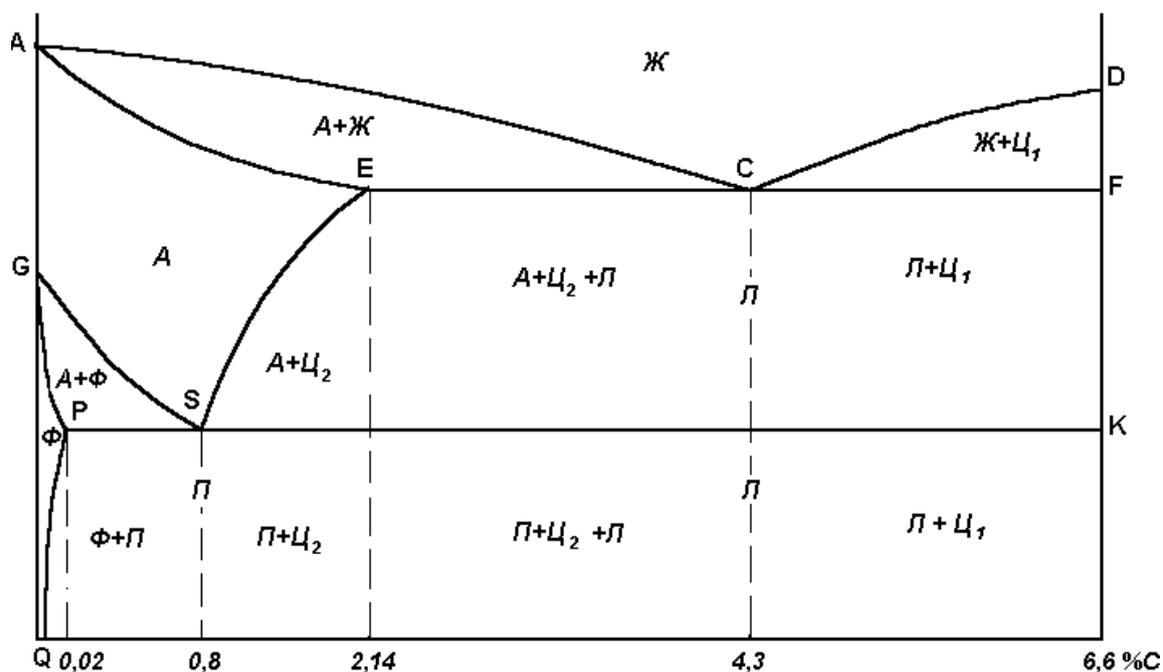


Рис. 1. Диаграмма состояния железо – цементит

Ниже линии GS в результате полиморфного превращения железа часть аустенита превращается в феррит с последующим перераспределением углерода между этими фазами. На линии SE из аустенита начинает выделяться избыточный углерод с образованием вторичного цементита. На линии PQ из феррита выделяется третичный цементит. Во всех сплавах правее точки P при небольшом переохлаждении до температур ниже 727°C аустенит эвтектоидного состава ($0,8\% \text{ C}$) распадается на эвтектоидную смесь феррита и цементита, называемую **перлитом**, причём цементит может быть в виде пластинок или зёрен (Приложение, рис. 4).

Сталь, содержащая $0,8\% \text{ C}$, называется **эвтектоидной**. Стали, содержащие менее $0,8\% \text{ C}$, называют **доэвтектоидными**, а стали, содержащие более $0,8\% \text{ C}$, – **заэвтектоидными**.

Металлографический анализ металлов и сплавов заключается в исследовании структуры материалов при больших увеличениях с помощью микроскопа, а наблюдаемая в микроскопе структура называется **микроструктурой**. Изучение под микроскопом структуры металлов возможно лишь при достаточно интенсивном отражении световых лучей от исследуемой поверхности. Поэтому поверхность образца должна быть специально подготовлена. Образец, поверхность которого подготовлена для металлографического анализа, называется **микрошлифом**. Для изготовления микрошлифа необходимо вырезать образец из исследуемого металла, получить на нем плоскую, блестящую поверхность, а затем шлиф травят. Существует несколько методов травления, из которых наиболее распространён метод избирательного растворения фаз. Метод основан на различии физико-химических свойств отдельных фаз и пограничных участков зёрен. В результате различной интенсивности растворения создается рельеф поверхности шлифа. Для травления микрошлиф погружают полированной поверхностью в раствор избранного состава и через некоторое время вынимают. Если полированная поверх-

ность станет слегка матовой, травление считается законченным, шлиф сразу же промывают спиртом и высушивают фильтровальной бумагой.

Микрошлифы сталей травят 3-4%-м раствором HNO_3 в спирте, после чего структурно свободные феррит и цементит по сравнению с тёмным (коричневым) перлитом выглядят белыми.

При охлаждении доэвтектоидной стали превращение аустенита в феррит начинается с границ отдельных зёрен аустенита, и зёрна одной фазы постепенно заменяются на другие. Размер и количество ферритных зёрен при этом превращении в значительной степени зависит от скорости охлаждения аустенита. При рассмотрении в микроскоп феррит наблюдается в виде светлых зёрен неодинаковой яркости (Приложение, рис. 1). По мере увеличения концентрации углерода в доэвтектоидной стали количество зёрен феррита убывает, а количество перлита увеличивается (Приложение, рис. 2).

В сплавах, содержащих 0,5-0,75 % С, зёрна феррита располагаются по границам зёрен другой структурной составляющей – перлита – в виде разорванной сетки (Приложение, рис. 3).

В доэвтектоидной стали перлит в большинстве случаев имеет пластинчатое строение. Тёмные пластинки, видимые в перлите, представляют собой тени, отбрасываемые на участки феррита выступающими после травления участками цементита. Структура перлита в доэвтектоидных и заэвтектоидных сталях определяется условиями выполнения отжига. Форма и размер частиц цементита в перлите существенно влияют на его свойства. Так, например, перлит с зернистой структурой более пластичен и имеет меньшую твёрдость, чем пластинчатый. Твёрдость зернистого перлита 160-220 *HВ*, а пластинчатого – 200-250 *HВ*. С уменьшением размера цементитных частиц твёрдость и прочность перлита возрастает. Структура перлита определяет и обрабатываемость стали при резании. Доэвтектоидная сталь хорошо обрабатывается резанием, если перлит имеет пластинчатую структуру, а эвтектоидная и заэвтектоидная стали – если перлит зернистый.

В заэвтектоидных сталях возможно выделение вторичного цементита в виде сплошной сетки по границам зёрен перлита (Приложение, рис. 5). Это происходит после полного отжига и является значительным дефектом, ухудшающим прочность, вязкость и обрабатываемость стали.

Еще одной, но более редко встречающейся формой выделения цементита, также сильно ухудшающей механические свойства, является образование его в виде изолированных игл, как по границам, так и внутри колоний перлита (вследствие значительного перегрева стали).

Итак, можно выделить четыре типа структур сталей.

Первый тип структуры – феррит и третичный цементит – наблюдается в низкоуглеродистых сталях, содержащих до 0,02 % С (т. *P*). Такие стали называются **техническим железом**.

Второй тип структуры – феррит и перлит – наблюдается в доэвтектоидных сталях, содержащих от 0,02 до 0,8 % С (т. *S*). Чем больше в доэвтектоидной стали углерода, тем больше в ней перлита.

