

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИДО

С.И. Качин

«___» _____ 2012 г.

КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов ИДО, обучающихся по направлению
140400 «Электроэнергетика и электротехника»

Составители

Ю.П. Егоров, К.Г. Герасимович

Издательство

Томского политехнического университета

2012

УДК 620.18:669.14.018.252:548.53

Конструктивное материаловедение: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов ИДО, обучающихся по напр. 140400 «Электроэнергетика и электротехника» / сост. Егоров Ю.П., К.Г. Герасимович; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 21 с.

Методические указания к выполнению лабораторных работ рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры материаловедения и технологии металлов «___» _____ 2012 года, протокол № ____.

Зав. кафедрой МТМ,
доцент, кандидат техн. наук _____ А.Г.Мельников

Аннотация

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Конструктивное материаловедение» предназначены для студентов ИДО, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника». Лабораторные работы выполняются во втором семестре.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, НАКЛЕП 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 в соответствии с заданием 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.

Пластическая деформация металлов

Важнейшим и наиболее характерным свойством металлов является **пластичность** – способность претерпевать большую деформацию без разрушения. В сочетании с высокой прочностью это свойство делает металлы незаменимыми для современной техники. Если деформация металлов исчезает после снятия нагрузки, то это **упругая деформация**, а если остается, то это **пластическая деформация**.

При упругом деформировании под действием внешней силы изменяется расстояние между атомами в кристаллической решетке. Снятие нагрузки устраняет причину изменения межатомного расстояния, атомы становятся на прежние места, и деформация исчезает.

Значительно более сложный процесс представляет собой пластическое деформирование, которое осуществляется при напряжениях, больших предела упругости металла.

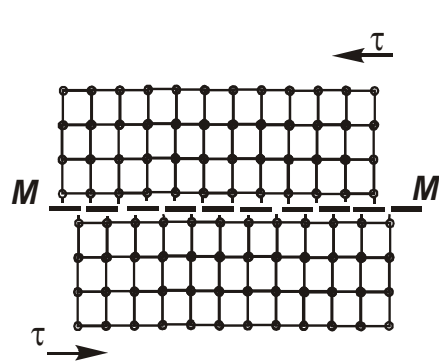


Рис. 1

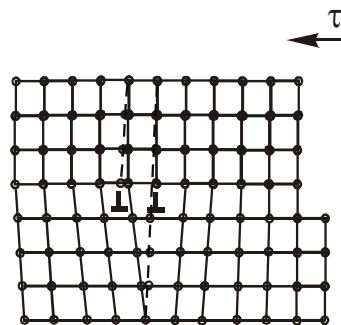
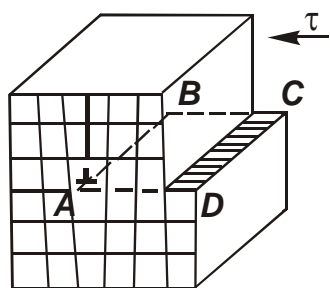
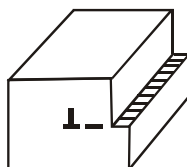


