

## Лекция №4

# ТЕМА. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### §1. МЕХАНИЗМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Деформацией называется *изменение размеров и формы тела под действием внешних усилий*. Бывает *упругой и пластической*.

В основе пластического деформирования металлов лежит перемещение дислокаций практически при любых температурах и скоростях деформирования. Сущностью пластического деформирования является сдвиг, в результате которого одна часть кристалла смещается по отношению к другой части.

Фактически пластическая деформация осуществляется за счет перемещения дислокаций. Процесс сдвига в кристалле будет происходить тем легче, чем больше дислокаций будет в металле.

Способность реального металла пластически деформироваться является его важнейшим и полезнейшим свойством. Это свойство используют при различных технологических процессах - при протяжке проволоки, операциях гибки, высадки, вытяжки, штамповки и т.д. Большое значение оно имеет и для обеспечения конструктивной прочности или надежности металлических конструкций, деталей машин и других изделий из металла. Опыт показывает, что если металл находится в хрупком состоянии, т.е. если его способность к пластическому деформированию низка, то он в изделиях склонен к внезапным так называемым хрупким разрушениям, которые часто происходят даже при пониженных нагрузках на изделие.

*Конструкционная прочность* – комплекс прочностных свойств, которые находятся в наибольшей корреляции со служебными свойствами данного изделия, обеспечивают длительную и надежную работу материала в условиях эксплуатации.

На конструкционную прочность влияют следующие факторы:

- конструкционные особенности детали (форма и размеры);
- механизмы различных видов разрушения детали;
- состояние материала в поверхностном слое детали;
- процессы, происходящие в поверхностном слое детали, приводящие к отказам при работе.

Необходимым условием создания качественных конструкций при экономном использовании материала является учет дополнительных критериев, влияющих на конструкционную прочность. Этими критериями являются *надежность и долговечность*.

*Надежность* – *свойство изделий, выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого времени или сопротивление материала хрупкому разрушению.*

Развитие хрупкого разрушения происходит при низких температурах, при наличии трещин, при повышенных остаточных напряжениях, а также при развитии усталостных процессов и коррозии.

**Критериями, определяющими надежность,** являются температурные пороги хладноломкости, сопротивление распространению трещин, ударная вязкость, характеристики пластичности, живучесть.

*Долговечность* – *способность детали сохранять работоспособность до определенного состояния.*

Долговечность определяется усталостью металла, процессами износа, коррозии и другими, которые вызывают постепенное разрушение и не влекут аварийных последствий, то есть условиями работы.

**Критериями, определяющими долговечность, являются усталостная прочность, износостойкость, сопротивление коррозии, контактная прочность.**

Общими принципами выбора критериев для оценки конструкционной прочности являются:

- аналогия вида напряженного состояния в испытываемых образцах и изделиях;
- аналогия условий испытания образцов и условий эксплуатации (температура), среда, порядок нагружения;
- аналогия характера разрушения и вида излома в образце и изделии.

## §2. НАКЛЕП

В процессе деформации пара движущихся дислокаций порождает сотни и сотни новых, в результате этого **плотность дислокаций повышается, что и приводит к упрочнению** (повышению предела прочности) - рис.1.

$$\rho = 10^6 \dots 10^8 \rightarrow 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$$

Их свободное перемещение затрудняется взаимным влиянием, также торможением дислокаций в связи с измельчением блоков и зерен, искажениями решетки металлов, возникновением напряжений.

*Упрочнение металла под действием пластической деформации* называется **наклепом, или нагартовкой (деформационное упрочнение).**

Пластическая деформация вносит существенные изменения в строение металла. Кристаллическая структура пластически деформированного металла характеризуется не только искажением кристаллической решетки, но и *определенной ориентировкой зерен - текстурой.*