Третий тип структуры – перлит – наблюдается в эвтектоидной стали, содержащей 0,8 % С.

Четвёртый тип структуры – вторичный цементит и перлит – наблюдается в заэвтектоидной стали с содержанием углерода от 0,8 до 2,14 % (т. *E*).

Отличие доэвтектоидных сталей от заэвтектоидных по микроструктуре

В доэвтектоидных и заэвтектоидных сталях имеется одна общая для обоих типов структур составляющая – перлит. Отличить при микроанализе до- и заэвтектоидные стали друг от друга можно только по избыточным фазам: если в структуре находится избыточный феррит, то сталь доэвтектоидная, а если вторичный цементит, то сталь заэвтектоидная.

Имеются два металлографических способа отличить доэвтектоидные стали от заэвтектоидных.

а) При травлении раствором азотной кислоты избыточные феррит и цементит под микроскопом выглядят как светлые участки структуры, по сравнению с перлитом. Относительное весовое количество избыточного феррита в доэвтектоидных сталях может изменяться от 100 % (сталь состава точки *P*) до 0 % (сталь состава точки *S*). В то же время количество вторичного цементита в заэвтектоидных сталях может изменяться в узких пределах – от 0 % (сталь состава точки *S*) до 20 % (сталь состава точки *E*).

Если в отожжённой стали вместе с тёмными зёрнами перлита, обнаруживается ***светлая составляющая***, образованная из отдельных зёрен и ***занимающая более 20 % всей площади шлифа***, то эта фаза является избыточным ***ферритом***, и следовательно, сталь – доэвтектоидная.

б) Если в отожжённой стали относительное количество светлой составляющей меньше 20 %, то эта светлая фаза может оказаться как избыточным ферритом, так и вторичным цементитом.

В таком случае эти две фазы можно отличить *по форме*:

– ***сетка избыточного феррита неравномерна по ширине и составлена из отдельных зёрен, выстроенных последовательно***;

– ***сетка вторичного цементита на шлифе выявляется в виде непрерывных, тонких линий практически одинаковой ширины***.

Кроме того, цементит имеет под микроскопом более светлый *оттенок* по сравнению с ферритом, так как сетка более твёрдого вторичного цементита после полировки слегка выступает над более мягким перлитом в виде рельефа.

Наконец, в этом случае можно использовать индикаторный травитель – горячий щелочной раствор пикрата натрия, который окрашивает цементит в тёмно-коричневый цвет, оставляя феррит светлым.

Металлографическое определение процентного содержания углерода в отожжённых сталях

Если углеродистая сталь хорошо отожжена, т. е. приведена в равновесное состояние, то микроструктурным анализом можно определить содержание в ней углерода.

Такие определения фактически выполняют только для доэвтектоидных сталей, так как в заэвтектоидных сталях значительное изменение в содержании углерода практически не изменяет микроструктуру.

Углерод в доэвтектоидной стали распределен между избыточным ферритом и перлитом. В феррите содержатся тысячные доли процента углерода, которыми можно пренебречь и считать, что практически весь углерод в доэвтектоидной стали находится в перлите. В перлите содержится 0,8 % С. В доэвтектоидной стали на перлит приходится только часть сплава, и содержание углерода в весовых процентах пропорционально площади шлифа, занимаемой перлитом. Эта пропорция вытекает из примерного равенства удельных весов феррита и перлита; в противном случае по микроструктуре можно было бы судить только об объёмном соотношении.

Содержание углерода в доэвтектоидной стали:

$$\% \text{ C} = 0,8 \cdot F_{\text{П}} / 100,$$

где $F_{\text{П}}$ – площадь, занятая перлитом (в %) в поле зрения микроскопа.

$F_{\text{П}}$ чаще всего оценивают на глаз. Такой метод может показаться слишком грубым; в действительности же он даёт хорошие результаты. Если абсолютная ошибка в оценке площади, занимаемой перлитом, составляет 10 %, то абсолютная ошибка в определении содержания углерода составляет всего 0,08 %.

Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Основные положения по теме работы.
3. Описание отдельных стадий выполнения работы с указанием используемого оборудования, с необходимыми пояснениями, цифровыми данными, зарисовками микроструктур и их описаниями.
4. Анализ полученных результатов, выводы.

Контрольные вопросы

1. Сколько углерода содержится в эвтектоидной стали?
2. Какую кристаллическую решётку имеют α - и γ -железо?
3. Что такое аустенит, феррит, перлит, цементит?
4. Назовите равновесные фазы в каждой области стальной части диаграммы.
5. Какие процессы протекают в процессе охлаждения стали при 727 °С?
6. Назовите максимальное содержание углерода в аустените.
7. Назовите максимальное содержание углерода в феррите.
8. Как влияет содержание углерода на свойства стали?

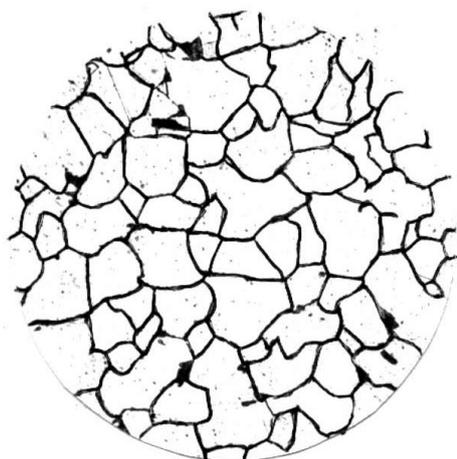


Рис.1

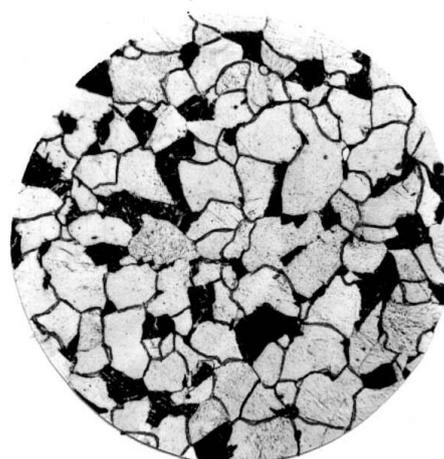


Рис.2



Рис.3



Рис.4



Рис.5

СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ЧУГУНОВ

Цель работы

1. Изучить основные разновидности чугунов, их строение, свойства и маркировку.
2. Познакомиться с основами выбора марки чугуна для изготовления деталей машин.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Коллекция шлифов чугунов.
2. Металлографические микроскопы.
3. Альбом фотографий микроструктур чугунов.

Порядок выполнения работы

1. Прочитайте внимательно основные сведения по теме работы, ознакомьтесь с классификацией чугунов, их строением, свойствами, областью применения каждой группы материалов.
2. Изучите чугунную часть диаграммы *железо – углерод*.
3. Изучите под микроскопом металлографические шлифы чугунов и зарисуйте их структуры. На рисунках обозначьте все структурные составляющие и определите, к какой группе относится каждый из изучаемых образцов чугуна.
4. Выполните задание по выбору материала для изготовления изделий.

Основные положения

Чугун – это железоуглеродистый сплав с содержанием углерода от 2,14 до 6 %. Кроме этих элементов, в чугуне содержится еще ряд примесей (кремний, марганец, сера, фосфор). С целью улучшения свойств в чугуны могут вводиться легирующие элементы, такие как хром, никель, медь и др.