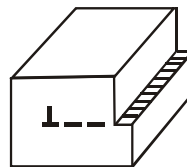
Рис. 5



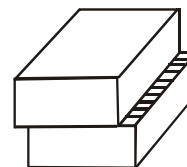
а



б

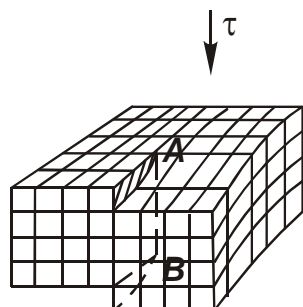


в

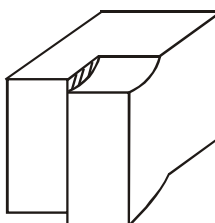


г

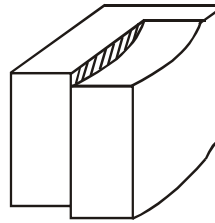
Рис. 2



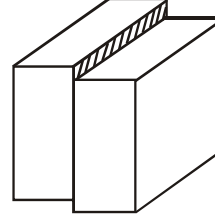
а



б

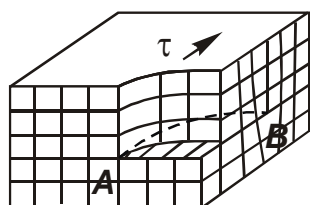


в

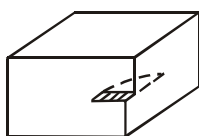


г

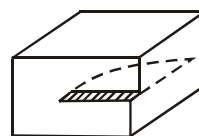
Рис. 3



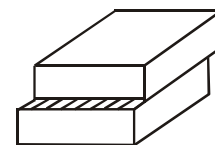
а



б



в



г

Рис. 4

В конечном итоге пластическая деформация представляет собой сдвиг одной части кристалла относительно другой. Каков же механизм пластического сдвига? Естественно предположить одновременное смещение всех атомов одного слоя по отношению к атомам соседнего слоя по плоскости сдвига ММ (рис. 1), – так скользят бумажные листы в пачке бумаги при сдвиге ее верхней части. Усилие, которое надо приложить для осуществления такого сдвига, можно подсчитать и определить таким образом теоретическую прочность. Такой расчет 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 решетки. Представления о дислокациях были введены в металлофизику для того, чтобы объяснить несоответствие между наблюдаемой и теоретической прочностью и описать атомный механизм скольжения 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, а). Если сдвиг произошел только в части плоскости скольжения и охватывает площадку ABCD, то граница АВ между участком, где скольжение уже произошло, и ненарушенным участком в плоскости скольжения и будет дислокацией. Атомная плоскость, перпендикулярная к плоскости скольжения и проходящая через АВ, является как бы лишней и ее называют **экстраплоскостью**, а дислокацию АВ – **краевой дислокацией**, обозначаемой знаком \perp . Возможны и другие виды дислокаций, например, **винтовая** (рис. 3, а) или **смешанная** (рис. 4, а). Винтовая дислокация получила свое название из-за того, что кристалл при этом можно рассматривать состоящим из одной атомной плоскости, закрученной по винтовой поверхности вокруг дислокации АВ (рис. 3, а). Нетрудно видеть, как движение дислокаций через кристалл вызывает остаточную деформацию кристалла (рис. 2-4 б, в, г). Перемещение дислокаций происходит по схеме, изображенной на рис. 5, из которого видно, что при перемещении дислокации на одно межатомное расстояние каждый атом экстраплоскости и плоскости в нижней части кристалла перемещается на значительно меньшую величину. При поочередном, эстафетном перемещении атомов на

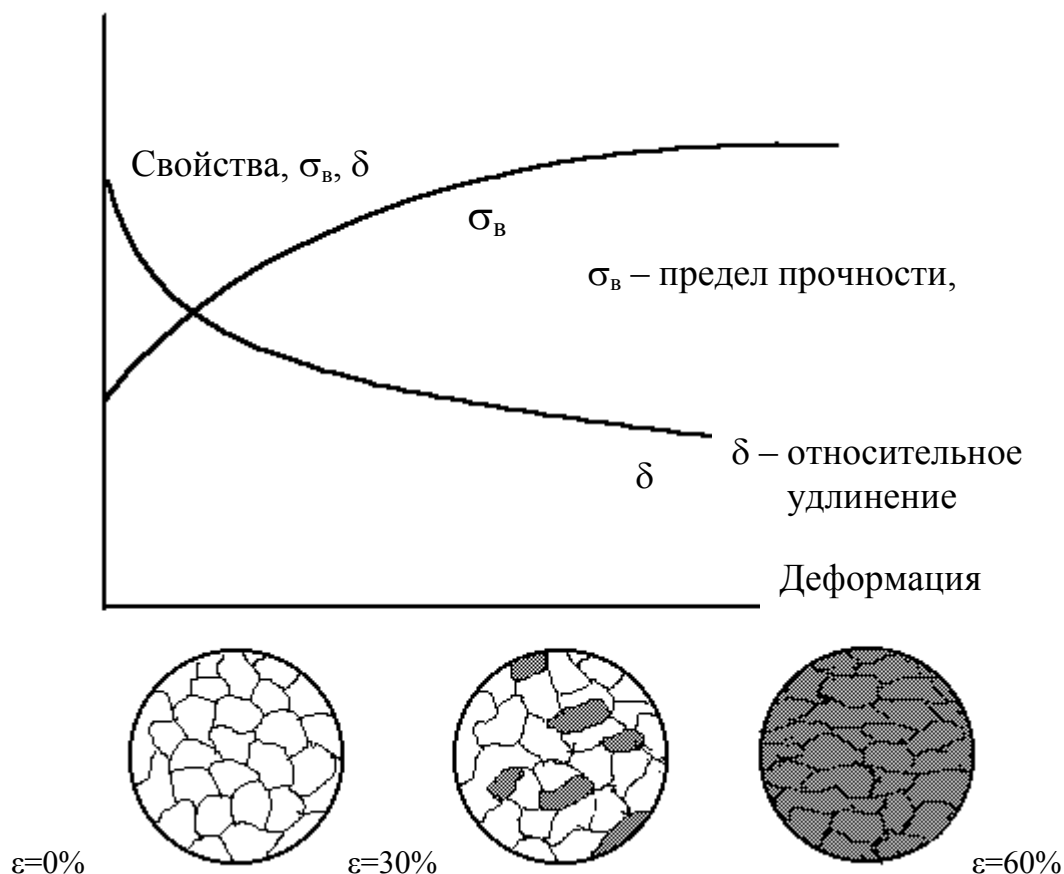


Рис. 6. Изменение структуры и свойств деформированного металла в зависимости от степени деформации

расстояния меньше межатомного, дислокация скользит на большие расстояния через весь кристалл. Если **при одновременном сдвиге** верхней части кристалла по отношению к нижней необходимо преодолеть межатомные связи между всеми граничными атомами по обе стороны от плоскости скольжения (см. рис. 1), то **при перемещении дислокации** в соседнее положение разрываются межатомные связи только между двумя цепочками атомов (рис. 5). Именно этим объясняется низкое опытное значение кристаллического скалывающего напряжения.

