

Калужский филиал
Федерального государственного бюджетного образовательного
Учреждения высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»
(КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Ю.Г. Головачёва

Пластическая деформация и рекристаллизация металлов и сплавов

Методическое пособие
по курсу «Материаловедение»

Калуга
2016 г.

УДК 669.01

ББК 30.3

Г61

Данное методическое пособие издаётся в соответствии с учебным планом для всех направлений/специальностей.

Методические указания рассмотрены и одобрены:

Кафедрой «Технологии обработки материалов» (М5-КФ)

протоколом № _____ от _____

Зав. кафедрой _____ д.т.н., профессор В.К. Шаталов

Методической комиссией факультета МТК

протоколом № _____ от _____

Председатель методической комиссии факультета МТК

_____ к.т.н., доцент В.М. Попков

Методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

протоколом № _____ от _____

Председатель методической комиссии филиала

_____ д.э.н., профессор О.Л. Перерва

Рецензент:

зам. главного инженера

ОАО «КТЗ»

А.З. Павловский

Авторы: _____ ст. преподаватель Ю.Г. Головачева

Аннотация

Методическое пособие рассматривает: механизм пластической деформации моно и поликристаллов. Влияние холодной и горячей пластической деформации на структуру и свойства металлов. Данное методическое пособие рекомендуется для подготовки студентов всех направлений и специальностей.

©КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

©Головачева Ю.Г. 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИЗУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ.....	4
1. МЕХАНИЗМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	4
2. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛА	7
3. ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ МЕТАЛЛА	8
4. ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА.....	10
5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	12
6. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА	12
7. РАЗМЕР ЗЕРНА ПОСЛЕ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ	17
8. ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА	18
9. ТЁПЛАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	20
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	20
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	21

ВВЕДЕНИЕ

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием внешних усилий. Кристаллическое строение и природа металлической связи обуславливают характерную особенность многих металлов и сплавов: сочетание большой прочности с высокой пластичностью. Под высокой пластичностью подразумевается способность материала непрерывно деформироваться вплоть до разрушения под воздействием внешних сил, приложенных к материалу. Процесс деформации складывается из упругой и пластической деформации.

Упругая деформация сопровождается смещением атомов на расстояние меньше межатомных; соседи атомов не изменяются. После прекращения действия внешних усилий упругая деформация исчезает, не вызывая изменений в структуре и свойствах.

Пластическая деформация сопровождается смещением атомов на расстояние больше межатомных. Не исчезая после прекращения воздействия пластической деформации, приводит к изменению формы, размеров, структуры и свойств материала, зависит от условий деформирования, исходной структуры материала.

В зависимости от температуры деформирования деформация называется: холодной (температура деформирования ниже $0,2 - 0,25T_{пл}$), теплой ($0,3 - 0,6T_{пл}$); горячей (температура деформирования выше $0,6T_{пл}$).

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИЗУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ

1. МЕХАНИЗМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Пластическая деформация в монокристалле осуществляется путём сдвига одной его части относительно другой. Сдвиг вызывают касательные напряжения, когда их значения превышает критическое $\tau_{кр}$.

Имеется две разновидности сдвига: скольжение и двойникование (рис.1).

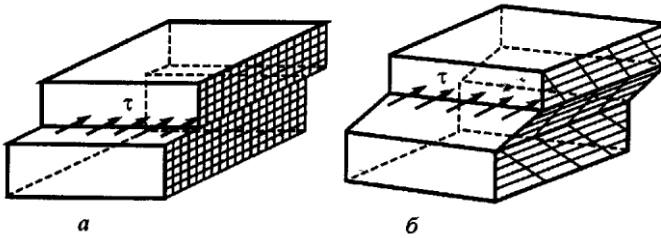


Рис.1 Схема пластической деформации скольжения (а) и двойникования (б)

Скольжение – основной вид сдвига в металлах и сплавах. При скольжении одна часть кристалла смещается параллельно другой части вдоль плоскости скольжения или сдвига (рис.1а). Деформация скольжения развивается по плоскостям и направлениям, на которых плотность атомов максимальна. В металлах с ГЦК решёткой Fe_γ, Al, Cu , скольжение протекает по плоскостям октаэдра 111 и в направлении диагонали грани куба 110 . В металлах с ОЦК решёткой Fe_α, Mo, V процесс скольжения наиболее легко осуществляется по плоскостям 110 и в направлении пространственной диагонали куба 111 (рис.2).