Положительными свойствами чугунов являются хорошие литейные свойства (температура плавления ниже чем у стали, малая усадка, хорошая жидкотекучесть); хорошая обрабатываемость резанием (кроме одной разновидности – белого чугуна); достаточно высокая работоспособность в условиях трения; способность гасить (демпфировать) вибрации; низкая стоимость.

Недостатком чугуна являются его низкие пластические свойства и ударная вязкость, что препятствует использованию чугуна для изготовления деталей, работающих при значительных динамических, ударных нагрузках, и делает невозможным использование обработки давлением (ковки, штамповки, прокатки) для изготовления чугунных изделий.

По структуре различают чугуны, в которых углерод находится в виде химического соединения с железом – цементита Fe_3C , и чугуны, в которых углерод, в основном, находится в свободном состоянии, в виде графита.

Первая разновидность называется **белым чугуном**. Структура белых чугунов описывается чугунной частью диаграммы *железо – углерод* (рис. 1).

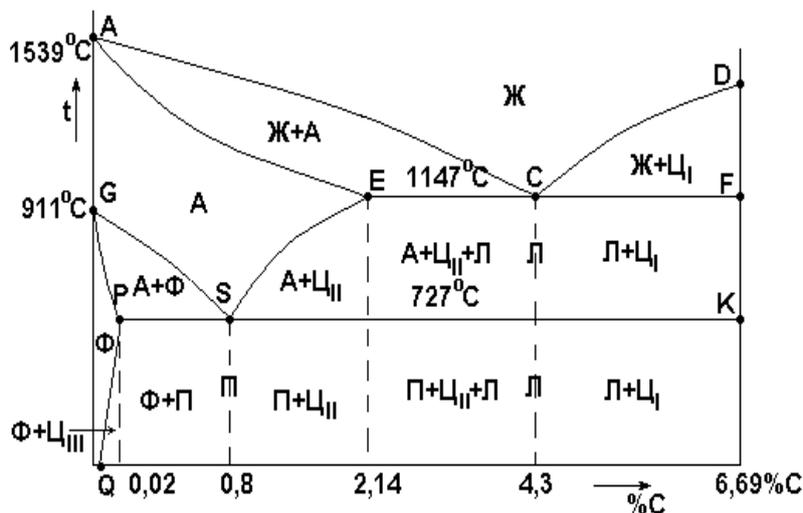


Рис. 1. Диаграмма состояния *железо – углерод*:
 Ж – жидкий раствор; А – аустенит (твёрдый раствор углерода в γ -Fe);
 Ц – цементит (Fe_3C); Ф – феррит (твёрдый раствор углерода в α -Fe);
 П – перлит (эвтектоидная смесь феррита и цементита);
 Л – ледебурит (эвтектическая смесь аустенита и цементита,
 ниже линии *PSK* – смесь перлита и цементита)

Согласно диаграмме, существует три разновидности белых чугунов: *доэвтектический* со структурой перлит, ледебурит и вторичный цементит, *эвтектический* со структурой ледебурит и *заэвтектический* со структурой ледебурит и первичный цементит (рис. 2).

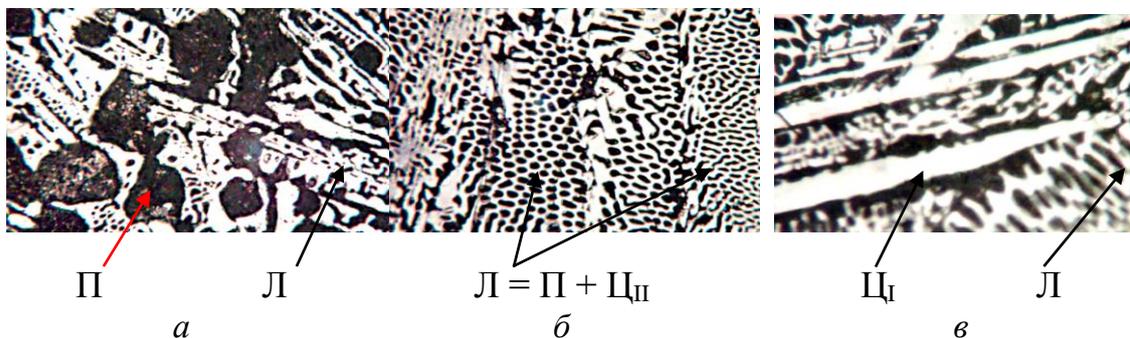


Рис. 2. Микроструктура белых чугунов:
a – доэвтектического; *б* – эвтектического; *в* – заэвтектического

Получают белый чугун при ускоренном охлаждении в процессе отливки деталей, заготовок. Способствует также получению этой разновидности чугуна повышенное содержание в нём хрома, марганца. Структура белого чугуна определяет его механические свойства: это твёрдый хрупкий материал, имеющий предел прочности при растяжении $\sigma_b = 100-400$ МПа (10-40 кг/мм²), твёрдость 300-700 *HV* и относительное удлинение $\delta = 0,1-0,2$ %. Вследствие низкой пластичности, белый чугун применяется очень редко, в основном, для изделий, работающих в условиях абразивного и гидроабразивного износа, когда его повышенная хрупкость не играет решающей роли.

В ряде случаев изготавливают детали с так называемой отбелённой поверхностью. Их поверхностный слой представляет собой белый чугун и имеет повы-

шенную твёрдость и износостойкость, а сердцевина имеет структуру другой разновидности чугуна (с наличием графита), что обеспечивает необходимый комплекс механических свойств. *Примеры таких изделий с отбелённой поверхностью: валки для холодной прокатки металла, шары для шаровых мельниц.*

Чугуны, в которых углерод находится в свободном виде, классифицируют по форме графитовых включений:

1. **Ковкий чугун** с хлопьевидными включениями графита.
2. **Серый чугун**. В нем содержится графит в виде пластинчатых включений.
3. **Высокопрочный чугун**, в котором графит имеет шаровидную форму.

Металлическая основа этих чугунов может быть *перлитной, ферритной* или *феррито-перлитной*. Структуры рассматриваемых чугунов схематично показаны на рис. 3. Поскольку графитовые включения отрицательно сказываются на механических свойствах металла, особенно на пластичности, то чем менее разветвлённую форму они имеют, тем меньше их отрицательное влияние. Самая неудачная, с точки зрения механических свойств, форма графита – пластинчатая (пластичность при этом самая низкая), а наиболее благоприятная – шаровидная форма включений, обеспечивающая максимальную пластичность (рис. 3). Это связано с тем, что графитовые включения играют роль трещин, пустот в чугуне и являются концентраторами напряжений. Чем более компактную форму имеют эти включения, тем более «мягкий» получается концентратор напряжений и тем меньше снижение механических свойств металла за счет графита.