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.

Наклеп и рекристаллизация металлов

Наиболее впечатляющим свойством металлов при пластической деформации является деформационное упрочнение, или способность металлов становиться прочнее при деформации. Из дислокационной теории следует, что для упрочнения металлов необходимо каким-либо образом затруднить движение дислокаций. Существует несколько способов закрепления дислокаций, один из которых является деформационным. Ранее рассмотренное простейшее введение дислокации в

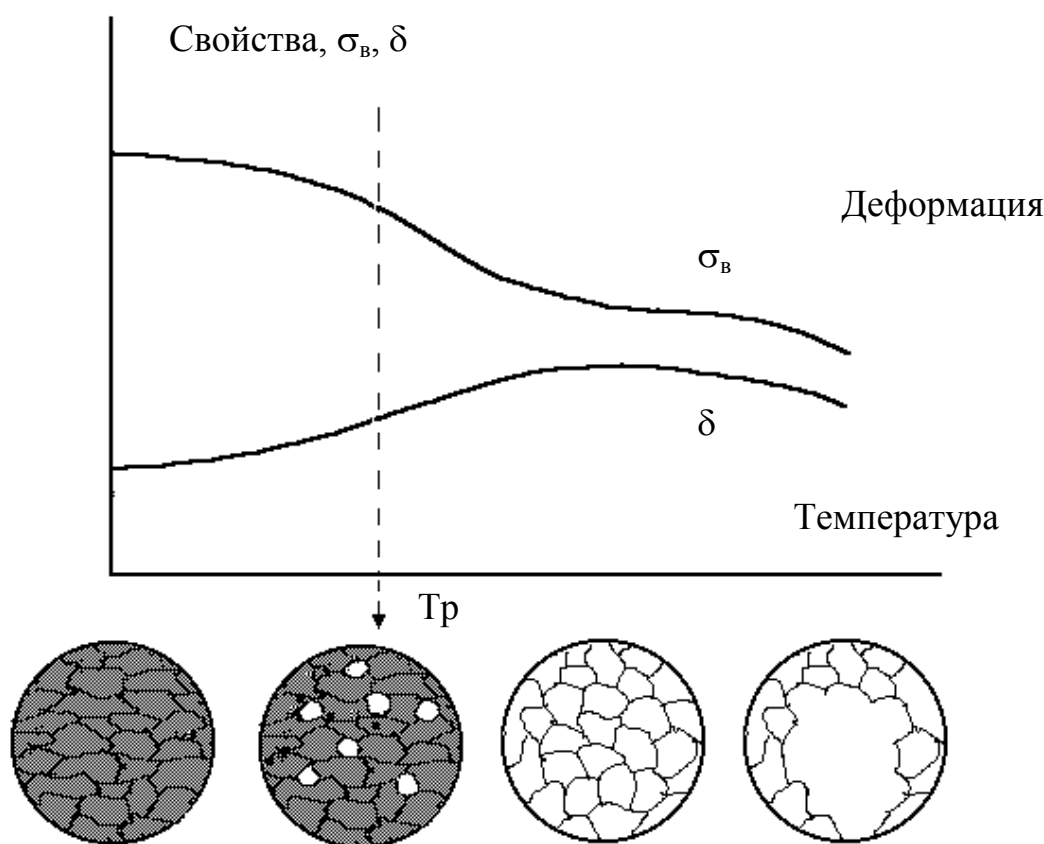


Рис. 7. Изменение структуры и свойств деформированного металла при нагреве

кристалл при сдвиге показывает, что пластическая деформация увеличивает количество дислокаций в кристалле. Чем сильнее воздействие на металл, тем больше в нем образуется дислокаций. На начальной стадии деформация происходит за счет скольжения относительно небольшого количества дислокаций. В процессе деформирования они движутся через кристалл и могут закрепляться различными препятствиями. Такие закрепленные дислокации сами затрудняют движение

вновь возникших дислокаций, т.е. создается упрочнение самими дислокациями. В этом случае говорят об упрочнении деформацией или просто о **наклепе** металла. Пластическая деформация оказывает существенное влияние на механические свойства металла и его структуру (рис. 6).

На рис. 6 показано, как под действием приложенной нагрузки зерна, из которых состоят все технические металлы, начинают деформироваться и вытягиваться, сохраняя свой объем. Это структурно неустойчивое состояние. Кроме того, внутри каждого зерна и по его границам сосредотачивается большое количество дислокаций, плотность которых возрастает с 10^6 - 10^7 см⁻² для недеформированного металла до 10^{10} - 10^{12} см⁻² для деформированного. То есть, кристаллическая решетка зерен становится искаженной, несовершенной. С увеличением степени деформации наклеп увеличивается, а пластичность уменьшается, что приводит при большой степени деформации к возникновению трещин и разрушению.

