

Практическое занятие

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

1 Цель работы

1.1 Изучить теоретические основы кристаллизации металлов, изменение структуры и свойства металлов при пластической деформации.

1.2 Рассмотреть влияние температуры нагрева на структуру и свойства холоднодеформированных металлов и сплавов.

2 Основные сведения

Все металлы и их сплавы являются кристаллическими телами, основным признаком которых является расположение ионов (атомов) в определенном порядке. По современным представлениям, металл - это каркас (решетка), состоящая из положительно заряженных ионов (или атомов) и перемещающихся между ними электронов. Электроны принадлежат не одному какому-нибудь атому, а являются "коллективизированными", принадлежащими многим атомам. Кристаллические решетки разных металлов различаются по форме и размерам, от этого зависят их свойства.

Процесс кристаллизации расплавленного металла протекает одновременно из очень большого количества центров кристаллизации. Поэтому застывший металл состоит не из одного кристалла, а из множества кристаллов, называемых кристаллитами, или зёрнами.

Кристаллиты отличаются от идеальных кристаллов своей произвольной формой наружной поверхности в силу взаимного соприкосновения их при росте из расплава. Но внутри кристаллита кристаллическая решетка соблюдается.

Обработка металла давлением ведет к изменению формы каждого отдельно взятого кристаллита (зерна). При этом зерна дробятся, металл получает мелкозернистое строение. В то же время зерна вытягиваются в направлении деформации, создается определенная кристаллографическая ориентировка зерен (текстура). Кристаллическая решетка металла искажается.

Изменение внутреннего строения металла ведет к изменению его свойств. С увеличением степени деформации возрастают прочностные свойства и снижается пластичность, увеличиваются твердость и электросопротивление, уменьшаются сопротивление коррозии и теплопроводность.

Изменение свойств металла, вызванное деформацией, называется деформационным упрочнением металла или наклепом.

Наличие металлической связи придает металлу способность к пластической деформации и к самоупрочнению в результате пластической деформации. Приложение к материалу напряжения (нагрузки) вызывает деформацию.

Деформацией называется изменение размеров и (или) формы тела под действием внешних сил или физико-механических процессов, протекающих в самом теле (перепад температур, фазовые превращения и т.и.). Деформация тела сопровождается относительным смещением атомов из положения равновесия. Свойства недеформированного и пластически деформированного металла различны.

Различают упругую и пластическую деформацию (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 - Диаграмма деформации

Упругой деформацией называют деформацию, влияние которой на форму, структуру и свойства тела исчезают после снятия нагрузки, которая не вызывает заметных остаточных изменений в структуре и свойствах металла.

Степень деформации, %

Свойство металлов деформироваться без разрушения под действием внешних сил и сохранять измененную форму после снятия этих сил называется пластичностью.

При возрастающей нагрузке выше определенной величины деформация становится необратимой. При снятии нагрузки исчезает лишь упругая составляющая деформации, часть же деформации, которую называют пластической, остается. При пластической деформации необратимо изменяется структура металла, а следовательно* и его свойства.

В поликристаллических телах пластическая деформация может осуществляться как путем перемещений внутри зерна (внутризеренная), так и смещения зёрен относительно друг друга (межзёренная).

В основе протекания пластической деформации лежит явление зарождения и движения дислокаций (линейных структурных дефектов) под действием касательных напряжений путем сдвига (скольжения) отдельных частей кри-

сталла относительно друг друга по плоскостям с наиболее плотным расположением атомов (рисунок 3.2). В металлах с ОЦК решеткой сдвиг происходит по диагональным плоскостям (110) в направлении пространственных диагоналей (111) (могут быть и другие плоскости скольжения).

Пластическая деформация поликристаллических тел происходит весьма неоднородно. Это объясняется двумя обстоятельствами:

а) различной ориентацией кристаллов относительно приложенной силы, что приводит к неодновременности деформации разных зёрен;

б) наличием границ зёрен и неметаллических включений, препятствующих перемещению дислокаций и вызывающих их локальное скопление.

Пластическая деформация в основном характеризуется скольжением и двойникованием.