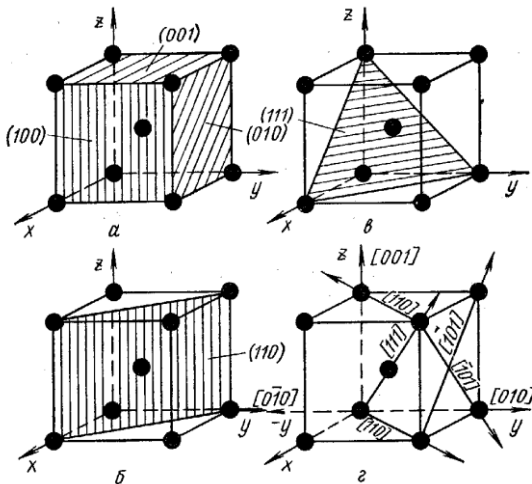


Рис.2 Индексы кристаллографических плоскостей и направлений в кубической решётке

Чем больше в металле возможных плоскостей и направлений скольжения, тем выше способность к пластической деформации. Металлы с кубической кристаллической решёткой обладают высокой пластичностью, так как скольжение в них происходит во многих направлениях.

В идеальном кристалле, в котором нет дефектов структуры, в скольжении должны одновременно участвовать все атомы, находящиеся в плоскости сдвига. Для такого «жёсткого» сдвига требуется критическое касательное напряжение $\tau_k = G / 2\pi \approx 0,16G$ (G - модуль упругости сдвига). Эту величину называют теоретической прочностью кристалла.

В реальных кристаллах для сдвига на одно межатомное расстояние требуется напряжение около $10^{-4}G$, что в 1000 раз меньше теоретического значения. Пластическая деформация в реальных кристаллах осуществляется путём последовательного перемещения дислокаций. Вокруг дислокаций в результате искажения кристаллической решётки возникает силовое поле. Напряжение вблизи линии дислокации, вызванные этим полем, оказываются значительными и поэтому под действием их и сравнительно небольшого внешнего сдвигающего напряжения дислокации могут перемещаться. Если дислокация пройдёт от одного края кристалла до другого, то произойдёт сдвиг одной его части относительно другой на расстояние равное вектору Бюргерса дислокации (рис.3), т.е. произойдёт пластическая деформация.

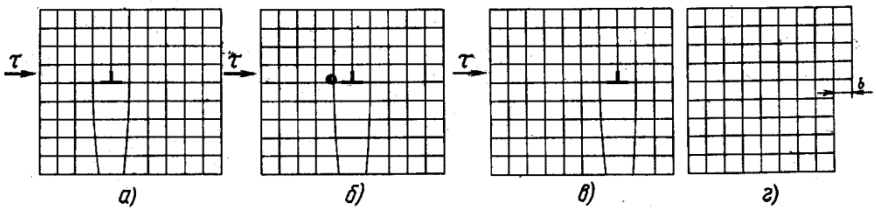


Рис.3 Схема перемещения краевой дислокации при скольжении

Чем больше количество движущихся дислокаций и длиннее суммарный путь их перемещения, тем больше величина макропластической деформации. Величина макропластической деформации сдвига G связана с плотностью дислокаций ρ , длиной их продвижения l и вектором Бюргерса \vec{b} по формуле

$$G = \rho \bar{b}l \quad (1)$$

Скольжение и сдвиг в кристаллах при низких температурах идут вдоль определённых для каждого типа решётки кристаллографических плоскостей и направлений. Их совокупность есть система скольжения. Чем больше систем скольжения, тем выше пластичность материала.

Двойникование представляет собой перестройку части кристалла в новое положение, зеркально симметричное к его недеформированной части (рис.1б). Плоскость зеркальной симметрии называют плоскостью двойникования.

При двойниковании атомные плоскости кристалла сдвигаются параллельно плоскости двойникования на разные расстояния. Часть кристалла, в которой в результате двойникования произошла переориентация кристаллографической решётки, называют двойником деформации. По сравнению со скольжением двойникование имеет второстепенный характер. Механизм двойникования – перемещение дислокаций. На полированных и протравлённых микрошлифах двойники выглядят как светлые и тёмные полосы в зависимости от ориентировки вышедшей на поверхность шлифа двойниковой области. Двойники деформации никогда не пересекают границ зёрен. Иногда заканчиваются внутри зерна, не доходя до его границы.