Серый чугун получают при литье изделий, обеспечивая медленное охлаждение металла. Для графитизации углерода в расплав обязательно добавляется кремний. Изменяя содержание кремния от 0,5 % (перлитный чугун) до 5 % (ферритная металлическая основа), можно менять структуру и свойства серого чугуна. Маркируется он буквами СЧ, после которых ставится цифра, показывающая предел прочности при растяжении σ_b в кг/мм² (ГОСТ 1412-85). Например, СЧ 12 ($\sigma_b = 12$ кг/мм²). Применяется серый чугун для изготовления слабонагруженных деталей, работающих в лёгких условиях. *Например, корпуса редукторов, насосов, электродвигателей, различные крышки, отопительные батареи и т. п.*

Ковкий чугун получают из белого чугуна путем специального отжига. Это длительная (70–80 часов) термическая обработка, при которой белый чугун медленно нагревается до температур 950-1000 °С и после необходимой выдержки медленно охлаждается по определённому режиму. При таком отжиге происходит графитизация цементита, входящего в состав белого чугуна, с образованием хлопьевидных включений графита. Обозначается ковкий чугун буквами КЧ, после которых следуют цифры, показывающие предел прочности при растяжении σ_b в кг/мм² – первая цифра, и относительное удлинение δ в % – вторая цифра (ГОСТ 1215 в редакции 1992 г.). Например, КЧ 30–6 ($\sigma_b = 30$ кг/мм², $\delta = 6$ %). Применяется этот чугун для изготовления деталей, работающих в более тяжёлых условиях по сравнению с деталями из серого чугуна - при повышенных нагрузках, при знакопеременных и небольших ударных нагрузках. *Например, картеры редукторов, шестерни коробок передач автомобилей, кронштейны рессор, различные крюки, фланцы и т. п.*

Структура металлической основы (твердость)	Тип чугуна и форма графита		
	Серый с пластинчатым графитом	Ковкий с хлопьевидным графитом	Высокопрочный с шаровидным графитом
Перлит (250 НВ)			
Перлит и феррит (200 НВ)			
Феррит (150 НВ)			
δ , %	0,2-0,5	5-10	10-15

Рис. 3. Схемы микроструктур чугунов, содержащих графит

Высокопрочный чугун получают при выплавке серого чугуна путем его модифицирования магнием или церием в количестве 0,05–0,1 %. Модификаторы способствуют формированию шаровидных включений графита вместо пластинчатых. Обозначаются высокопрочные чугуны буквами ВЧ и цифрой, показывающей предел прочности при растяжении σ_B (ГОСТ 7293-85). Например, ВЧ 40 ($\sigma_B = 40 \text{ кг/мм}^2$). Применяется высокопрочный чугун для изготовления ответственных деталей, работающих в довольно сложных условиях при повышенном нагружении. Например, коленчатые и распределительные валы легковых автомобилей, прокатные валки, корпуса турбин, детали кузнечно-прессового оборудования.

Таблица 1

Марки и механические свойства чугунов

Марка чугуна	σ_B , МПа (кг/мм ²)	δ , %	НВ
СЧ 10	100 (10)	–	190
СЧ 15	150 (15)	–	210
СЧ 20	200 (20)	–	230
СЧ 35	350 (35)	–	275
КЧ 30–6	300 (30)	6	100-163
КЧ 35-10	350 (35)	10	100-163
КЧ 45-7	450 (45)	7	150-207
КЧ 60-3	600 (60)	3	200-269
ВЧ 35	350 (35)	22	140-170
ВЧ 40	400 (40)	15	140-202
ВЧ 50	500 (50)	7	153-245
ВЧ 70	700 (70)	2	228-302

Примечание: Для серых чугунов толщина стенки отливки 15 мм, для ковких чугунов размер отливки 16 мм.

Представляет интерес использование чугунов для деталей, работающих в специфических условиях (агрессивные среды, высокие или низкие температуры). Для этого в чугуны вводят легирующие элементы, способствующие повышению необходимых свойств. Такие чугуны называют *легированными* или чугунами специального назначения. Они дешевле легированных сталей и вследствие лучших литейных свойств оказываются предпочтительнее для получения отливок.

Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Краткая характеристика основных видов чугунов, особенности их строения и свойств.
3. Диаграмма *железо – углерод* с подробным рассмотрением ее чугунной части.
4. Рисунки структур чугунов, изученных под микроскопом, с подробными пояснениями структурных составляющих и типа чугуна.
5. Выбор материала для изделий по заданиям, данным преподавателем, с подробными пояснениями, анализом.

Контрольные вопросы

1. Сколько углерода содержится в чугуне?
2. Что происходит при кристаллизации белых чугунов при температуре 1147 °С?
3. Чем отличается структура серого чугуна от белого?
4. В чем отличие структуры серого и высокопрочного чугуна?
5. Какой чугун является самым прочным?
6. Какие графитные включения способствуют наибольшей пластичности?
7. Какие превращения происходят в процессе охлаждения белого эвтектического чугуна из жидкого состояния до комнатной температуры?
8. Какой из чугунов лучше всего обрабатывается резанием?
9. Какой чугун является самым твёрдым?
10. Как получить отливку из серого чугуна?
11. Как получить отливку из белого чугуна?
12. Как получают ковкий чугун?
13. Как получают высокопрочный чугун?
14. Назовите основные преимущества чугуна по сравнению со сталью.
15. Назовите основные недостатки чугуна по сравнению со сталью.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ЗАКАЛКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы

1. Изучить теоретические основы выбора температуры закалки углеродистых сталей.
2. Изучить влияние среды охлаждения (скорости охлаждения) на твёрдость стали при закалке.
3. Установить влияние содержания углерода в стали на результаты закалки.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Нагревательные печи с автоматическими приборами для регулирования температуры.
2. Баки с различными охлаждающими средами (вода, масло).
3. Твердомеры Роквелла с алмазными наконечниками.
4. Образцы углеродистых сталей с различным содержанием углерода.

Порядок выполнения работы

1. Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными теоретическими положениями.
2. Выполнить в соответствии с заданием экспериментальную часть.
3. Провести анализ полученных результатов и сделать необходимые выводы по результатам работы всей подгруппы.

Основные положения

Цель любого процесса *термической обработки* заключается в том, чтобы нагревом до определённой температуры, выдержкой и последующим охлаждением с определённой скоростью вызвать желаемое изменение структуры металла или сплава и, соответственно, изменение свойств. Следовательно, основными факторами воздействия при термической обработке являются температура, время выдержки и скорость последующего охлаждения.

В практике машиностроения различают первичную и вторичную термическую обработки. Назначение *первичной термической обработки* заключается в подготовке структуры к последующим операциям механической и окончательной термической обработки. К этому виду обработки относятся различные виды отжига и нормализации. Назначение *вторичной (окончательной) обработки* – получение необходимых эксплуатационных свойств деталей и изделий. К окончательной термической обработке относятся закалка и отпуск.

Цель закалки конструкционных и инструментальных сталей – достижение *максимально высокой твёрдости и прочности*. Сущность *закалки* заключается в получении пересыщенного твёрдого раствора. Пересыщение твёрдого раствора вызывает искажения кристаллической решётки, которые приводят к появлению дислокаций, компенсирующих эти искажения. Высокая плотность дислокаций за-

трудняет пластическую деформацию в металле и повышает его прочность и твёрдость.