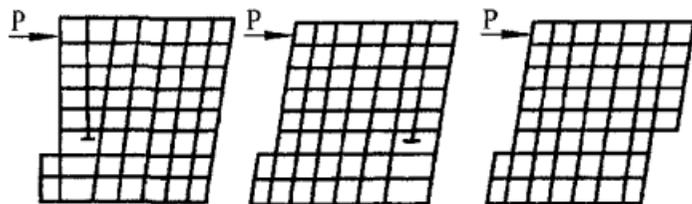


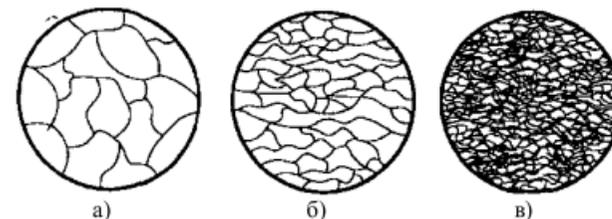
Рисунок 3.2 - Схема сдвига в кристаллах

В процессе скольжения возникают новые дислокации, и плотность дислокаций увеличивается. В недеформированном кристалле плотность дислокаций достигает 10^6 см^{-2} , а в сильнодеформированном металле порядка 10^{12} см^{-2} .

Пластическая деформация некоторых металлов, имеющих плотноупакованные решетки К12 и Г12, может осуществляться двойникованием, которое заключается в переориентации одной части кристалла в положение, симметричное к другой части, относительно плоскости, называемой плоскостью двойникования.

При деформации поликристалла некоторые зёрна меняют свою форму (вытягиваются), стремятся принять отдельную кристаллографическую ориентировку вдоль направления действия внешних сил. Изменение ориентировки происходит постепенно по мере увеличения степени деформации. При большой деформации металл приобретает определенную кристаллографическую ориентировку зёрен, называемую текстурой.

При пластической деформации зёрна металла вытягиваются в направлении прокатки, волочения и принимают форму листочков или волокон (рисунок 3.3 б). При больших степенях деформации зёрна разбиваются на большее число фрагментов и блоков, увеличивается травимость металла, и микроструктура выявляется нечетко (рисунок 3.3 в).



а - структура металла до деформации; б - волокнистая структура деформированного металла; в - структура металла после большой степени деформации

Рисунок 3.3 - Характер изменения микроструктуры при пластической деформации

Образование текстуры деформации способствует тому, что поликристаллический металл становится анизотропным (свойства его изменяются в зависимости от направления испытания). Изменение механических свойств технического железа зависит от степени холодной пластической деформации.

Упрочнение металла в процессе пластической деформации (наклёп) объясняется увеличением числа дефектов кристаллического строения (дислокаций, вакансий, межузельных атомов). Пластическая деформация приводит к изменению физических свойств металла: увеличиваются искажения решетки и, следовательно, его внутренняя энергия, растут твердость и прочность, увеличивается электрическое сопротивление, уменьшается пластичность. Деформация происходит не только в результате приложения внешних сил, но и в результате фазовых превращений. Все они приводят к наклёпу. Наклёпанные металлы более склонны к коррозионному разрушению при эксплуатации.

С увеличением степени холодной деформации характеристики прочности (предел прочности, предел текучести, твёрдость) возрастают, а характеристики пластичности падают. После деформирования у металла со степенью деформации до 70 % предел прочности и твёрдость возрастают до 3 раз, а предел текучести до 8 раз, при этом относительное удлинение снижается до 40 раз.

Структурное состояние пластически деформированного металла термодинамически неустойчивое. При нагреве пластически деформированный металл постепенно восстанавливает свою структуру и снова переходит в устойчивое состояние.

Степень и характер деформации, температура, скорость и продолжительность нагрева влияют на устранение наклёпа и изменения в структуре и свойствах металла. Различают две стадии процесса при нагреве: возврат и рекристаллизация (первичная, собирательная и вторичная), (рисунок 3.4),