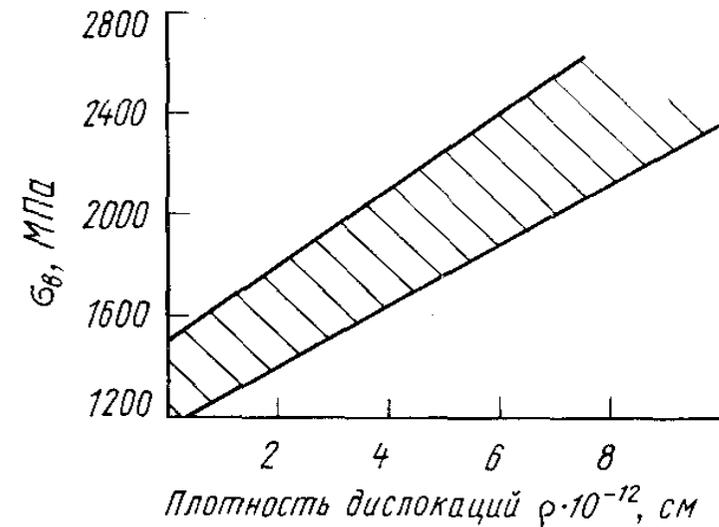


Рис. 1. Изменение прочности в зависимости от плотности дислокаций (высокопрочная сталь)

Беспорядочно ориентированные кристаллы под действием деформации поворачиваются осями наибольшей прочности вдоль направления деформации (рис.2). С увеличением деформации степень текстурованности возрастает и при больших степенях деформации достигает 100%, т.е. все зерна оказываются **одинаково ориентированными.**

Не следует думать, что в результате деформации зерно измельчается. В действительности оно только деформируется, сплющивается и из равноосного превращается в

неравноосное (в виде лепешки, блина), сохраняя ту же площадь поперечного сечения.

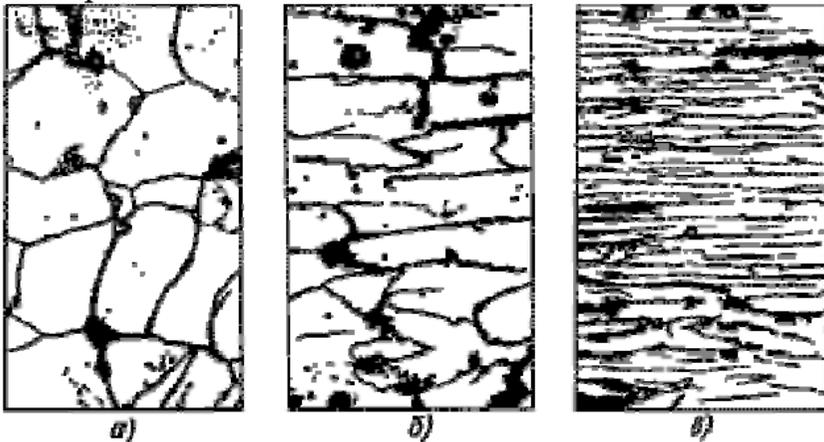


Рис. 2. Изменение структуры при деформации: а) до деформации; б) после обжатия на 35%; в) после обжатия на 90%.

Металл приобретает волокнистое строение. Волокна с вытянутыми вдоль них неметаллическими включениями являются причиной неодинаковости свойств вдоль и поперек волокон. Одновременно с изменением формы зерен в процессе пластической деформации происходит изменение ориентировки в пространстве их кристаллической решетки.

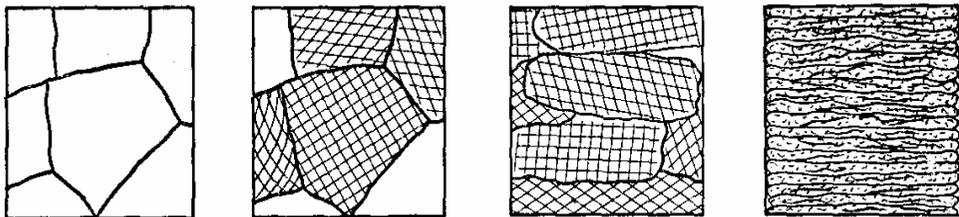


Рис.2. Изменение микроструктуры при пластической деформации поликристалла

### §3. СВОЙСТВА ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ

В результате холодного пластического деформирования металл упрочняется и изменяются его физические свойства. Наклепанный металл запасает 5-10% энергии, затраченной на деформирование. Запасенная энергия тратится на образование дефектов решетки (например, плотность дислокаций возрастает до  $10^9-10^{12}$  см<sup>-2</sup>) и на упругие искажения решетки. Свойства наклепанного металла меняются тем сильнее, чем больше степень деформации.