Закалка применима к сплавам, в которых могут образовываться ограниченные твёрдые растворы. При нагреве таких сплавов увеличивается растворимость компонентов. Если охлаждать сплав с большой скоростью, не оставляя времени на диффузию, то в процессе охлаждения выделение избыточных атомов растворённого компонента не произойдет. Тогда при комнатных температурах зафиксирован пересыщенный твёрдый раствор. Еще большее пересыщение может быть получено в сплавах, которые испытывают полиморфные превращения при нагреве и охлаждении. Наибольший эффект при закалке наблюдается в железоуглеродистых сплавах – сталях. Аустенит (твёрдый раствор углерода в γ -железе) может растворить углерода в сотню раз больше, чем феррит (твёрдый раствор углерода в α -железе). Поэтому, если нагревать сталь выше температур перестройки решётки и охлаждать, не давая углероду возможности выделяться из аустенита, то при обратной перестройке решётки возникает очень большое пересыщение α -железа атомами углерода которое и вызывает значительное изменение свойств стали.

Скорость охлаждения, при которой углерод не успевает выделяться из твёрдого раствора, называется **критической скоростью охлаждения**. Для каждой стали она может быть определена по диаграмме изотермического превращения переохлаждённого аустенита. Такая диаграмма для стали с 0,8 % углерода представлена на рис. 1. Геометрически критическая скорость охлаждения $V_{кр}$ является касательной к первой С-образной кривой, которая показывает начало превращения аустенита в феррито-карбидную смесь.

Для углеродистых сталей время до начала распада аустенита очень мало ($\tau_{инк} = 0,5 \div 1,0$ с), и критическая скорость достигается только при охлаждении в воде или в водных растворах солей.

При очень малой скорости охлаждения (V_1) аустенит будет превращаться в **перлит** (грубая смесь кристаллов феррита и цементита). С увеличением скорости охлаждения (V_2 и V_3) число центров зарождения феррита и цементита увеличивается и размеры кристаллов этих фаз уменьшаются. Более **дисперсные** (мелкозернистые) структуры – **сорбит**, **троостит** – имеют более высокую твёрдость, чем перлит. При скорости охлаждения больше $V_{кр}$ превращение аустенита в смесь феррита и цементита произойти не может, так как скорость диффузии углерода при температурах ниже 200 °С очень мала. Однако γ -решётка должна перестроиться в α -решётку, обладающую меньшим запасом энергии при низких температурах. Образуется пересыщенный твёрдый раствор углерода в α -железе. Решётка железа сильно искажается, становится тетрагональной, а не кубической. Возникает большое количество дислокаций и других дефектов. Поэтому сплав имеет высокую твёрдость и прочность, но очень низкую пластичность. Такая структура носит название мартенсит.

Мартенсит - это пересыщенный твёрдый раствор углерода в тетрагональной решётке α -железа.

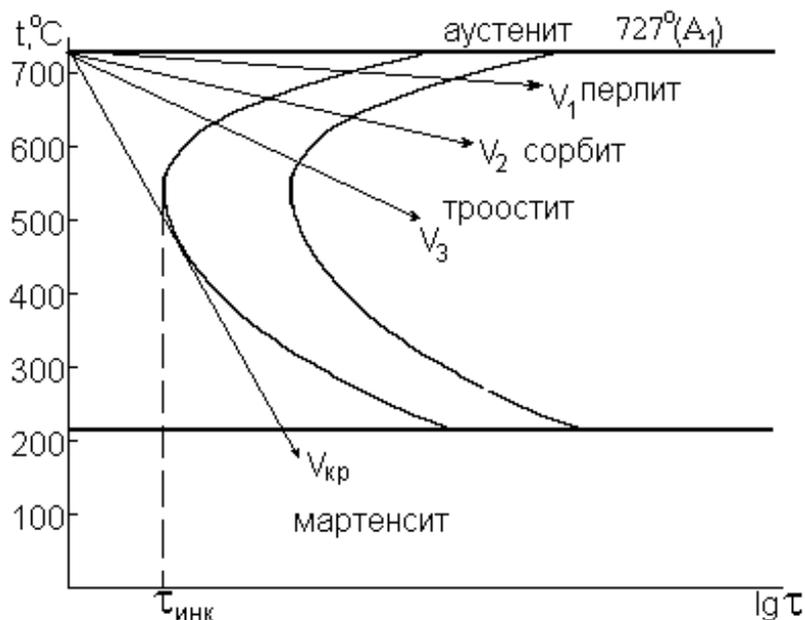


Рис. 1. Диаграмма изотермического распада переохлаждённого аустенита эвтектоидной стали

Основным фактором, определяющим твёрдость и прочность мартенсита, являются искажения кристаллической решётки α -железа, вызванные внедрёнными атомами углерода. Чем больше содержание углерода в мартенсите, тем больше **тетрагональность** решётки и выше твёрдость мартенсита (рис. 2).

Исходными условиями выбора температуры закалки являются требуемые свойства, которые должна обеспечить закалённая сталь.

Конструкционная сталь (<0,8 % C) применяется для изготовления деталей машин, механизмов и различного рода конструкций. Стали после закалки должны обладать высокими прочностными свойствами, особенно высокой усталостной прочностью, так как детали машин и механизмов испытывают сложные знакопеременные нагрузки.

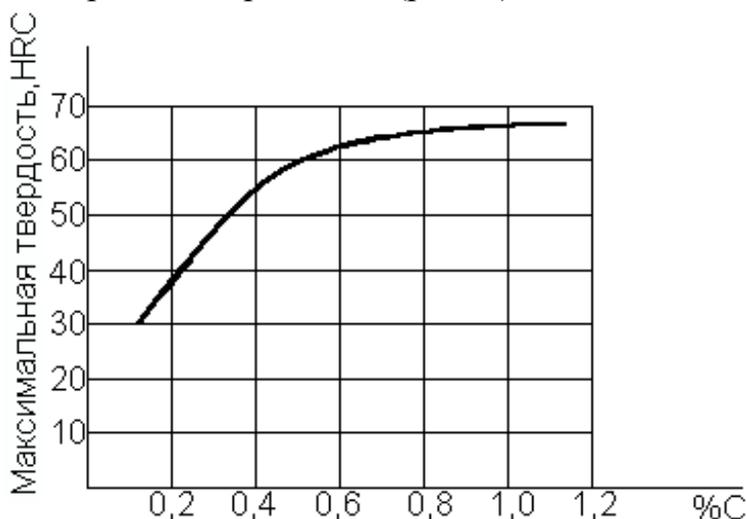


Рис. 2. Твёрдость мартенсита в зависимости от содержания углерода

На рис. 3 представлена левая (так называемая «стальная» часть диаграммы *железо – цементит*). С помощью диаграммы проследим за превращениями, происходящими при нагреве сталей.

При нагреве выше линии *PSK* (или критической температуры A_{c1}), но ниже *GS* (критическая температура A_{c3}) структура стали будет состоять из зёрен аустенита и феррита.