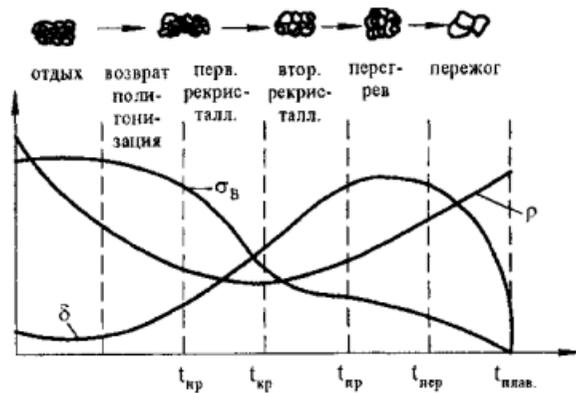


Рисунок 3.4 - Влияние нагрева на механические свойства и структуру деформированного металла

Возврат - начальная стадия разупрочнения, связанная с изменениями в тонкой кристаллической структуре. При возврате различают две стадии: отдых и полигонизацию.

Возврат I рода, или отдых происходит при нагреве до относительно невысоких температур и приводит к частичному снятию упругих искажений в решётке. При отдыхе в металле протекает ряд элементарных процессов, основным из которых следует считать диффузию точечных дефектов и их смещение к дислокациям.

Возврат II рода, или полигонизация заметно меняет структуру деформированного металла при нагреве. Под полигонизацией понимают перераспределение дислокаций, приводящее к образованию областей кристалла, свободных от дислокаций и отделенных друг от друга поверхностями раздела.

Первичная рекристаллизация является следующей стадией изменения структуры деформированных металлов после полигонизации (см. рисунок 3.4).

Рекристаллизация, т. е. образование новых зёрен с меньшим количеством дефектов, протекает при более высоких температурах, чем возврат и полигонизация, и может начаться с заметной скоростью после нагрева выше определенной температуры. Сопоставление температур рекристаллизаций различных металлов показывает, что между минимальной температурой рекристаллизации и температурой плавления существует простая зависимость

$$T_p = aT_m$$

где T_p - термодинамическая температура рекристаллизации, К;

T_m - термодинамическая температура плавления, К;

a - коэффициент, зависящий от чистоты металла.

Чем выше чистота металла, тем ниже температура рекристаллизации. У металлов обычной технической чистоты $a \sim 0,3 - 0,4$. Температура рекристаллизации сплавов, как правило, выше температуры рекристаллизации чистых металлов и в некоторых случаях достигает $0,8 T_m$. Наоборот, очень чистые металлы имеют низкую температуру рекристаллизации: $0,2 T_m$ и даже $0,1 T_m$.

В деформированном металле формируются и растут центры рекристаллизации - участки с неискажённой решеткой, отделенные от матрицы границами с большими углами разориентировки. При критической деформации имеется неоднородность наклепа разных зёрен, причем она настолько большая, что из-за разности накопленной объёмной энергии соседних зёрен при нагреве идёт быстрая миграция отдельных границ на расстояния, соизмеримые с размерами зёрен, т.е. исходные зёрна растут за счёт соседей. Кроме того, плотность дислокаций и избыток дислокаций одного знака недостаточны, чтобы вызвать образование новых высокоугловых границ и центров первичной рекристаллизации.

Собирательная рекристаллизация возникает после первичной, точнее после того, как выросшие центры рекристаллизации приходят во взаимное соприкосновение. Она заключается в равномерном укрупнении структуры путём роста одних зёрен за счёт других, новых и происходит в результате перемещения границ.

Вторичная рекристаллизация протекает в материале при высокой температуре и очень большом увеличении продолжительности отжига. Она заключается в резком избирательном росте отдельных рекристаллизованных зёрен и сопровождается появлением разносторонности. Этой стадии способствуют следующие факторы:

а) разная величина объёмной энергии у зёрен, менее искажённые зёрна растут за счёт более искажённых;

б) высокая подвижность границ одних зёрен по сравнению с другими, что может быть вызвано разными причинами. Одна из них - неравномерное распределение дисперсных включений по границам зёрен. Границы, которые высвобождаются в первую очередь, интенсивно мигрируют в направлении уменьшения поверхностной энергии, что создаёт благоприятные условия для ускоренного роста отдельных зёрен.

Если температура деформации ниже температуры рекристаллизации, то деформация считается холодной. Процесс холодной деформации сопровождается деформационным упрочнением (наклепом) металла, так как малые температуры не обеспечивают разупрочнения металла, и механические свойства металлов при холодной деформации изменяются значительно: возрастает прочность и уменьшается пластичность.

Если температура деформации выше температуры рекристаллизации, то деформацию называют горячей. Получаемое в процессе горячей деформации упрочнение тут же полностью или частично снимается вследствие рекристаллизации, что снижает сопротивление деформации и повышает пластичность металлов.

Размер зерна рекристаллизованного металла зависит от следующих факторов: размера исходного зерна; степени деформации; температуры и скорости нагрева; длительности выдержки; наличия растворимых и нерастворимых примесей (химического состава сплава):

Процесс рекристаллизации подтверждается рентгенографическим анализом. Линии на рентгенограммах, снятых с неподвижного деформированного образца, получаются сплошными и размытыми. По мере снятия напряжений при повышенных температурах на стадии возврата линии становятся более четкими и тоньше. Как только начинается процесс рекристаллизации и в структуре появляются рекристаллизованные зерна, на сплошной линии рентгенограммы возникают отдельные рефлексы. По мере уменьшения поля нерекристаллизованных участков металла число рефлексов на рентгенограмме увеличивается, а сплошной фон линии постепенно исчезает.

В технике применяются металлы с разными свойствами, и изменение свойств металлов в связи с наклепом: не всегда соответствуют потребностям производства. Кроме того, кристаллическая решетка металла, получившего наклеп, находится в напряженном состоянии, что может вызвать появление трещин и других дефектов.

При нагреве упрочненного металла в нем происходят процессы частичного или полного разупрочнения. С повышением температуры увеличивается кинетическая энергия атомов (ионов), усиливаются их тепловые колебания - появляется возможность возвращения атомов (ионов) в равновесное состояние.

Нагрев упрочненного металла до сравнительно небольших ($0,25-0,3 T_{пл}$) температур обеспечивает частично снятие внутренних напряжений и некоторое восстановление пластических свойств. Это явление называется возвратом (отдыхом). В результате возврата форма и ориентировка зерен, созданные деформацией, не изменяются, а кристаллическая решетка восстанавливается. Возврат повышает сопротивление металла коррозии и резко уменьшает склонность к самопроизвольному растрескиванию.

При нагреве упрочненного металла выше температуры возврата в нем начинают протекать процессы рекристаллизации, в результате которых восстанавливается микроструктура металла. После рекристаллизации исчезает упорядоченная ориентировка зерен и металл приобретает первоначальные свойства.

Процесс рекристаллизации протекает с некоторой скоростью, зависящей от температуры и степени деформации. Чем выше температура и степень предшествующей деформации, тем больше скорость рекристаллизации.

Температуру начала рекристаллизации устанавливают из соотношений:

Температура рекристаллизации дает возможность установить границы горячей и холодной обработки металлов давлением. Если обработка давлением происходит при температурах ниже температуры рекристаллизации и сопровождается наклепом, то такая обработка называется холодной. Если обработка давлением происходит при температурах выше температуры рекристаллизации и не сопровождается наклепом, то такая обработка называется горячей.

Горячая обработка давлением обычно проводится при температурах, превышающих температуру рекристаллизации, Поэтому при горячей обработке

металлов давлением одновременно происходят два взаимнопротивоположных процесса: деформация, сопровождающаяся наклепом, и рекристаллизация, сопровождающаяся разупрочнением. Для получения нужной структуры после горячей обработки давлением, а соответственно и механических свойств металла, скорость рекристаллизации должна быть значительно больше скорости деформации. Верхний предел температурного интервала горячей обработки металлов давлением выбирается так, чтобы не было пережога - интенсивного окисления и обезуглероживания (для углеродистых сталей на $150-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже линии солидуса).

Обычно сопротивление деформации объединяют в общее понятие прочность, а сопротивление разрушению - надёжность. Если разрушение происходит не за один, а за многие циклы нагружения, причем за каждый цикл происходит микроразрушение (сюда относятся такие процессы постепенного разрушения, как износ, усталость, коррозия, ползучесть), то это характеризует долговечность материала.

3 Порядок выполнения работы

В данной работе студентам предлагается изучить изменение твердости металла в зависимости от усилия при деформации, а также изменение твердости образцов металла, прошедших деформацию, после нагрева их до разных температур и последующего медленного охлаждения (отжига).

1) Произвести холодную пластическую деформацию на приборе Бринелля ТШ-2 путем вдавливания стального закаленного шарика диаметром 10 мм под нагрузкой соответственно 1840, 2452, 4903, 9807, 19614 Н на одном образце и под нагрузкой 19614 Н на четырех образцах из стали марки 10.

2) Измерить твердость образцов в исходном состоянии и пластически деформированных с различной степенью. Замеры твердости HRB производить на недеформированной поверхности и в центре каждого сферического отпечатка. Результаты записать в таблицу 3.1.

3) Произвести отжиг четырех образцов после пластической деформации с одинаковой нагрузкой 19614 Н (2000 кгс). Для этого поместите по одному образцу в электропечи, предварительно нагретые до 400, 550, 650, 750 $^{\circ}\text{C}$, выдержать 30 мин.

4) После охлаждения образцов на воздухе измерьте твердость HRB в центре отпечатка, полученные данные запишите в таблицу 3.2.

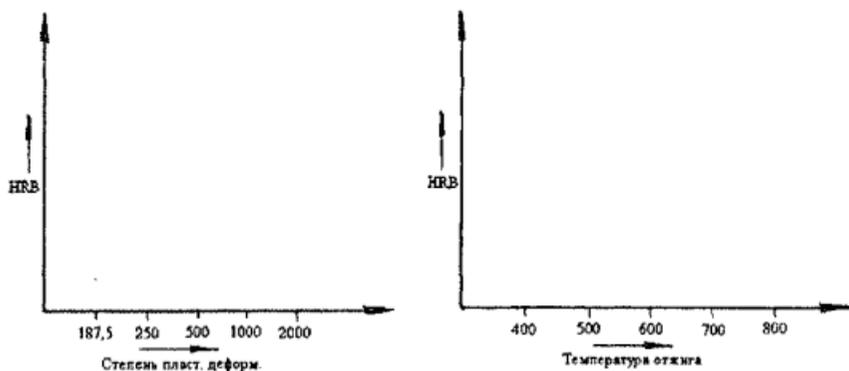
Таблица 3.1 - Результаты измерения твердости образцов после деформации

Марка стали	Степень пластической деформации (пропорциональная нагрузка по Бринеллю), Н (кгс)	Твёрдость HRB	Примечание
Сталь 10	В исходном состоянии		
	1840(187,5)		
	2452 (250)		
	4903 (500)		
	9807 (1000)		
	19614 (2000)		

Таблица 3.2 - Результаты измерения твердости образцов после отжига

Марка стали	Степень пластической деформации (пропорциональная нагрузка по Бринеллю), Н (кгс)	Температура отжига, °С	Твёрдость HRB
Сталь 10	19614 (2000)	400	
		550	
		650	
		750	

5) На основании полученных данных постройте графики в координатах "Твердость ~ степень пластической деформации (нагрузка)" и "Твердость - температура отжига деформированного образца".



4 Содержание отчёта

- 4.1 Цель работы.
- 4.2 Таблицы 3.1 и 3.2 с данными измерения твёрдости.
- 4.3 График изменения твёрдости стали в зависимости от степени деформации (по данным таблицы 3.1).
- 4.4 График изменения твёрдости пластически деформированной стали в зависимости от температуры отжига (по данным таблицы 3.2).
- 4.5 Схемы микроструктур стали 10 до и после пластической деформации, а также после рекристаллизационного отжига.
- 4.6 Выводы по работе.

5 Контрольные вопросы

- 5.1 Перечислите стадии рекристаллизации.
- 5.2 Что называется возвратом или отдыхом?
- 5.3 Как изменяется структура металла в результате пластической деформации?
- 5.4 Как изменяются свойства металла при наклёпе?
- 5.5 Дать определение критической степени деформации.
- 5.6 Как определить степень деформации?
- 5.7 Как изменяется структура деформированного железа в результате первичной кристаллизации?
- 5.8 Как изменяется пластичность при холодной пластической деформации?
- 5.9 Как изменяется прочность металла при возврате?
- 5.10 Почему происходит упрочнение в процессе холодной пластической деформации?
- 5.11 Что такое собирательная рекристаллизация?