Скорость роста двойника велика и часто его образование сопровождается звуковой волной (треск при изгибе пластины из олова).

В чистом виде двойникование наблюдается редко, чаще накладывается на скольжение или предшествует ему или идёт после скольжения. В металлах с ОЦК и ГЦК решётками двойникование наблюдается лишь при низких температурах или высоких скоростях деформирования. Наиболее часто двойникование происходит в металлах с решёткой ГПУ, где число систем скольжения минимально. Металлы и сплавы, деформирующиеся двойникованием малопластичны.

2. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛА

Поликристалл – совокупность зёрен, разных по форме, размерам, ориентации. При деформировании поликристалла различают внутрикристаллитную и межкристаллитную деформацию. Межкристаллическая деформация включает процессы поворота и

скольжения зёрен относительно друг друга и играет значительно меньшую роль, чем внутрикристаллитная

Деформация отдельных зёрен поликристалла осуществляется скольжением и двойникованием. Наличие большого числа зёрен приводит к некоторым особенностям пластической деформации.

Пластическая деформация в первую очередь возникает в зёрнах, плоскости скольжения которых благоприятно ориентированы по отношению к направлению действующего усилия. Внешним проявлением групповых сдвигов являются линии скольжения. Дислокации могут дойти до границ зерна, а перейти границу не могут. Возле границ образуются дислокационные сплетения и создаются поля упругих напряжений. Эти напряжения могут распространяться на соседнее зерно, обеспечивая там напряжение больше критического. Таким образом, в поликристаллах наблюдается эстафетная передача деформации через границу зерна.

Чем большим числом возможных систем скольжения обладают зёрна поликристалла, тем больше вероятность того, что хотя бы одна из этих систем окажется благоприятно расположенной по отношению к внешней силе и, следовательно, тем меньше будет сопротивление деформации и больше пластичность поликристалла.

3. ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ МЕТАЛЛА

В ходе пластического деформирования металла увеличивается его энергия. Эта накопленная энергия определяет необратимые изменения кристаллического строения и, следовательно, свойств материала.

1. Деформация зёрен начинается сразу по нескольким системам скольжения и сопровождается изгибами и поворотами плоскостей скольжения. Пока деформация мала (1%), зёрна деформируются неоднородно в силу их разной ориентации по отношению к приложенным нагрузкам. С ростом деформации различия между зёрнами уменьшаются, и они вытягиваются в направлении пластического течения (рис.4в). При значительных деформациях образуется волокнистая структура, где границы зёрен различаются с трудом (рис.4г).

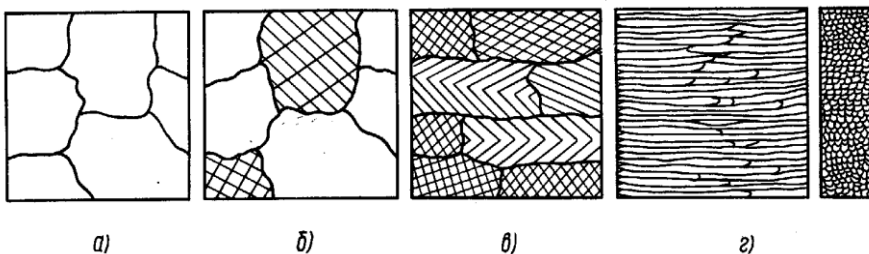


Рис.4 Изменение микроструктуры поликристаллического металла при деформировании: а) $\epsilon = 0\%$; б) $\epsilon = 1\%$; в) $\epsilon = 40\%$; г) $\epsilon = 80 - 90\%$.

2. Одновременно с изменением формы зёрен в процессе деформирования происходит кристаллографическая пространственная ориентация их, что приводит к возникновению текстуры. Текстура деформации – это результат одновременного деформирования зёрен по нескольким системам скольжения. Она зависит от вида деформирования, кристаллической структуры металла, наличия примесей и условий деформирования.

При волочении возникают так называемые аксиальные текстуры, когда определенное кристаллографическое направление оказывается параллельным оси проволоки или прутка (рис.5).

При прокатке получается более сложная структура. Параллельно плоскости прокатки лежит кристаллографическая плоскость и направление, которое образует с направлением прокатки определённый угол α (рис.5).

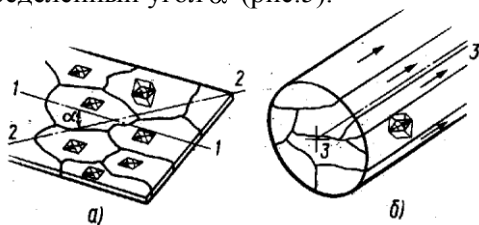


Рис.5 Текстура прокатки (а) и волочения (б): 1-1 – направление прокатки; 2-2 – ось текстуры; 3-3 – направление волочения

3. В ходе пластической деформирования изменяется внутреннее строение кристаллов. До 10–20% работы, идущей на деформирование, поглощается металлом. Эта часть работы, задерживается в металле в виде энергии дефектов кристаллической решётки, образующихся при пластической деформации.

Наиболее важным является увеличение плотности дислокаций. В процессе деформации появляется большое число дислокаций. При высоких степенях деформации их плотность достигает $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$ вместо $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$ до деформации. Увеличение плотности дислокаций возможно за счёт работы источников Франка-Рида.

В ходе информации идёт взаимодействие дислокаций друг с другом и с другими дефектами, с образованием дислокационных сплетений более или менее сложной конфигурации (узлы, сетки, решётки из дислокаций). С повышением степени деформации дислокационные сетки перераспределяются с созданием ячеек, разбивающих кристалл на объёмы, $\approx 2 - 3 \text{ мкм}$, сравнительно свободные от дислокаций, т.е. происходит образование ячеистой структуры. Дислокации, движущиеся в деформированном металле, порождают большое число дислоцированных атомов и вакансий.

4. Одновременно с изменением формы зерна внутри него происходит дробление блоков и увеличение угла разориентировки между ними. Рентгеноструктурный анализ показывает, что после деформации отдельные блоки упруго искажены (внутренние напряжения II рода), а кристаллическая решётка по границам зёрен, блоков и близ плоскостей скольжения искажена (внутренние напряжения III рода).

4. ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА

Упрочнение металла под действием пластической деформации называется наклёпом, или нагартовкой. Свойства наклёпанного металла изменяются тем сильнее, чем больше степень деформации.

1. При деформировании увеличиваются прочностные характеристики (твёрдость, $\sigma_s, \sigma_{0,2}, \sigma_{упр}$) и понижаются пластичность и вязкость δ, ψ, KCU (рис.6).

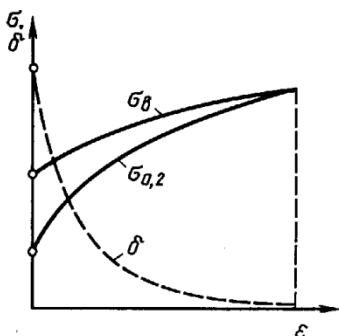


Рис.6 Зависимость механических свойств от степени деформации

Металлы интенсивно наклёпываются в начальной стадии деформирования, затем при возрастании деформации механические свойства изменяются незначительно. При деформировании металла со степенью деформации более 50% предел прочности и твёрдость могут увеличиться в 1,5-3 раза, а относительное удлинение уменьшается в десятки раз. Малые деформации более значительно влияют на предел текучести, чем на предел прочности.

Вновь можно подчеркнуть, что изменения механических свойств обусловлено увеличением плотности дислокаций в пластически деформированном материале. Из-за взаимодействия дислокаций затруднено скольжение уже имеющихся, а также генерирование и скольжение образующихся дислокаций. Затрудняется движение дислокаций границами ячеек и субзёрен.

2. Увеличение числа дефектов кристаллического строения при пластической деформации вызывает изменение физико-химических свойств материала – рост электросопротивления коэрцитивной силы, уменьшение магнитной проницаемости, ухудшение коррозионной стойкости.

С ростом деформации монотонно увеличивается коэрцитивная сила. Электросопротивление чистых металлов при больших деформациях обычно возрастает на 2-6%, а для сплавов наблюдается разное по величине и даже по знаку изменение электросопротивления.

3. Текстура деформации и волокнистая структура создают анизотропию свойств наклёпанного металла. Анизотропия свойств обычно нежелательна, но иногда и полезна (в магнитных материалах). Вдоль волокна σ_{ϵ} , δ , KCU выше, чем поперёк; причём разница в их значениях возрастает с увеличением степени деформации. Это

обстоятельство необходимо учитывать при изготовлении деталей и использовании текстурованных материалов. Так в случае глубокой вытяжки сильно анизотропного листового материала образуются неровные края; при изгибе вдоль направления прокатки наблюдается более легкое разрушение холоднокатаных листов, чем при изгибе перпендикулярно этому направлению.

5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Пластическая деформация – способ изменения структурно-чувствительных свойств – механических и физико-химических. Особенно сильно влияние на механические свойства. Упрочнение в ходе пластической деформации затрудняет обработку давлением, если требуются большие степени обжатия. Приходится усложнять технологический процесс, вводя промежуточную термообработку (рекристаллизационный отжиг), обеспечивающий снятие наклёпа.

Поверхностная пластическая деформация (обкатка роликами) применяется для упрочнения поверхности деталей типа валов. Такая обработка повышает и класс чистоты поверхности. Для чистых металлов и сплавов, не испытывающих превращений в твёрдом состоянии, пластическая деформация – единственный способ упрочнения.

Так как дефекты кристаллического строения сильно влияют на формирование структуры сплавов при фазовых превращениях, то пластическую деформацию перед фазовым превращением или в период их развития можно использовать для создания оптимальной структуры, термически обработанного сплава (ТМО).

6. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

Наклёпанный металл находится в неравновесном состоянии с повышенной энергией. При нагреве в таком металле самопроизвольно пройдут процессы, приводящие его к равновесному состоянию. Эти процессы сводятся к уменьшению общего количества дефектов кристаллического строения, перераспределению их в кристаллах с образованием равновесных конфигураций. Процессы совершаются

путём перемещения атомов. Решающее влияние на них оказывает температура.

Процессы, происходящие при нагреве, подразделяют на две основные стадии: возврат и рекристаллизацию.

Возвратом называют процесс, под которым понимают повышение структурного совершенства наклёпанного металла вследствие уменьшения плотности дефектов строения, изменений в размере и форме зерна не наблюдается.

Рекристаллизацией называют зарождение и рост новых зёрен с меньшим количеством дефектов строения. Процесс идёт: при температурах более высоких, чем при возврате; требует степеней деформации больше некоторой критической.

Возврат подразделяют на две стадии: отдых и полигонизацию.

При температурах ниже $0,2T_{nl}$ протекает первая стадия возврата – отдых, происходит уменьшение вакансий и перераспределение дислокаций без образования новых субграниц. Избыточные вакансии и межузельные атомы поглощаются границами зёрен и дислокациями при перераспределении дислокаций при нагреве.

Вторая стадия возврата – полигонизация, под которой понимают дробление кристаллитов на субзёрна (полигоны) с малоугловыми границами. При деформации кристалла, возникают дислокации, беспорядочно распределённые в плоскостях скольжения (рис.7а). При нагреве избыточные дислокации одного знака выстраиваются в дислокационные стенки, что приводит к образованию субзёрен (полигонов, свободных от дислокаций) (рис.7б).

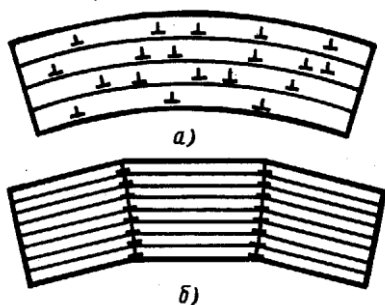


Рис.7 Схема полигонизации: а, б – наклёпанный металл до и после полигонизации

Процесс полигонизации протекает после небольших деформаций при нагреве до $0,25 - 0,3T_{nl}$.

При возврате механические свойства не изменяются. Электросопротивление восстанавливается полностью. Это связано с уменьшением концентрации вакансий и перераспределением дислокаций.

Процесс рекристаллизации можно разделить на: первичную, собирательную, вторичную рекристаллизацию.

Первичная рекристаллизация заключается в зарождении и росте новых зёрен с более совершенной структурой за счёт исходных деформированных зёрен. Движущая сила процесса – уменьшение объёмной свободной энергии. Рекристаллизационные зёрна отделены от деформированных зёрен высокоугловыми границами и отличаются от них не только более равноосной формой, и совершенным внутренним строением – резко пониженной плотностью дислокаций (в сильно деформированном металле $\rho = 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$, после рекристаллизации $\rho = 10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$) (рис.8б). При рекристаллизации снижается прочность, растёт пластичность. Температура появления рекристаллизационных зёрен не является физической постоянной, а зависит от ряда факторов: структуры, степени деформации (ϵ), температуры плавления ($T_{пл}$), длительности отжига (τ). С увеличением степени деформации и длительности отжига температура рекристаллизации снижается. Минимальную температуру начала рекристаллизации при $\epsilon = 60 - 70\%$ и длительности отжига $\tau = 1 - 2 \text{ часа}$ называют температурным порогом рекристаллизации $T_{н.р.}$.

Бочвар А.А. установил зависимость между $T_{рек}$ и $T_{пл}$.

$T_{рек} = kT_{пл}$, где $k - const$, зависящая от чистоты металла и структуры сплава: $k \approx 0,2 - 0,3$ - для чистых металлов; $k \approx 0,3 - 0,4$ - для металлов технической чистоты; $k \approx 0,7 - 0,8$ - для сплавов со структурой твёрдого раствора.

Чтобы пластическая деформация создавала упрочнение, она должна производиться при температурах ниже $T_{рек}$. Первичная рекристаллизация заканчивается, когда исчезают деформированные зёрна, а свойства полностью восстанавливаются до значений, соответствующих недеформированному материалу (рис.8в).

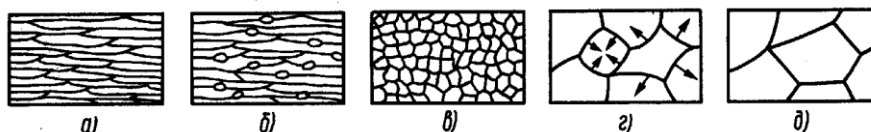


Рис.8 Схема изменения микроструктуры наклёпанного металла при нагреве: а - наклёпанный металл; б - начало первичной рекристаллизации; в - завершение первичной рекристаллизации; г, д - стадия собирательной рекристаллизации

Собирательная рекристаллизация заключается в росте одних рекристаллизованных зёрен за счёт соседних рекристаллизованных зёрен путём миграции высокоугловых границ (рис.8г). Основной причиной собирательной рекристаллизации является стремление к уменьшению зернограницной («поверхностной») энергии благодаря уменьшению протяженности границ при росте зерна. С повышением температуры рост зёрен ускоряется (рис.8д). Чем выше температура нагрева, тем более крупными окажутся рекристаллизованные зёрна. При высокой температуре (выше t_1) пластичность рекристаллизованного металла может уменьшаться, что объясняется сильным ростом зерна (рис.9).

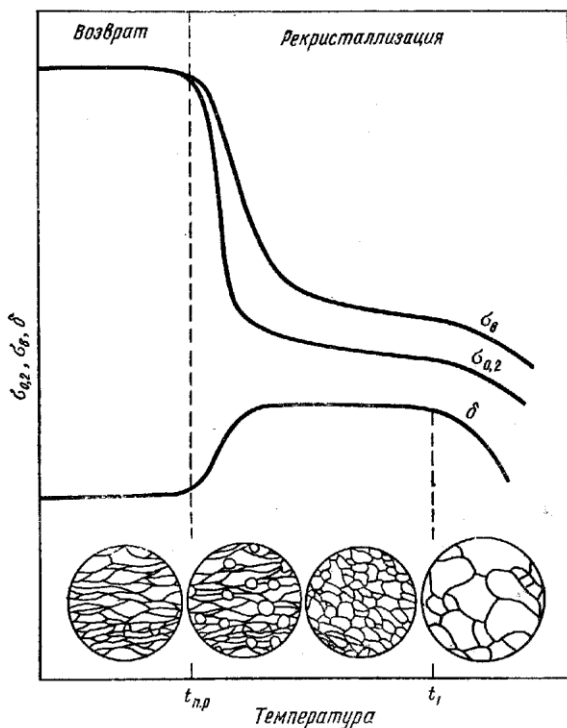


Рис.9 Влияние нагрева на механические свойства и структуру металла, упрочнённого холодной деформацией

Если какие-то из новых зёрен имеют предпочтительные условия для роста, то эту стадию рекристаллизации называют вторичной. Для разных металлов и сплавов наблюдается в различных определённых температурных интервалах, выше $T_{рек}$. Ниже этого температурного интервала наблюдается медленная собирательная рекристаллизация; выше быстрая собирательная рекристаллизация. Причина вторичной рекристаллизации – сильное торможение роста большинства зёрен, образовавшихся при первичной рекристаллизации.

Структура, формирующаяся в результате вторичной рекристаллизации, состоит из большого числа сравнительно мелких зёрен примерно одинакового размера и гораздо меньшего числа крупных зёрен.

Вторичная рекристаллизация часто используется для создания определённой текстуры в тонколистовом материале.

7. РАЗМЕР ЗЕРНА ПОСЛЕ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Размер зерна важнейшая характеристика отожжённого металла. Металлы и сплавы, имеющие мелкое зерно, обладают повышенной прочностью, пластичностью и вязкостью. С уменьшением размера зерна вязкость улучшается. Однако в некоторых случаях необходимо, чтобы металл имел крупное зерно. Так, трансформаторная сталь или техническое железо наиболее высокие магнитные свойства имеют при крупном зерне. Размер зерна после рекристаллизации может сильно отличаться от исходного размера зерна, он зависит от температуры отжига, его длительности, степени предварительной деформации, исходного размера зерна, состава сплава и т.д.

Приданной степени деформации ε , с ростом температуры отжига и его длительности размер зерна возрастает. Увеличение ε уменьшает размер зерна (рис.10б).

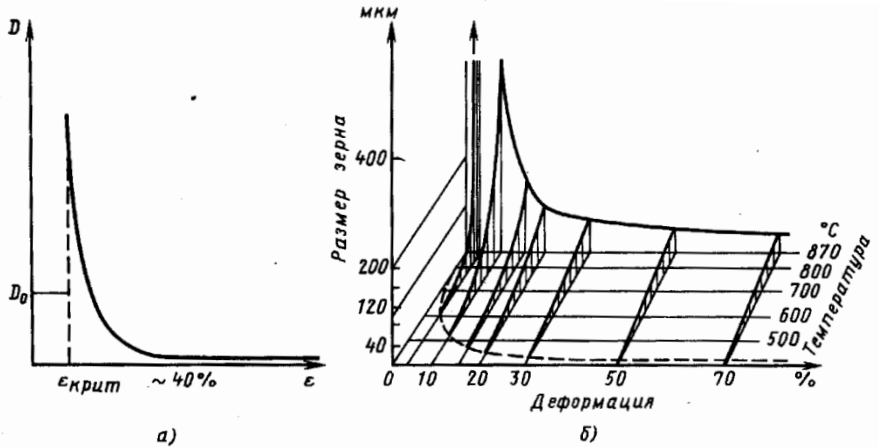


Рис.10 Зависимость размера зерна D рекристаллизационного металла от деформации (а) и диаграмма рекристаллизации технически чистого железа (б); D_0 - размер исходного зерна

При небольшой деформации (от 1 до 15%) при отжиге может вырасти очень крупное зерно, в несколько раз больше исходного. Эта степень деформации называется критической $\varepsilon_{кр}$ (рис.10а).

Значительный рост зёрен объясняется тем, что при докритических и критических степенях деформации неоднородность наклёпа разных зёрен так велика, что при нагреве становится возможным рост одних исходных зёрен за счёт других; процесс рекристаллизации при таких степенях деформации отсутствует. Если всё-таки $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$, для того чтобы при отжиге не получить очень крупное зерно необходимо уменьшить скорость нагрева и тем самым вызвать протекание стабилизирующей полигонизации. Пространственные диаграммы рекристаллизации, показывающие размер зерна от степени деформации и температуры отжига при определённой выдержке, дают возможность в первом приближении выбрать режим отжига для получения необходимой структуры.

Возврат, полигонизация, рекристаллизация – способы управления структурой. Это термически активируемые процессы связанные с перераспределением и уменьшением структурных несовершенств в твёрдом теле, созданных предшествующей обработкой.

8. ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА

Горячая обработка давлением – это обработка при высоких температурах, выше $T_{рек}$. Прочность и пластичность металлов в условиях горячей обработки зависит от температуры и скорости деформирования.

При горячей обработке одновременно идут два процесса:

- Пластическая деформация, вызывающая наклёп;
- Возврат и рекристаллизация, обеспечивающие уменьшение плотности дислокаций и, следовательно, разупрочнение, снятие наклёпа;

На начальных этапах горячей деформации всегда происходит деформационное упрочнение, связанное с повышением плотности дислокаций. Затем протекает либо стадия возврата, либо, если $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$, рекристаллизация. При прохождении только стадии возврата сохраняется $\rho = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и устанавливается приблизительно постоянное значение напряжения течения, не зависящее от степени деформаций. Зёрна сильно вытягиваются в направлении течения.

Если идёт рекристаллизация (для начала её нужен энергетический стимул, высокая ρ , т.е. $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$, и температура более высокая, чем температура статической рекристаллизации), то уменьшается плотность дислокации, уменьшается напряжение течения, металл разупрочняется.

Таким образом, в отличие от холодной, для горячей деформации характерно наступление после деформационного упрочнения стадии установившегося течения. Плотность дислокаций при горячей обработке не превышает 10^9 см^{-2} .

Пластическая деформация железа при 600°C является горячей обработкой, при 400°C - холодной. Для свинца и олова пластическая деформация при комнатных температурах является горячей, т.к. $T_{рек}$ их ниже 20°C . На практике для увеличения пластичности и более полного устранения наклёпа деформирование ведут при температуре значительно превосходящей $T_{рек}$ (таблица 1).

Таблица 1

Температуры рекристаллизации и горячей обработки давлением

Металл	Температура, $^\circ\text{C}$		
	Рекристаллизация (теоретическая)	Рекристаллизационного отжига	Горячей обработки давлением
Железо	450	600-700	1300-800
Сталь	450	600-700	1300-800
Медь	270	450-500	800-600
Латунь	250	400-500	750-600
Алюминий	50	250-350	460-350
Молибден	900	1400-1600	1400-2000

Горячая деформация обычно первый вид обработки, которому подвергается литая структура (слитки, литые заготовки). Литая структура характеризуется наличием дендритов, по границам которых располагаются примеси, неметаллические включения, усадочные раковины, газовые поры. При горячей обработке давлением литая структура разрушается, рекристаллизация позволяет получить равноосные зёрна, поры завариваются. Повышается прочность и пластичность. Макроструктура горячедеформированного металла, как правило, волокнистая, так как примеси и неметаллические включения

вытягиваются вдоль направления наиболее интенсивного течения металла. Волокнистость приводит к анизотропии свойств. Показатели пластичности вдоль волокна выше, чем поперёк. Разность между ними возрастает с увеличением степени деформации.

9. ТЁПЛАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Тёплая деформация проводится при $T = 0,3 - 0,6 T_{пл}$. Для тепловой деформации характерно то, что в процессе деформирования идёт полигонизация. Число образующихся дислокаций всегда больше числа исчезающих дислокаций. При тёплой деформации $\rho = 10^{10} \text{ см}^{-2}$. По сравнению с холодной деформацией тёплая обеспечивает пониженное сопротивление пластической деформации и используется деформации труднодеформируемых материалов (трансформаторная сталь, проволока из силхрома, железоалюминиевые сплавы). При тёплой деформации сплавов могут идти фазовые превращения, вызывающие изменение сопротивления пластической деформации: резко падает прочность, растёт пластичность $\delta = 10^2 - 10^3\%$ – это явление сверхпластичности.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое деформация?
2. Что называют пластической деформацией? Виды пластической деформации?
3. Каков механизм пластической деформации при сдвиге и двойниковании?
4. Что такое поликристалл и на чём основана пластическая деформация поликристаллов?
5. Каково влияние холодной пластической деформации на структуру и свойства металла?
6. Каково практическое применение холодной пластической деформации?
7. Какие процессы происходят при нагреве холоднодеформируемого металла?
8. Какие стадии происходят при возврате и как они влияют на структуру и свойства металла?

9. В чём заключаются процессы рекристаллизации? Их влияние на свойства и структуру деформируемых металлов?
10. Каков размер зерна после рекристаллизации?
11. Каково влияние горячей обработки давлением на структуру и свойства металла?
12. Что представляет собой тёплая деформация металлов и сплавов?
13. Что такое сверхпластичность?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин Ю.М. Материаловедение: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990 – 528с.
2. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. -648с.
3. Геллер Ю.А. Материаловедение: учеб. издание для вузов / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. - М.: Металлургия, 1989. – 456с.
4. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов / А.П. Гуляев. - М.: Металлургия, 1986. - 542с.
5. Богодухов С.И. Курс материаловедения в вопросах и ответах: учеб. пособие. / С.И. Богодухов, А.В. Синюхин, Е.С. Козик . – М.: Машиностроение, 2010. – 352с. <http://e.lanbook.com/view/book/718/>