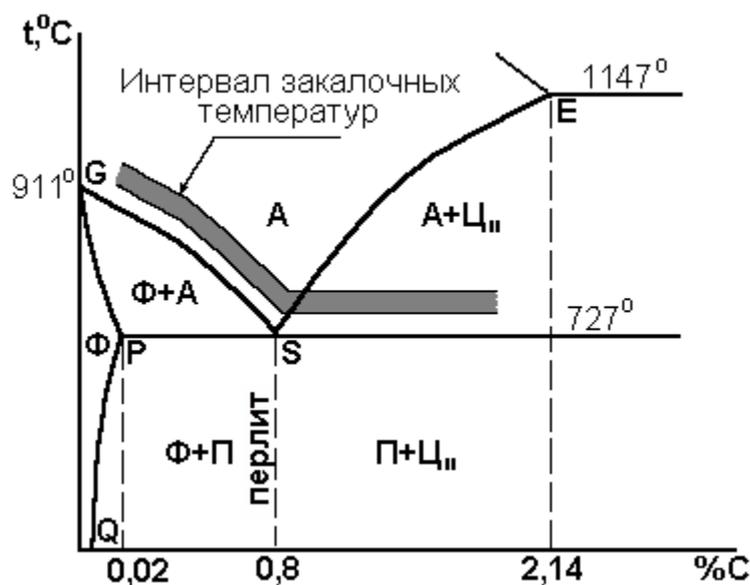


Рис. 3. «Стальная» часть диаграммы Fe – Fe₃C

При последующем охлаждении со скоростью, равной или больше критической, аустенит превратится в мартенсит, а феррит превращений не испытывает. После такой закалки структура будет состоять из очень твёрдых кристаллов мартенсита и мягких, пластичных кристаллов феррита. Отсюда низкая твёрдость и прочность, а главное – низкая усталостная (циклическая) прочность стали. Следовательно, такая закалка не обеспечит высокие эксплуатационные свойства конструкционных сталей.

Если при закалке нагреть доэвтектоидную сталь выше линии GS (A_{c3}), то произойдет превращение феррита и перлита в аустенит. Последующее охлаждение с критической скоростью позволит получить однородный мартенсит, характеризующийся высокой прочностью и значительной усталостной прочностью.

Большое влияние на свойства стали после закалки оказывает температура нагрева и время выдержки при этой температуре. Чем выше температура нагрева и длительнее выдержка при этой температуре, тем интенсивнее происходит рост аустенитных зёрен. Рост зерна при нагреве вызывается стремлением сплава к уменьшению поверхностной энергии зёрен. Из крупнозернистого аустенита после охлаждения получатся крупные кристаллы мартенсита (крупноигльчатый мартенсит). Это приведет к высокой хрупкости стали.

Следовательно, **для доэвтектоидных (конструкционных) сталей температура закалки должна быть выше точки A_{c3} (линии GS),** однако это превышение не должно быть большим.

Для получения оптимальных свойств после закалки необходимо производить нагрев до температуры, определяемой эмпирической формулой:

$$t_{\text{зак. доэвт.}} = A_{c3} + (30 \div 50) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Все заэвтектоидные стали – инструментальные. Материалы, идущие на изготовление инструментов (особенно режущих), должны обеспечивать высокие твёрдость и износостойкость, высокую прочность. Эти свойства получают в

ущерб пластичности стали, в противном случае инструмент не будет обладать высокими режущими свойствами.

При нагреве выше линии SK (A_{c1}) превращение претерпевает лишь перлит (рис. 3), а цементит не успевает раствориться в аустените. После нагрева до этих температур структура стали – аустенит и цементит. При охлаждении со скоростью больше критической получается структура, состоящая из твёрдых и износостойких кристаллов мартенсита и кристаллов цементита, имеющих еще бóльшую твёрдость и износостойкость. Нагрев до более высоких температур (выше линии SE , или точки A_{cm}) не приведёт к повышению твёрдости; но резко увеличится размер зёрен аустенита (так как кристаллы цементита растворятся и уже не будут сдерживать их рост), что отрицательно скажется на механических свойствах.

Следовательно, **для заэвтектоидных (инструментальных) сталей температура закалки должна быть выше точки A_{c1} (линии SK).**

Нагрев под закалку инструментальных сталей осуществляется до температур:

$$t_{\text{зак. заэвт.}} = A_{c1} + (30 \div 50) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Область оптимальных температур нагрева сталей под закалку представлена на рис. 3.

Методические указания по выполнению работы

Студенты получают образцы различных марок углеродистых сталей. Для группы студентов в 2–3 человека преподаватель указывает конкретные марки стали для проведения экспериментов (например, стали марок 20; 45; У8; У12).

Студенты определяют содержание углерода в стали по обозначению марки. Зная содержание углерода, выбирают по диаграмме состояния системы *железо – цементит* оптимальную температуру закалки для данной стали.

Исходя из температуры нагрева и размеров образцов, студентам необходимо выбрать время нагрева образцов в печи.

Время нагрева стали под закалку складывается из времени прогрева образца до заданной температуры и времени выдержки при температуре закалки. Длительность выдержки при температуре закалки определяется временем, необходимым для превращения исходной структуры в аустенит. Общее время нагрева под закалку можно определить по данным табл. 1, в которой приведены нормы нагрева стали при термической обработке в лабораторных электрических печах.

Скорость охлаждения, обеспечивающая получение структуры мартенсита, определяется экспериментально. Наиболее распространёнными охлаждающими средами в термических цехах являются вода и водные растворы солей и щелочей, минеральные масла, возможно применение в качестве охлаждающей среды воздуха (спокойного или циркулирующего). Охлаждая образцы, нагретые до температур закалки в различных средах, определяют оптимальную среду охлаждения. Образцы, получившие в результате нагрева и охлаждения структуру мартенсита (твёрдость стали соответствует значению на рис. 2), являются закалёнными. Образцы, не получившие максимально возможной твёрдости для данной стали, закалёнными не являются.

*Нормы времени нагрева стальных заготовок
в лабораторных электрических печах*

Температура нагрева, °С	Форма детали		
	Круг	Квадрат	Пластина
	Продолжительность нагрева в минутах		
	На 1 мм диаметра	На 1 мм толщины	
600	2,0	3,0	4,0
700	1,5	2,2	3,0
800	1,0	1,5	2,0
900	0,8	1,2	1,6
1000	0,4	0,6	0,8

Кроме того, в ходе данной лабораторной работы готовятся закалённые образцы для проведения следующей лабораторной работы – «Отпуск закалённой углеродистой стали». Производится закалка 3–4 образцов одной марки стали, которые будут подвергнуты на следующем занятии отпуску при различных температурах.

Все результаты проведённого эксперимента сводятся в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента: твёрдость сталей после охлаждения

№ п/п	Марка стали	Режим закалки			Твёрдость, <i>HRC</i>	Струк- тура
		Темпе- ратура нагрева, °С	Время нагрева, мин.	Среда охлажде- ния, °С/с		

По результатам работы студенты строят следующие графики:

а) зависимость твёрдости стали от скорости охлаждения (принимая скорость охлаждения: в воде – 600 °С/с, в масле – 150 °С/с, на воздухе – 30 °С/с);

б) зависимость твёрдости закалённой стали от содержания углерода.

Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Краткие сведения о выборе оптимальных температур закалки и скорости охлаждения углеродистых сталей.
3. Таблица с данными по твёрдости сталей до и после термообработки, графики по результатам работы.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. В каком температурном интервале образуется сорбит при изотермическом превращении аустенита?
2. К чему приводит повышение температуры нагрева доэвтектоидной стали под закалку от $(Ac_1 + 50^\circ)$ до $(Ac_3 + 50^\circ)$?
3. Почему мартенсит имеет тетрагональную решётку?
4. С какой целью проводят закалку стали?
5. Чем отличается перлит от сорбита и троостита?
6. От чего зависит степень дисперсности (размер зерна) продуктов перлитного превращения?
8. От чего зависит температура нагрева стали под закалку?
9. Чем отличается мартенсит от аустенита, из которого он образовался?
10. Чем отличается структура стали У12 после закалки с температуры $(Ac_1 + 50^\circ)$ от структуры после закалки с температуры $(Ac_{cm} + 50^\circ)$?
11. Как влияет повышение содержания углерода в доэвтектоидной стали на температуру нагрева стали под закалку?
12. Что является обязательным результатом закалки?
13. Каков механизм перлитного превращения?
14. От чего зависит *закаливаемость* стали (твёрдость после закалки)?
15. Как называется пересыщенный твёрдый раствор углерода в α -железе?
16. Как изменяются свойства закалённой стали при увеличении содержания углерода до 0,8 %?
17. Чем объясняется высокая твёрдость и прочность закалённой стали?
18. Объясните, почему для конструкционных сталей не применяют закалку от температур несколько выше Ac_1 .
19. Почему при закалке необходимо охлаждать сталь со скоростью выше критической?
20. Что такое критическая скорость охлаждения?
21. Чем объясняется устойчивость и неустойчивость аустенита в различных температурных интервалах?
22. Каков механизм мартенситного превращения?

ОТПУСК ЗАКАЛЁННОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель работы

1. Ознакомиться с процессами, происходящими при отпуске закалённой стали.
2. Изучить влияние температуры нагрева закалённой стали на твёрдость.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Нагревательные печи с автоматическими приборами регулирования температуры;
2. Твердомеры Роквелла с алмазными наконечниками;
3. Закаленные образцы углеродистых конструкционных и инструментальных сталей.

Порядок выполнения работы

1. Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными теоретическими положениями.
2. Выполнить в соответствии с заданием экспериментальную часть.
3. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы по результатам работы всей подгруппы.

Основные положения

Как было установлено в лабораторной работе «Закалка углеродистых сталей», закалённые стали имеют высокие твёрдость и прочность, но очень низкие пластические свойства. То есть, сталь в закалённом состоянии очень хрупка и ненадежна в эксплуатации. Причиной высокой твёрдости и хрупкости является пересыщение твёрдого раствора на основе α -Fe углеродом, искажение его кристаллической решётки и появление дислокаций, компенсирующих эти искажения. Для изменения таких свойств стали применяют следующую **обязательную** операцию термообработки – отпуск. **Отпуск** – это нагрев закалённой стали ниже критических температур, с целью придания стали **необходимых эксплуатационных свойств** и уменьшения внутренних напряжений после закалки.

Пересыщенный твёрдый раствор углерода в α -Fe (*мартенсит*) обладает большим запасом свободной энергии и поэтому не является стабильным. Следовательно, в закалённой стали должны протекать процессы, приводящие систему к более устойчивому состоянию, т. е. углерод должен выделяться из решётки мартенсита. Эти процессы идут и при комнатной температуре, но с бесконечно малой скоростью. При нагреве закалённой стали скорость диффузии увеличивается: чем выше температура, тем выше подвижность атомов углерода. Таким образом, происходит распад пересыщенного твёрдого раствора с образованием равновесных фаз: карбидов и феррита. Рассмотрим последовательно этапы распада мартенсита при нагреве.

При нагреве до 150 °С скорость распада мартенсита ввиду малой подвижности атомов настолько мала, что заметных изменений в строении закалённой стали не наблюдается даже с применением весьма точных методов исследования.

При более высоких температурах нагрева (180–250 °С) начинается выделение углерода из решётки мартенсита и образование очень мелких карбидов, связанных с мартенситом. Частичное уменьшение концентрации углерода в твёрдом растворе снижает тетрагональность решётки мартенсита, поэтому твёрдость и прочность стали должны уменьшаться. Однако образующиеся очень мелкие карбиды оказывают сопротивление движению дислокаций под действием приложенных нагрузок, поэтому прочность почти не снижается.

Процесс распада мартенсита завершается при нагреве до температур 400–450 °С. Чем выше температура, тем более интенсивно происходит распад, так как скорость диффузии углерода из твёрдого раствора возрастает. Мартенсит превращается в мягкий феррит, карбиды немного укрупняются, однако всё ещё остаются мелкими и являются препятствием для движения дислокаций. Сталь с такой структурой имеет высокие прочностные и пластические характеристики, особенно высокий предел текучести.

При температурах выше 500–550 °С идет процесс укрупнения частиц карбидов, они приобретают округлую форму. Первый процесс называется *коагуляцией*, второй – *сфероидизацией*. Структура будет состоять из зёрен феррита и крупных, сферической формы, карбидов. Сталь обладает высокой вязкостью и высокими пластическими свойствами при достаточной прочности.

В зависимости от процессов, происходящих при отпуске, и от изменений структуры и свойств (рис. 1) различают три вида отпуска:

- 1) низкотемпературный отпуск – от 160 до 250 °С;
- 2) среднетемпературный отпуск – от 300 до 450 °С;
- 3) высокотемпературный отпуск – от 500 до 650 °С.

Низкий (низкотемпературный) отпуск применяется для деталей, от которых требуются **высокие твёрдость и износостойкость**. Низкий отпуск назначается для повышения вязкости и пластичности стали без заметного снижения твёрдости. Этот отпуск применяется, в основном, для режущих и мерительных инструментов. При таком отпуске получается структура, состоящая из менее напряжённого, чем после закалки, мартенсита и очень мелких карбидов. Такая структура называется **мартенсит отпуска**.

Средний (среднетемпературный) отпуск применяется для изделий, от которых требуются **высокие упругие свойства**. Мелкие кристаллы цементита игольчатой формы, образующиеся при таком отпуске, являются большим препятствием для дислокаций, что обеспечивает высокую упругость и прочность стали. В результате отпуска сильно повышается предел текучести стали и незначительно снижается предел прочности. Структура, получаемая при среднем отпуске, называется **троостит отпуска**. Она состоит из мелких зёрен феррита и игольчатых кристаллов цементита. Такому отпуску подвергают пружины, рессоры, торсионы и другие детали, которые работают при знакопеременных нагрузках и должны быстро восстанавливать свою форму после деформации. Обычно для изготовления упругих элементов используют стали с содержанием углерода от 0,5 до 0,7 %,

как углеродистые, так и легированные. Эти конструкционные стали выделены в особую группу *рессорно-пружинных сталей*.