Для снятия наклепа деформируемый металл нагревают, в результате происходят процессы перераспределения и уменьшения концентрации структурных несовершенств: *возврата*, *полигонизации* и *рекристаллизации*. Заключительным и сильно действующим процессом, переводящим наклепанный металл в устойчивое состояние, является **рекристаллизация** – процесс полной или частичной замены деформированных зерен данной фазы другими, более совершенными зернами той же фазы (рис. 7). Рекристаллизация заключается в зарождении новых, более совершенных зерен и их росте за счет менее совершенных, т.е. рекристаллизация является диффузионным процессом, протекающим во времени.

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:

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

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

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

Температуру начала рекристаллизации определяют металлографическим и рентгеноструктурным методами, а также по изменению свойств. Если T_p определяют по изменению твердости, то за T_p прини-

мают температуру, при которой прирост твердости, созданный деформацией, уменьшается вдвое (см. рис. 8).

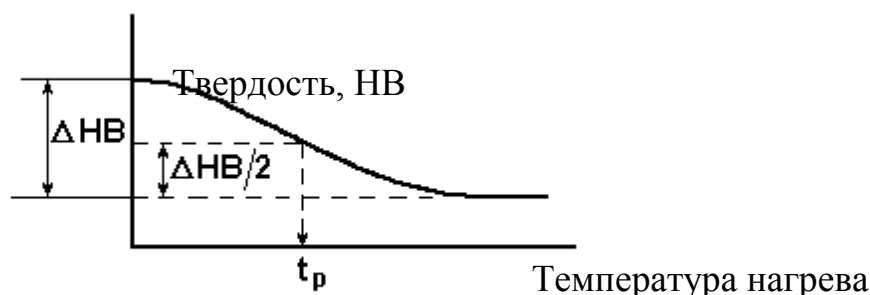


Рис. 8. Определение температуры рекристаллизации по изменению твердости при нагреве

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

Величина рекристаллизованных зерен (зерен после рекристаллизационного отжига) очень сильно зависит от степени деформации (рис. 9).

Существует небольшая степень деформации (до 10 %), называемая критической, при которой размер образующегося рекристаллизованного зерна в несколько десятков раз превышает исходное, недеформированное зерно. Это явление повсеместно встречается в технике, где деформация изменяется от 0 и до больших степеней, и его следует учитывать т.к. в некоторых случаях укрупнение зерна нежелательно (сильно снижается ударная вязкость), а в других благоприятно (получение требуемых электромагнитных свойств, повышение жаропрочности).

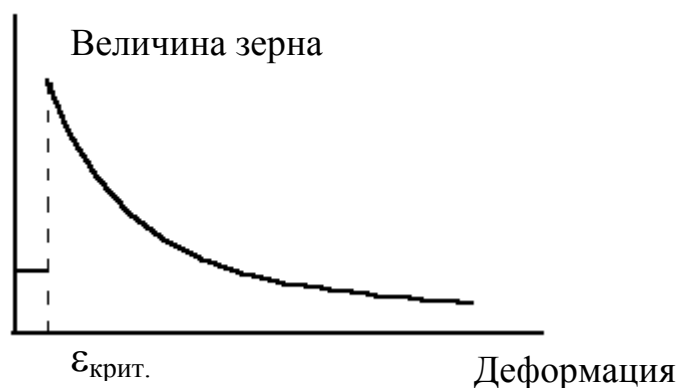


Рис. 9. Влияние степени деформации на величину рекристаллизованного зерна

Рекристаллизация в области критической степени деформации обусловлена объединением групп зерен в одно. С увеличением степени деформации величина рекристаллизованного зерна уменьшается, что связано с увеличением центров рекристаллизации.

По температуре рекристаллизации различают холодную и горячую пластическую деформацию металлов.

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

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

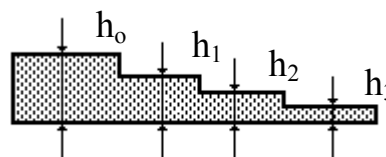
Задания для выполнения работы (для подгруппы 2-4 человека)

1. Для образцов меди, деформированных на 30-40 %, определить температуру рекристаллизации меди по изменению твердости после нагрева на различную температуру (по графической зависимости «твердость – 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. Температура плавления меди 1083 °С. Сравните теоретическую температуру рекристаллизации меди с определенной в работе и объясните причину различия.

2. Провести холодную деформацию образцов технически чистой меди на различную степень деформации и определить изменение твердости 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 твердости от степени деформации.

Таблица 1

N п/п	Исходная толщина h_0 , мм	Конечная толщина h_k , мм	Степень дефор- мации ϵ , %	Твердость, НВ	Примечание

3. Провести горячую деформацию образцов технически чистой меди на различную степень деформации и определить изменение твердости горячедеформированных образцов в зависимости от степени деформации. Результаты измерений внести в таблицу 1 и построить графическую зависимость твердости от степени горячей деформации.

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

Задачи

1) Объясните старинный цирковой номер: почему согнутую силой подкову предлагалось разогнуть зрителям, а не наоборот?

2) Детали из низкоуглеродистой стали, полученные штамповкой в холодном состоянии, имели после штамповки неодинаковую твердость в различных участках: она колебалась от 120 НВ до 200 НВ. Твердость стали до штамповки составляла 100 НВ. Объяснить, почему сталь получила неодинаковую твердость.

3) Объяснить, можно ли отличить по микроструктуре металл, деформированный в холодном состоянии, от металла, деформированного в горячем состоянии, и указать, в чем заключается различие микроструктуры.

4) Три образца низкоуглеродистой стали подвергались холодной деформации: первый на 5%, второй на 15%, третий на 30%, а затем нагревались до 700 °С. Указать, в каком образце сформируется более крупное зерно и как влияет рост зерна на свойства стали.

5) Объяснить, почему при горячей обработке давлением не рекомендуется проводить последнюю операцию с малой степенью обжатия и как может такая деформация влиять на величину зерна и свойства металла.

6) Объяснить, можно ли создать значительное упрочнение свинца, если его подвергнуть деформации при комнатной температуре.

($t_{пл} \text{ Pb} = 327,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.)

7) Указать, как повлияет на значение твердости, определенной, например, шариком по Бринеллю, повторное измерение на участке, в непосредственной близости от него.

8) Волочение проволоки проводят в несколько переходов. Если волочение выполняют без промежуточных операций отжига, то проволока на последних переходах дает разрывы. Объяснить причины разрывов и указать меры для предупреждения этого.

9) Пруток латуни после изгиба в холодном состоянии подвергают рекристаллизации для снятия наклепа. Указать, будет ли пруток после рекристаллизации иметь одинаковые по размеру зерна по всему сечению.

10) Объяснить, к какому виду деформации – холодной или горячей – надо отнести:

- прокатку олова при комнатной температуре ($t_{пл} \text{ Sn} = 232 \text{ }^{\circ}\text{C}$);
- деформацию стали при $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($t_{пл} \text{ стали} = 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Содержание отчета

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения: учебное пособие для студентов вузов. – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для студентов высших технических учебных заведений. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
3. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.М. Материаловедение: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы

1. Изучение теоретических основ закалки и отпуска углеродистых сталей.
2. Изучение влияния содержания углерода в стали на результаты закалки.
3. Изучение влияния среды охлаждения (скорости охлаждения) на твердость стали при закалке.
4. Изучение влияния температуры отпуска на твердость стали.

Оборудование и материалы для выполнения работы:

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

Основные теоретические положения

Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру, а, следовательно, и свойства сплава является термическая обработка. Термическая обработка представляет собой совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения с целью изменения внутреннего строения сплава и получения требуемых свойств. Основными видами термической обработки являются отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг и нормализация применяются для устранения дефектов предыдущих технологических операций (обработки давлением, литья, сварки) и для подготовки структуры и свойств материала для последующих технологических операций (для улучшения обрабатываемости давлением, резанием, окончательной термической обработки). Нагрев при *отжиге*, в зависимости от назначения, может быть ниже или выше критических температур (температур, соответствующих фазовым превращениям). Характерным является *медленное охлаждение вместе с печью*. В результате отжига частично или полностью устраняется химическая неоднородность, уменьшаются внутренние напряжения, измельчается зерно, повышаются пластичность и вязкость, снижаются прочность и твердость, улучшается обрабатываемость резанием.

При **нормализации** сталь нагревают до *аустенитного* состояния (на $30\div 50$ °С выше линии **GSE** по диаграмме Fe-Fe₃C), выдерживают для прогрева по всему сечению деталей и завершения фазовых превращений и *охлаждают на воздухе*. В результате устраняется крупнозернистая структура, эвтектоид приобретает более тонкое строение, в заэвтектоидных сталях устраняется грубая сетка цементита. Это приводит к улучшению обрабатываемости резанием и штампуемости стали, повышению сопротивления хрупкому разрушению. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига как более экономичную операцию. Прочность и твердость нормализованной средне- и высокоуглеродистой стали выше по сравнению с отожженной. Нормализацию чаще применяют как промежуточную операцию, улучшающую структуру, но иногда, при получении удовлетворительных механических свойств, – как окончательную. Например, нормализации подвергают крупногабаритные стальные отливки для улучшения свойств, а также сортовой прокат – рельсы, швеллеры, трубы и т. д.

Закалка стали – термическая обработка, заключающаяся в нагреве выше температур фазовых превращений, выдержке для завершения превращения и достаточно быстром охлаждении с целью подавить диффузионные процессы. При этом получается пересыщенный твердый

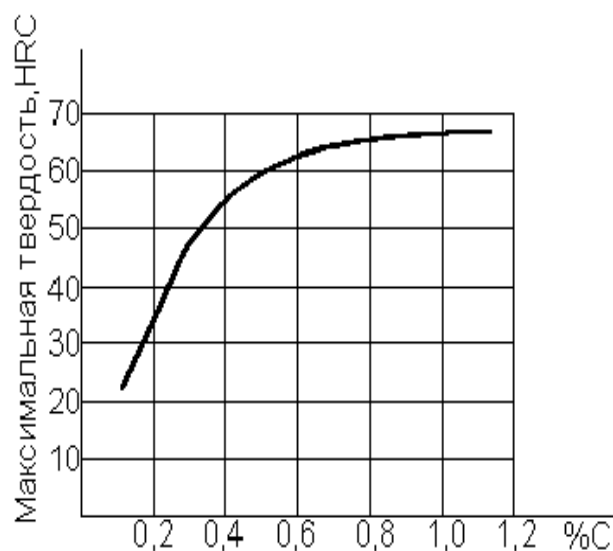


Рис. 1. Твердость мартенсита в зависимости от содержания углерода

раствор углерода в Fe_α – *мартенсит*. Цель закалки стали – получение максимальной прочности и твердости. Пересыщение твердого раствора вызывает сильные искажения кристаллической решетки, которые приводят к большим напряжениям и появлению дислокаций. Чем больше углерода в мартенсите, тем сильнее искажения кристаллической решетки, больше плотность дислокаций, поэтому выше прочность и твердость стали (рис. 1), но ниже пластичность.

Выбор температуры нагрева под закалку проводят по диаграмме железо-цементит (рис. 2). Для доэвтектоидных (конструкционных) сталей температура закалки долж-

на быть выше точки Ac_3 (линии GS), но это превышение не должно быть большим:

$$t_{\text{зак. доэвт.}} = Ac_3 + (30 \div 50) ^\circ\text{C}.$$

При таком нагреве произойдет превращение феррита и перлита в аустенит (т. е. полная перекристаллизация). Последующее охлаждение со скоростью не ниже критической позволит получить однородный мартенсит. Превышение оптимальной температуры вызывает рост аустенитных зерен. Из крупнозернистого аустенита получатся крупные кристаллы мартенсита с повышенной хрупкостью. Этот вид дефекта называют *перегревом*. Перегрев можно исправить повторным нагревом до оптимальной температуры $Ac_3 + (30 \div 50) ^\circ\text{C}$, при котором происходит полная перекристаллизация.

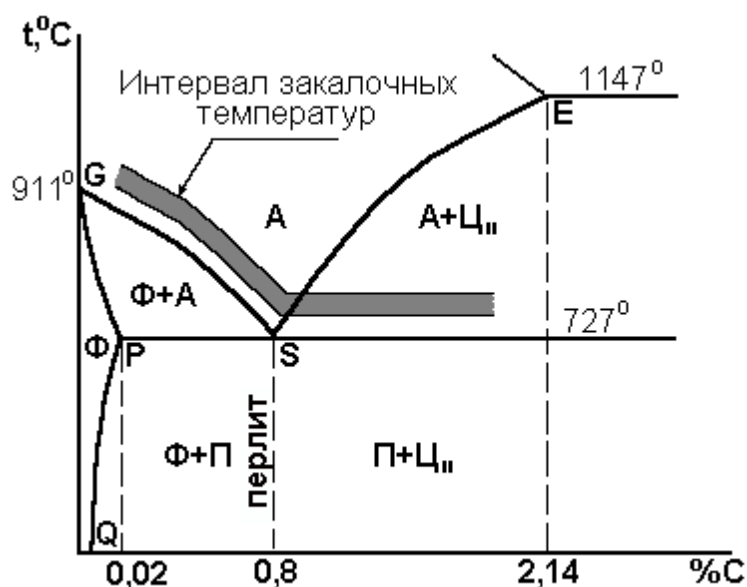


Рис. 2. Диаграмма состояния Fe-Fe₃C с интервалом закалочных температур для до- и заэвтектоидных сталей

Нагрев под закалку заэвтектоидных (инструментальных) сталей осуществляется до температур:

$$t_{\text{зак. заэвт.}} = Ac_1 + (30 \div 50) ^\circ\text{C}.$$

После нагрева до этих температур структура стали – аустенит и цементит (т. е. происходит неполная перекристаллизация). При охлаждении со скоростью больше критической получается структура, состоящая из твердых и износостойких кристаллов мартенсита и кристаллов

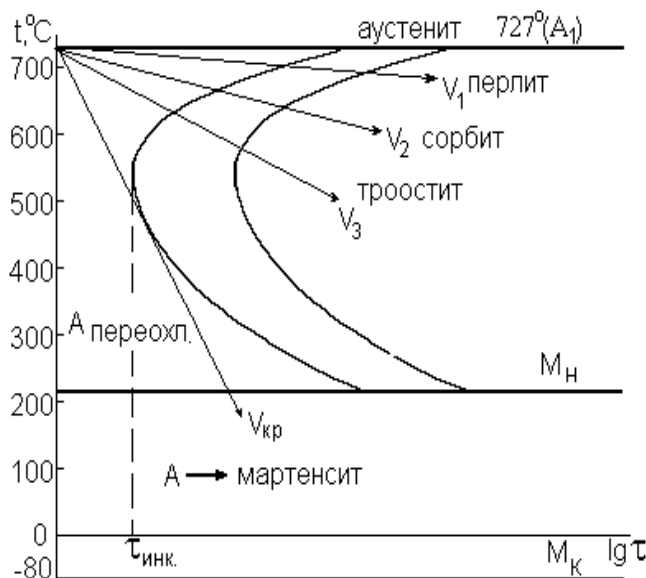


Рис. 3. Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали с 0,8 % C

цементита, имеющих еще большую твердость и износостойкость. Нагрев до более высоких температур не приведет к повышению твердости, но резко увеличит размер зерен аустенита, что отрицательно скажется на механических свойствах. Область оптимальных температур нагрева сталей под закалку представлена на рис. 2 (заштрихована).

Минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается до температуры т. M_H и превращается в мартенсит, называется *критической*

скоростью заковки $V_{кр}$. Ее можно определить по диаграмме изотермического превращения переохлажденного аустенита для каждой стали. Геометрически это – касательная к кривой начала диффузионного превращения аустенита в феррито-цементитную смесь. На рис. 3 представлена диаграмма изотермического превращения (или С-образная диаграмма) для стали с 0,8 % углерода. Для углеродистых сталей время до начала диффузионного распада аустенита $\tau_{инк}$ очень мало (0,5÷1 с), и критическая скорость достигается только при охлаждении в воде или в водных растворах солей. При охлаждении стали со скоростью, большей критической ($V > V_{кр}$), превращение начинается при температуре начала мартенситного превращения M_H и заканчивается при температуре окончания мартенситного превращения M_K . При меньших скоростях охлаждения, аустенит будет превращаться в феррито-цементитную смесь пластинчатого строения, которая, в зависимости от межпластиночного расстояния называется перлит, сорбит или троостит. При малой скорости охлаждения (V_I) аустенит будет превращаться в перлит (грубая смесь кристаллов феррита и цементита). С увеличением скоро-

сти охлаждения (V_2 и V_3) число центров зарождения феррита и цементита увеличивается, и размеры кристаллов этих фаз уменьшаются. Более *дисперсные*, т. е. мелкозернистые, структуры (сорбит и троостит), имеют более высокую твердость, чем перлит.

Отпуск – это нагрев закаленной стали до температур ниже критических с целью придания стали требуемых эксплуатационных свойств.

Пересыщенный твердый раствор углерода в α -Fe (*мартенсит*) обладает большим запасом свободной энергии, и поэтому не является стабильным. Следовательно, в закаленной стали должны протекать процессы, приводящие систему к более устойчивому состоянию, т. е. углерод должен выделяться из решетки мартенсита. При нагреве скорость диффузии увеличивается, и чем выше температура, тем выше подвижность атомов углерода. Таким образом, происходит распад пересыщенного твердого раствора с образованием равновесных фаз: карбидов и феррита.

Различают три вида отпуска:

- 1) низкотемпературный отпуск – от 160 до 200 °C;
- 2) среднетемпературный отпуск – от 350 до 450 °C;
- 3) высокотемпературный отпуск – от 500 до 600 °C.

Температуру отпуска выбирают, исходя из требуемых эксплуатационных свойств конкретной детали (рис. 4).

Низкий (низкотемпературный) отпуск применяется для деталей, от которых требуются высокая твердость и износостойкость. Низкий отпуск назначается для повышения вязкости и пластичности стали без заметного снижения твердости. При таком отпуске происходит частичное выделение углерода из мартенсита в виде очень мелких карбидов Fe_3C (т.е. мартенсит становится менее напряженным). Такая структура называется *мартенсит отпуска*. При этом происходит уменьшение внутренних напряжений. Этот отпуск применяется, в основном, для режущих и мерительных инструментов, после цементации.

Средний (среднетемпературный) отпуск применяется для изделий, от которых требуется высокие упругие свойства. При температуре отпуска весь избыточный углерод выделяется из Fe_α в виде мелких кристаллов цементита

игольчатой формы (т.е. мартенсит распадается на феррито-цементитную смесь). Такая феррито-цементитная смесь, в которой цементит имеет мелкоигольчатую форму, называется *троостит отпуска*. В результате резко уменьшается хрупкость, снижается предел прочности, но сильно повышается предел упругости. 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.

Высокий (высокотемпературный) отпуск применяют для ответственных деталей машин, испытывающих при эксплуатации сложные виды нагружения: статические, ударные и знакопеременные нагрузки. Структура после высокого отпуска состоит из феррита и довольно крупных кристаллов цементита округлой формы и называется *сорбит отпуска*. Высокий отпуск обеспечивает наилучшее сочетание прочности, пластичности и ударной вязкости, полное снятие напряжений.

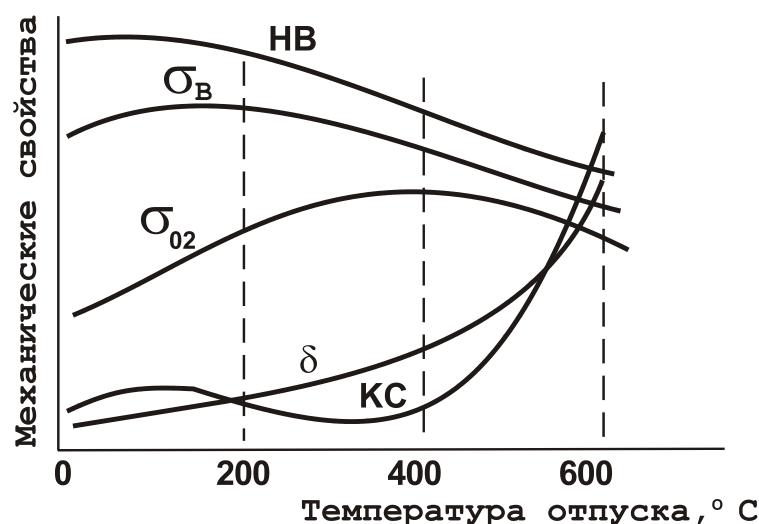


Рис. 4. Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной углеродистой стали

Закалка в сочетании с высоким отпуском носит название *улучшение*. Такому виду обработки подвергается особая группа конструкционных сталей (с содержанием углерода от 0,3 до 0,5%), носящая название *улучшаемые стали*. Сталь в улучшенном состоянии имеет более высокие характеристики прочности (σ_b и $\sigma_{0,2}$), пластичности (δ , Ψ) и вязкости (KCU) по сравнению со сталью в отожженном состоянии. Отсюда и возникло название «улучшение» — механические характеристики стали улучшаются.

Задания для выполнения работы

1. Определить содержание углерода в стали по обозначению марки и выбрать по диаграмме состояния системы «железо-цементит» оптимальную температуру закали для данной стали.

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

3. Определить экспериментально скорость охлаждения, обеспечивающую получение структуры мартенсита. Для этого охладить образцы, нагретые до температур закали, в различных средах: в воде, в минеральном масле и на спокойном воздухе и измерить твердость по Роквеллу. Результаты проведенного эксперимента внести в табл. 1.

Таблица 1

Марка стали	Режим закали			Твердость, HRC	Структура
	Температура нагрева, °C	Время нагрева, мин.	Охлаждающая среда и $V_{охл}$, °C/c		
ВСт3			вода, 600 °C/c		
Сталь 45			вода, 600 °C/c		
У12			вода, 600 °C/c масло, 150°C/c воздух, 30°C/c		

4. По результатам работы построить графики:

а) зависимость твердости закаленной стали от содержания углерода в стали;

б) зависимость твердости закаленной стали У12 от скорости охлаждения.

5. Закаленные образцы различных марок углеродистых сталей подвергнуть отпуску при температурах 200, 400 и 600 °C. Время отпуска принять равным 0,5 часа. Охлаждение после отпуска производить на воздухе.

6. Замерить твердость образцов после отпуска на приборе Роквелла, результаты внести в табл. 2.

Таблица 2

Марка стали	Твердость после закали, HRC	t отпуска, °C	Время нагрева и выдержки τ , мин.	Твердость после отпуска, HRC	Структура
-------------	-----------------------------	---------------	--	------------------------------	-----------

7. По результатам замеров построить графики зависимости твердости от температуры отпуска для всех исследованных сталей.
8. Сделать выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для студентов высших технических учебных заведений. – М.: Металлургия, 1986.- 542 с.
2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.Л. Материаловедение: учебник для студентов машиностроительных специальностей ВУЗов. – М.: Машиностроение, 1990. – 492 с.
3. Материаловедение: учебник для студентов высших технических учебных заведений/ Б.И. Арзамасов, И.И. Сидорин и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 383 с.
4. Материаловедение: учебное пособие / Ю.П. Егоров, Ю.М. Лозинский, И.А. Хворова, Р.В. Роот.– Томск: Изд. ТПУ, 1999.– 160 с.

Учебное издание

КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Составители

ЕГОРОВ Юрий Петрович
ГЕРАСИМОВИЧ Константин Георгиевич

Рецензент

*кандидат технических наук,
доцент кафедры МТМ ИФВТ*

А.Г.Мельников

Редактор *С.В. Ульянова*

Компьютерная верстка *Т.И. Тарасенко*

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

Подписано к печати . Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать Хероx. Усл.печ.л. 1,22. Уч.-изд.л. 1,11

Заказ . Тираж 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