При деформировании увеличиваются прочностные характеристики (твёрдость;  $\sigma_B$ ;  $\sigma_T$ ) и понижаются пластичность и вязкость ( $\delta$ ,  $\psi$ , КСУ). Металлы интенсивно наклепываются в начальной стадии деформирования, после 40% -ной деформации механические свойства меняются незначительно (Рис.3).

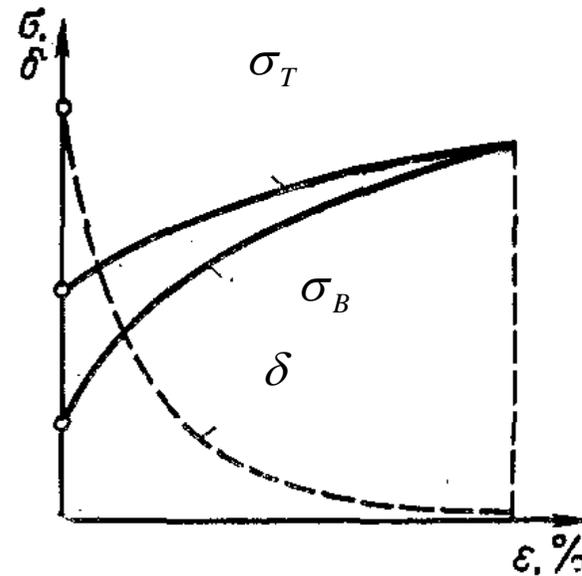


Рис3. Зависимость механических свойств от степени деформации

С увеличением степени деформации предел текучести растет быстрее предела прочности (временного сопротивления). Обе характеристики у сильно наклепанных металлов сравниваются, а удлинение становится равным нулю. Такое состояние наклепанного металла является предельным, при попытке продолжить деформирование металл разрушается. Путем наклепа твердость и временное сопротивление (предел прочности) удается повысить в 1,5-3 раза, а предел текучести - в 3-7 раз при максимально возможных деформациях. Металлы с ГЦК-решеткой упрочняются сильнее металлов с ОЦК-решеткой.

С ростом степени деформации возрастает удельное электросопротивление, коэрцитивная сила, понижается магнитная проницаемость, остаточная индукция и плотность металла. Наклепанные металлы более активно, вступают в химические реакции, они легче корродируют и склонны к коррозионному растрескиванию.

В промышленности широко применяют следующие высокопроизводительные эффективные и дешевые способы поверхностного упрочнения деталей: дробеструйный наклеп, накатывание поверхности роликами или шариками, чеканка специальными бойками, гидроабразивный наклеп и др.

Эти способы позволяют значительно увеличить долговечность деталей, повысить прочность и твердость, уменьшить пластичность и вязкость.

#### **§4. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ**

Неустойчивая структура пластически деформированного металла стремится освободиться от искажений кри-

сталлической решетки и запаса остаточной энергии и перейти в устойчивое состояние.

Неравновесная структура, созданная холодной деформацией у большинства металлов устойчива при комнатной температуре. Переход металла в более стабильное состояние происходит при нагреве. При повышении температуры металла в процессе нагрева после пластической деформации диффузия атомов увеличивается и начинают действовать **процессы разупрочнения**, приводящие металл в более равновесное состояние – **возврат и рекристаллизация.**

Они сопровождаются выделением теплоты и уменьшением свободной энергии. Возврат происходит при относительно низких температурах, рекристаллизация - при более высоких.

#### ***Возврат.***

Небольшой нагрев вызывает ускорение движения атомов, снижение плотности дислокаций, устранение внутренних напряжений и восстановление кристаллической решетки. Возврат уменьшает искажение кристаллической решетки, но не влияет на размеры и форму зерен и не препятствует образованию текстуры деформации.

**Возвратом** называют *все изменения тонкой структуры и свойств, которые не сопровождаются изменением микроструктуры деформированного металла*, т.е. размер и форма кристаллов при возврате не изменяются.

Процесс возврата протекает обычно при температурах ниже  $0,3 T_{пл}$  ( $T_{пл}$  - абсолютная температура плавления металла или сплава).

Стадию возврата, в свою очередь, разделяют на две возможные стадии: отдых и полигонизацию.

Процесс частичного разупрочнения и восстановления свойств называется **отдыхом** (первая стадия возврата).

**Отдыхом** холоднодеформированного металла называют *стадию возврата, при которой вследствие перемещения атомов уменьшается количество точечных дефектов, в основном вакансий*

Имеет место при температуре

$$T = 0,25 - 0,3T_{пл}$$

Отдых вызывает значительное уменьшение удельного электросопротивления и повышение плотности металла.

Если при отдыхе уменьшается плотность дислокаций, то наблюдается уменьшение твердости и прочности металла (алюминий, железо); если плотность дислокаций при отдыхе не меняется, то отдых не сопровождается изменением механических свойств (медь, латунь, никель).

**Полигонизация** – процесс деления зерен на части: фрагменты, полигоны в результате скольжения и переползания дислокаций.

**Полигонизацией** называют *стадию возврата, при которой в пределах каждого кристалла образуются новые малоугловые границы. Границы возникают путем скольжения и переползания дислокаций; в результате кристалл разделяется на субзерна - полигоны, свободные от дислокаций, а дислокации скапливаются на границах полигонов, образуя стенки.*

В полигонизированном состоянии кристалл обладает меньшей энергией, поэтому образование полигонов — процесс энергетически выгодный.

Процесс протекает при небольших степенях пластической деформации. В результате понижается прочность на (10...15) % и повышается пластичность.

Изменений в микроструктуре не наблюдается (рис.8.5 а). Температура начала полигонизации не является постоянной. Скорость процесса зависит от природы металла, содержания примесей, степени предшествующей деформации.

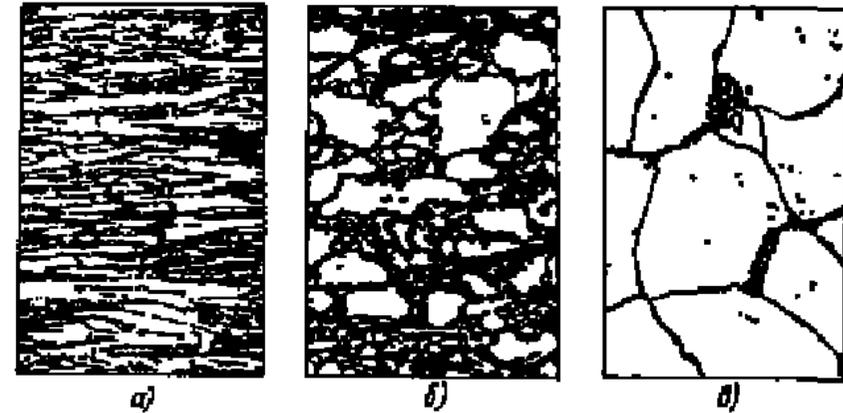


Рис. 8.5. Изменение структуры деформированного металла при нагреве

При нагреве до достаточно высоких температур подвижность атомов возрастает и происходит **рекристаллизация**.

**Рекристаллизация** – процесс зарождения и роста новых недеформированных зерен при нагреве наклепанного металла до определенной температуры.

**Рекристаллизация** – это процесс зарождения и роста новых зерен с меньшим количеством дефектов строения; в результате рекристаллизации образуются новые, чаще всего равноосные зерна (рис. 6).

Нагрев металла до температур рекристаллизации сопровождается резким изменением микроструктуры и свойств. Нагрев приводит к резкому снижению прочности

при одновременном возрастании пластичности. Также снижается электросопротивление и повышается теплопроводность.

В зависимости от температуры нагрева и времени выдержки различают три стадии рекристаллизации: первичная, собирательная и вторичная.

**Первичная рекристаллизация** начинается с образования зародышей новых зерен и заканчивается полным замещением наклепанного металла новой поликристаллической структурой (рис. 6а-в).

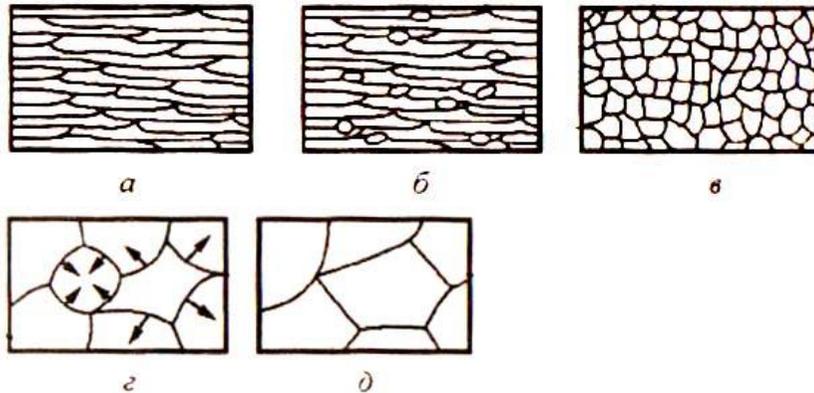


Рис.6. Схема изменения микроструктуры холоддеформированного металла при нагреве:

а – ориентированные по нагрузке зерна деформированного металла; б- начало первичной рекристаллизации; в- завершение первичной рекристаллизации; г- рост зерна; д- образование равновесной структуры

Для начала первичной рекристаллизации необходимы два условия:

- предварительная деформация наклепанного металла должна быть больше критической

$$\varepsilon > \varepsilon_{\text{крит}};$$

- температура нагрева должна превысить критическое значение

$$t > t_{\text{крит}}.$$

Критическая температура  $t_{\text{крит}}$  зависит от степени деформации металла  $\varepsilon$  ( $\varepsilon \uparrow$ ,  $t_{\text{крит}} \downarrow$ ) и наличия в нем примесей ( $\sum_{\text{примесей}} \uparrow$ ,  $t_{\text{крит}} \uparrow$ ).  $t_{\text{крит}}$  называется **температурным порогом рекристаллизации  $t_{\text{пр}}$** .

**Температурный порог рекристаллизации** – это *наименьшая температура нагрева, обеспечивающая возможность зарождения новых зерен.*

$$T_{\text{РЕКР}} = a \cdot T_{\text{ПЛ}}.$$

Значение коэффициента  $a$  зависит от чистоты металла и степени пластической деформации.

**А.А. Бочвар** получил правило для определения температурного порога рекристаллизации  $T_{\text{пр}}$  для технически чистых металлов, подвергнутых значительной деформации

$$T_{\text{пр}} = 0,4 T_{\text{пл}}, \text{ К},$$

где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления деформированного металла.

для твердых растворов  $\alpha = 0,5 - 0,8$

для металлов высокой чистоты  $\alpha = 0,1 - 0,2$

Для алюминия, меди и железа технической чистоты температурный порог рекристаллизации равен соответственно 100, 270 и 450<sup>0</sup>С.

Для металлов технической чистоты  $a = 0,3 - 0,4$  и понижается с увеличением степени деформации. Уменьшение количества примесей может понизить  $a$  до 0,1 - 0,2. Для твердых растворов  $a = 0,5 - 0,6$ , а при растворении тугоплавких металлов может достигать 0,7 - 0,8.

При *собирательной* (рис. 15г) и *вторичной* (рис. 15д) рекристаллизации происходит рост зерен. Вторичной рекристаллизации соответствуют высокие температуры нагрева наклепанного металла.

Явление рекристаллизации имеет важное практическое значение. Чтобы восстановить структуру и свойства наклепанного металла (например, при необходимости продолжить обработку давлением путем прокатки, протяжки, волочения и т.п.), его необходимо нагреть выше  $t_{пр}$ . Такая термическая обработка металла называется *рекристаллизационным отжигом*.

Практически рекристаллизационный отжиг проводят для малоуглеродистых сталей при температуре 600...700°C, для латуней и бронз – 560...700°C, для алюминиевых сплавов – 350...450°C, для титановых сплавов – 550...750°C.

При температуре обработки давлением выше  $t_{пр}$  упрочнение металла снимается тем быстрее, чем больше перегрев металла по отношению к  $t_{пр}$ . При очень высокой температуре (*ковочные температуры*) рекристаллизация завершается в доли секунды.

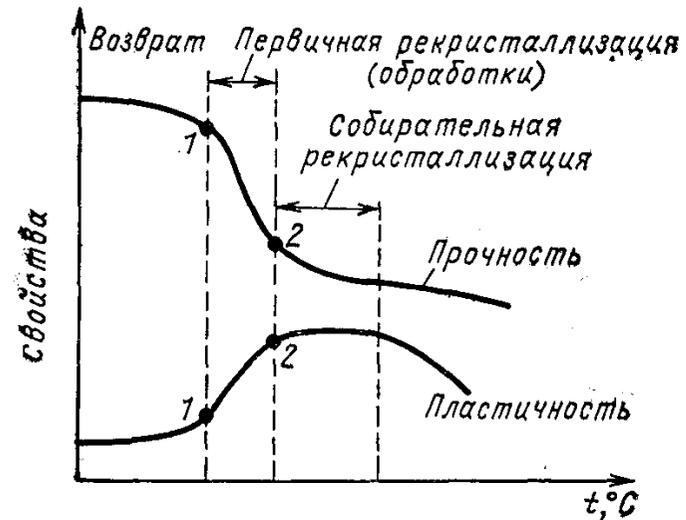


Рисунок 10 - Схема изменения свойств наклепанного металла при возврате и рекристаллизации

**Рекристаллизация.** Пластически деформированные металлы могут рекристаллизоваться лишь после деформации, степень которой превосходит определенную минимальную величину, которая называется критической степенью деформации ( $\varepsilon = \frac{H_0 - h}{H_0} 100\%$  - относительное обжатие,

где  $H_0$  - начальная высота заготовки,  $h$  - высота заготовки после обжатия). Если степень деформации меньше критической, то зарождения новых зерен при нагреве не происходит. Критическая степень деформации невелика (2 - 8%); для алюминия она близка к 2%, для железа и меди - к 5%.

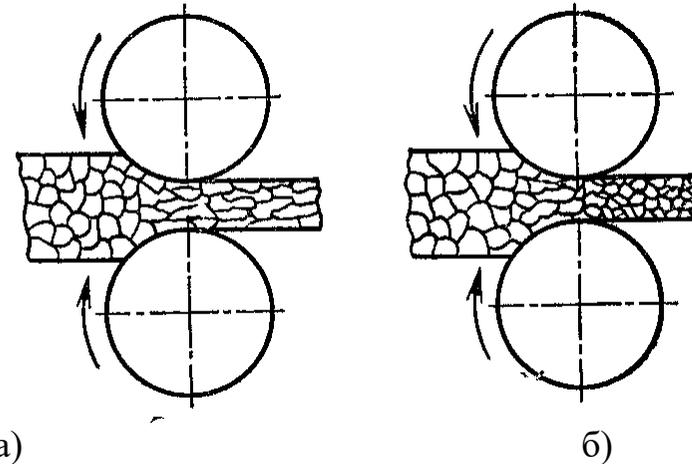
## 5. ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

В зависимости от температурно-скоростных условий деформирования различают холодную и горячую деформацию.

Обработка металла давлением при температурах выше  $t_{пр}$ , когда нет упрочнения металла, называется *горячей деформацией*. Обработка давлением при температуре ниже  $t_{пр}$  вызывает деформационное упрочнение (наклеп) металла и называется *холодной деформацией*.

*Холодная деформация* характеризуется изменением формы зерен, которые вытягиваются в направлении наиболее интенсивного течения металла (рис.11, а). При холодной деформации формоизменение сопровождается изменением механических и физико-химических свойств металла. Это явление называют упрочнением (наклепом) (механизм рассмотрен выше).

Изменения, внесенные холодной деформацией в структуру и свойства металла, не необратимы. Они могут быть устранены, например, с помощью термической обработки (отжигом).



а) б)  
Рисунок 11. Схема изменения микроструктуры металла при прокатке:

- а) холодная пластическая деформация;
- б) горячая пластическая деформация

Формоизменение заготовки при температуре выше температуры рекристаллизации сопровождается одновременным протеканием упрочнения и рекристаллизации.

*Горячей деформацией* называют деформацию, характеризующуюся таким соотношением скоростей деформирования и рекристаллизации, при котором рекристаллизация успевает произойти во всем объеме заготовки и микроструктура после обработки давлением оказывается равноосной, без следов упрочнения (рис.11, б).

Следует отметить, что рекристаллизация протекает не во время деформации, а сразу после ее окончания и тем быстрее, чем выше температура. При очень высокой температуре, значительно превышающей температуру рекристаллизации, она завершается в секунды и даже доли секунд.

Чтобы обеспечить условия протекания горячей деформации, приходится с увеличением ее скорости повышать температуру нагрева заготовки (для увеличения скорости рекристаллизации).

При горячей деформации сопротивление деформированию примерно в 10 раз меньше, чем при холодной деформации, а отсутствие упрочнения приводит к тому, что сопротивление деформированию (предел текучести) незначительно изменяется в процессе обработки давлением. Этим обстоятельством объясняется в основном то, что горячую обработку применяют для изготовления крупных деталей, так как при этом требуются меньшие усилия деформирования (менее мощное оборудование).

При горячей деформации пластичность металла выше, чем при холодной деформации. Поэтому горячую деформацию целесообразно применять при обработке труднодеформируемых, малопластичных металлов и сплавов, а также заготовок из литого металла (слитков). В то же время при горячей деформации окисление заготовки более интенсивно (на поверхности образуется слой окалины), что ухудшает качество поверхности и точность получаемых размеров.

Холодная деформация без нагрева заготовки позволяет получать большую точность размеров и лучшее качество поверхности по сравнению с обработкой давлением при достаточно высоких температурах. Отметим, что обработка давлением без специального нагрева заготовки позволяет сократить продолжительность технологического цикла, облегчает использование средств механизации и автоматизации и повышает производительность труда.

Для каждого металла и сплава существует своя температурная область холодной и горячей обработки давлением.

Пластическое деформирование железа при 600° С следует рассматривать как горячую обработку, а при 400 °С - как холодную. Для свинца и олова пластическое деформирование даже при комнатной температуре является по существу горячей обработкой, так как температура 20° С выше температуры рекристаллизации этих металлов. Эти металлы в практике называют ненаклепываемыми, хотя при деформировании у них образуются линии сдвига (что показывает, например, характерный хруст оловянной пластинки при ее изгибании).

При горячей обработке металла, чтобы увеличить его пластичность, а также чтобы устранить возможность наклепа, применяют температуры, значительно превосходящие минимальную температуру рекристаллизации.

Для отжига наклепанного материала в производственных условиях применяют более высокие температуры, чем минимальная температура рекристаллизации, для обеспечения большей скорости рекристаллизационных процессов. В табл.1 приведены теоретические температуры рекристаллизации, температуры, при которых в производственных условиях осуществляют рекристаллизационный отжиг, а также температуры горячей обработки давлением.

Рекристаллизационный отжиг чаще применяют как межоперационную термическую обработку при холодной прокатке, волочении, штамповке и т.д. (для снятия наклепа), а иногда как окончательную обработку для получения заданных свойств изделий и полуфабрикатов.

Таблица 1 - Температура рекристаллизации и горячей обработки металлов давлением

| Металл             | Температура, °С  |                                      |                                |
|--------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------|
|                    | рекристаллизации<br>(теоретическая<br>при $\alpha = 0,4$ ) | рекристаллиза-<br>ционного<br>отжига | горячей обработки<br>давлением |
| Железо . . . . .   | 450  | 600—700                              | 1300—800                       |
| Сталь . . . . .    | 450  | 600—700                              | 1300 (1100)—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                      |