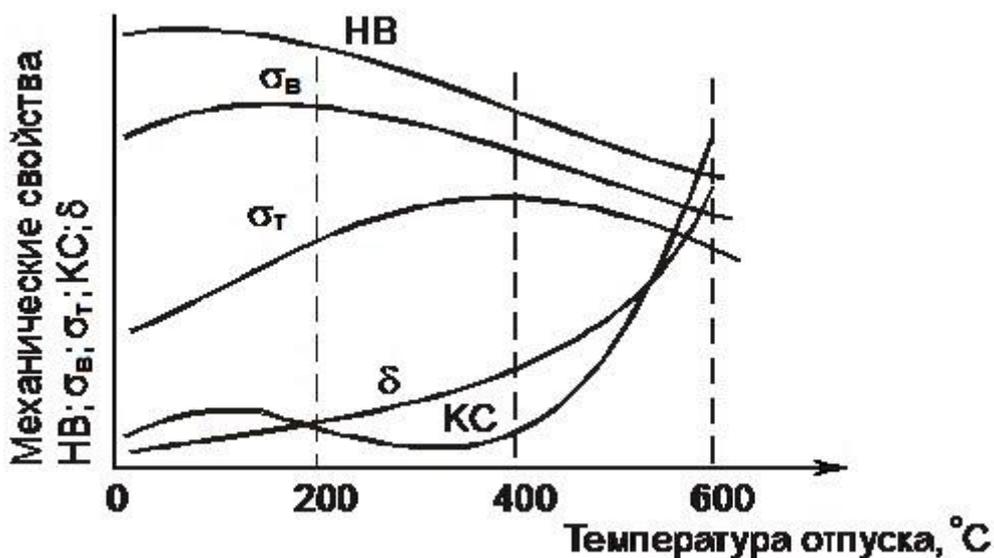


Рис. 1. Влияние температуры отпуска на механические свойства закалённой углеродистой стали

Высокий (высокотемпературный) отпуск применяют для *ответственных деталей машин с высокой надёжностью*, испытывающих при эксплуатации сложные виды нагружения: статические, ударные и знакопеременные нагрузки. Структура после высокого отпуска состоит из более крупных зёрен феррита и довольно крупных кристаллов цементита округлой формы и называется *сорбит отпуска*. Высокий отпуск обеспечивает максимальную пластичность и ударную вязкость в сочетании с достаточной прочностью.

Закалка в сочетании с высоким отпуском носит название *улучшение*. Такому виду обработки подвергается особая группа конструкционных сталей, носящая название *улучшаемые стали*. Они могут быть углеродистыми и легированными, содержание углерода от 0,3 до 0,5 %. Улучшение конструкционных сталей позволяет повысить конструкционную прочность деталей (понижить чувствительность к надрезам и перекосам, к переходам от одного сечения детали к другому, к изменению размеров детали и т. д.).

Влияние температуры отпуска на механические свойства закалённой углеродистой стали представлено на рис. 1.

В табл. 1 приведены данные о влиянии термической обработки на механические свойства конструкционной углеродистой стали с 0,45 % углерода в отожжённом состоянии, а также после закалки и отпуска при 300 °С (средний отпуск) и при 600 °С (высокий отпуск).

Данные табл. 1 говорят о том, что сталь в улучшенном состоянии имеет более высокие характеристики прочности ($\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{\text{т}}$), пластичности (δ , ψ) и вязкости (KCU) по сравнению со сталью в отожжённом состоянии. Отсюда и возникло название «улучшение» – механические характеристики стали улучшаются.

Таблица 1

Механические свойства стали с 0,45 % С после термической обработки

Термическая обработка	Механические свойства				
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	Ψ , %	KCU , Дж/см ²
Отжиг при 850 °С	650	450	20	6	60
Закалка с 850 °С в воде и отпуск при 300 °С	1080	890	10	52	75
Закалка с 850 °С в воде и отпуск при 600 °С	750	520	17	68	160

Кроме того, из табл. 1 видно, что после среднетемпературного отпуска закалённая конструкционная сталь приобретает весьма высокие предел прочности (σ_B) и условный предел текучести (σ_T) при хороших характеристиках пластичности (δ , Ψ) и ударной вязкости (KCU).

Методические указания по выполнению работы

1. Закалённые в ходе предыдущей лабораторной работы («Закалка углеродистой стали») образцы различных марок углеродистых сталей подвергнуть отпуску при температурах 200, 400 и 600 °С.
2. Исходной структурой стали перед отпуском должен быть мартенсит, поэтому отпускать необходимо только закалённые в воде образцы.
3. Время отпуска принять равным 0,5 часа. Охлаждение после отпуска производить на воздухе.
4. Замерить твёрдость образцов после отпуска на приборе Роквелла, результаты внести в табл. 2.
5. По результатам замеров построить графики зависимости твёрдости HRC от температуры отпуска для всех исследованных сталей.
6. Сделать выводы.

Таблица 2

Результаты эксперимента: твёрдость отпущенных сталей

№ п/п	Марка стали	Твёрдость после закалки, HRC	t отпус-ка, °С	Время нагрева и выдержки τ , мин.	Твёрдость после отпуска, HRC	Структура

Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Краткие сведения о превращениях при нагреве закалённой стали.
3. Таблица с данными по режимам отпуска, твёрдости и структуре исследуемых сталей до и после отпуска.

4. Графики изменения твёрдости закаленной стали в зависимости от температуры отпуска.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое отпуск?
2. После какого вида термической обработки производится отпуск?
3. С какой целью проводится отпуск?
4. К каким видам изделий применяется низкотемпературный отпуск?
5. К каким видам изделий применяется среднетемпературный отпуск?
6. К каким видам изделий применяется высокотемпературный отпуск?
7. Какие процессы протекают в структуре стали при отпуске?
8. Что представляет собой структура мартенсит отпуска?
9. Что такое троостит отпуска?
10. Что такое сорбит отпуска?
11. С каким процессом при отпуске связано уменьшение напряжений в стали?
12. В каком температурном интервале отпуска наиболее интенсивно протекают процессы сфероидизации и коагуляции цементита?
13. Как изменяются свойства закалённой стали с ростом температуры отпуска?
14. Какая структура образуется при отпуске до 200 °С?
15. Какая структура образуется при отпуске до 400 °С?
16. Какая структура образуется при отпуске до 600 °С?
17. Чем отличается сорбит отпуска от троостита отпуска?
18. Как изменяется прочность стали σ_B при отпуске до 600 °С?
19. Как изменяется предел текучести σ_T при отпуске до 400 °С?
20. Как изменяются характеристики пластичности δ и Ψ при отпуске до 600 °С?
21. Какую операцию необходимо выполнить, если при отпуске получены более низкие твёрдость *HRC* и прочность σ_B , чем требовалось?
22. Какую операцию необходимо выполнить, если при отпуске получили более высокие твёрдость *HRC* и прочность σ_B , чем требовалось?
23. Какую температуру отпуска выбрать для изделий, от которых требуются высокие упругие свойства?
24. Какую температуру отпуска надо выбрать для изделий, от которых требуются высокие твёрдость и износостойкость?
25. Что произойдет в структуре стали, если после отпуска при 600 °С произвести дополнительный отпуск при 200 °С?

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Лабораторная работа №1</i>	
Пластическая деформация, наклёп и рекристаллизация металлов	3
<i>Лабораторная работа №2.1</i>	
Микроструктура углеродистых сталей	11
<i>Лабораторная работа №2.2</i>	
Структура, свойства и применение чугунов	17
<i>Лабораторная работа №3</i>	
Закалка углеродистых сталей	22
<i>Лабораторная работа №4</i>	
Отпуск закалённой углеродистой стали	29

Учебное издание

ЕГОРОВ Юрий Петрович
ЛОЗИНСКИЙ Юрий Михайлович
МАРР Евгений Иосифович
РООТ Раиса Васильевна
ХВОРОВА Ирина Александровна
ЕВТЮШКИН Юрий Александрович
БАГИНСКИЙ Андрей Геннадьевич
БЕЗБОРОДОВ Валерий Павлович
КОВАЛЕВСКАЯ Жанна Геннадьевна
УТЬЕВ Олег Михайлович

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Научный редактор кандидат физико-математических наук,
доцент Е.П. Чинков

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати . Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 5,99. Уч.-изд.л. 5,42.
Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru