

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П.КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

М. Г. Лосев

**Конспект лекций по курсу
«Теория обработки металлов давлением»**

Электронное учебное пособие

САМАРА
2011

Автор: **Лосев Михаил Григорьевич**

Лосев, М. Г. Конспект лекций по курсу «Теория обработки металлов давлением» [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / М. Г. Лосев; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,95 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Теория ОМД развивается в трех направлениях: механико-математическом, физическом и физико-химическом. Эти направления тесно связаны между собой и взаимно дополняют друг друга и рассмотрены в данном учебном пособии.

Пособие предназначено для бакалавров инженерно-технологического факультета, обучающихся по направлению 150700.62 «Машиностроение» по дисциплине «Основы теории обработки металлов давлением» и по направлению 150400.62 «Металлургия» для «Теория обработки металлов давлением» для 6 семестра.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Краткие сведения об основных технологических процессах ОМД	7
2. Природа пластической деформации	14
2.1. Строение металлов	14
2.2. Пластическая деформация монокристалла.....	17
2.2.1. Скольжение	17
2.2.2. Влияние ориентации плоскости скольжения на величину касательного напряжения при пластической деформации	19
2.2.3. Двойникование.....	23
2.2.4. Типы дислокаций и их роль в процессе пластической деформации ...	24
3. Кривые упрочнения	29
3.1. Определение.....	29
3.2. Индикаторная диаграмма.....	33
3.3. Диаграмма условных напряжений.....	36
3.4. Диаграмма истинных напряжений.....	41
3.5. Кривые упрочнения.....	43
3.6. Свойства кривых упрочнения I рода	44
3.7. Свойства кривых упрочнения II рода.....	46
3.8. Построение диаграмм истинных напряжений.....	48
3.9. Проверка правильности построения кривых упрочнения.....	51
3.10. Аппроксимация кривых упрочнения. Определение коэффициентов аппроксимирующих зависимостей	52
3.11. Свойства «единых» кривых упрочнения	57
3.12. Кривые упрочнения металлов, подвергнутых динамическому нагружению	57

ВВЕДЕНИЕ

Теория обработки металлов давлением (ОМД) – прикладная инженерная дисциплина. Она базируется на основных положениях механики сплошных сред и физики металлов.

Основной задачей дисциплины «Теория ОМД» является [] анализ и разработка общих принципиальных основ рационального построения процессов ОМД. Это дает возможность не только проектирования новых технологических процессов, но и предвидение возможных их нарушений, а следовательно принятие обоснованных мер для устранения последних.

Теория ОМД рассматривает и изучает следующие вопросы:

- термические и механические условия, при которых обеспечивается наивысшая пластичность металла и тем самым возможность максимальной деформации в конкретной операции ОМД;
- влияние обработки давлением на механические и физические свойства металлов в целях получения наилучших эксплуатационных характеристик заготовок и деталей;
- характер формоизменения заготовок при различных операциях ОМД в целях отыскивания наиболее благоприятных соотношений между размерами и формой исходных заготовок, а также между заготовкой и готовой деталью;
- сопротивление металлов пластическим деформациям при операциях ОМД с целью определения необходимых усилий и работ для осуществления этих операций, в целях правильного выбора прессового оборудования и прочностного расчета штамповой оснастки.

В настоящее время считается бесспорным, что пластичность является свойством металлов и зависит от температуры (термические условия), скорости и степени деформации, схемы напряженного состояния, внешнего трения (механические условия).

Влияние температуры на пластическую деформацию всегда рассматривают в совокупности со скоростью деформации. С увеличением температуры пластичность металла увеличивается. Однако увеличение скорости деформации может привести к снижению пластичности, несмотря на высокую температуру металла.

Пластическая деформация является эффективным способом изменения механических и физических свойств металлов. Пластической деформацией можно увеличить прочность сплавов, которые термически не упрочняются. Также пластическая деформация приводит к изменению электропроводности, коррозионной стойкости, магнитных свойств металлов и сплавов.

Теория ОМД развивается в трех направлениях: механико-математическом, физическом и физико-химическом. Эти направления тесно связаны между собой и взаимно дополняют друг друга.

Механико-математическое направление изучает распределение напряжений и деформаций в пластически деформируемом теле и условия перехода упругой деформации в пластическую.

Физическое направление теоретически и экспериментально изучает механизм перехода пластической деформации с учетом анизотропии, обусловленной кристаллическим строением металлов. Также исследуют влияние различных факторов на процесс пластической деформации, в основном температуры, степени и скорости деформации, вида напряженного состояния, внешнего трения.

Физико-химическое направление изучает связь химического состава и фазового состояния металла на процесс пластической деформации. Химический состав и фазовое состояние оказывают большое влияние на пластичность и сопротивление деформации. В процессе пластической деформации тела изменяются структура и фазовый состав, а также происходят химические превращения.

Обработка металлов давлением является завершающим этапом в производстве изделий из металлов и сплавов. Назначение данного этапа заключается в том, чтобы изменить геометрическую форму и размеры тела, а также придать ему определенные механические и физические свойства. Эта же цель в той или иной мере может быть достигнута и иными путями, главными из которых являются литье и обработка резаньем. Вопрос о выборе вида обработки металлов для получения изделий с необходимыми механическими и физико-химическими свойствами определяется технико-экономическими соображениями применительно к конкретным условиям производства.

Типичным является применение всех трех упомянутых способов обработки в такой последовательности: литье; обработка давлением; обработка резаньем (по возможности в качестве отделочной операции).

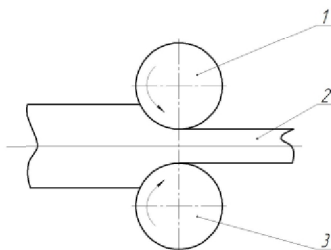
1. Краткие сведения об основных технологических процессах ОМД

В данном разделе рассматриваются краткие сведения о технологических процессах ОМД, которые будут использованы при изложении данного курса. Детально теорию и технологию этих процессов будут рассматривать в разделах соответствующих специальных курсов.

Прокатка металла. Сущность процесса прокатки заключается в том, что заготовка или слиток вследствие сил трения втягивается вращающимися валками в зазор между ними и обжимается. При этом изменяются форма и размеры поперечного сечения тела и, как правило, увеличиваются его продольные размеры. Существуют три основных способа прокатки, имеющих определенное отличие по характеру выполнения деформации: продольная, поперечная и поперечно-винтовая прокатка.

При продольной прокатке деформация металла осуществляется между вращающимися в разные стороны валками (рисунок 1.1). При продольной прокатке заготовка в поперечном сечении приобретает форму зазора между валками (сортовой, листовой прокат).

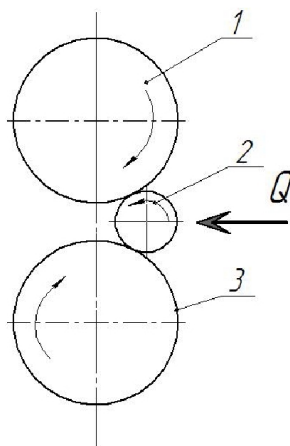
При поперечной прокатке (рисунок 1.2) оси прокатных валков и прокатываемого тела параллельны (или пересекаются под небольшим углом). Оба валка вращаются в одном направлении, а заготовка круглого сечения – в противоположном. В процессе поперечной прокатки обрабатываемое тело удерживается в валках с помощью специального приспособления.



1-верхний валок; 2-прокатываемая полоса; 3-нижний валок

Рисунок 1.1- Схема продольной прокатки

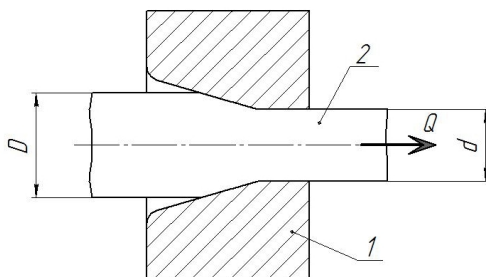
Обжатие заготовки по диаметру и придание ей требуемой формы сечения обеспечивается соответствующей профилировкой валков изменением расстояния между ними. Данным способом изготавливают изделия, представляющие собой тела вращения: шары, оси, шестерни и пр.



1-верхний валок; 2-прокатываемое изделие; 3-нижний валок

Рисунок 1.2-Схема поперечной прокатки

Волочение металла – это протягивание прутка круглого сечения или другой формы через отверстие волоचильного очка (волоку), выходящие размеры сечения которого меньше сечения исходного продукта. Волочение выполняется тяговым усилием, приложенным к переднему концу обрабатываемого тела (рисунок 1.3).

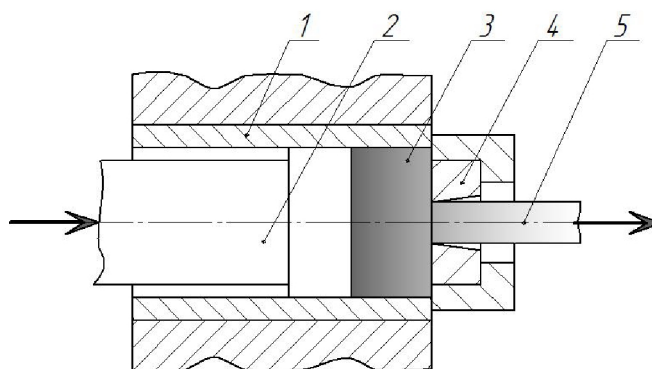


1-волока; 2-пруток

Рисунок 1.3-Схема процесса волочения

Данным способом получают проволоку всех видов, прутки с высокой точностью поперечных размеров и трубы разнообразных сечений.

Прессование металла. При прессовании металл, заключенный в контейнер, выдавливается через отверстие в матрице и получает форму поперечного сечения, соответствующего форме отверстия матрицы (рисунок 1.4).



1-контейнер; 2-пресс-штемпель; 3-заготовка; 4-матрица;
5-прессизделие

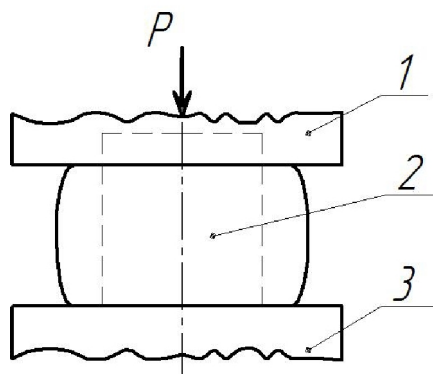
Рисунок 1.4-Схема прессования с прямым истечением

Прессованием получают разнообразный сортамент профилей, прутков, труб из цветных и черных металлов.

Различают несколько видов прессования: с прямым, обратным, боковым и комбинированным истечением.

Ковка и объемная штамповка. При свободной ковке деформация металла осуществляется между бойками. Нижний боек неподвижен, верхний совершает возвратно-поступательное движение. В результате многократного воздействия инструмента заготовка приобретает необходимую форму и размеры изделия. Основными операциямиковки являются: осадка, высадка, прошивка, протяжка и т.д.

Осадкой называют формоизменяющую операцию, в процессе которой производится уменьшение высоты заготовки при увеличении площади ее поперечного сечения (рисунок 1.5).

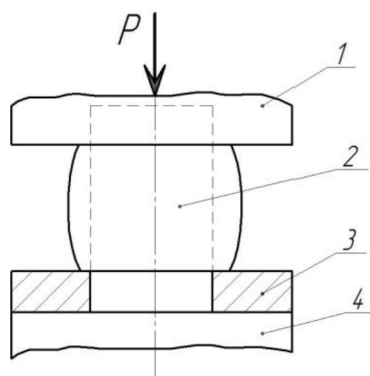


1-верхний боек; 2-заготовка; 3-нижний боек

Рисунок 1.5-Схема процесса осадки

Осадка заготовки или слитка с хвостовиком (высадка) для получения поковок с местным утолщением. В качестве инструмента применяют плоские и вогнутые плиты, причем в нижней плите есть отверстие для хвостовика (рисунок 1.6).

Протяжкой называют формоизменяющую операцию, в процессе которой производится удлинение заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения. Протяжка способствует устранению внутренних

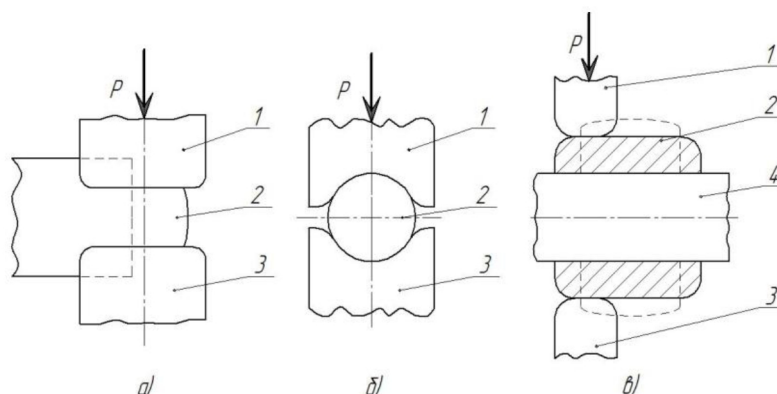


1-верхний боек; 2-заготовка; 3-подкладное кольцо; 4-нижний боек

Рисунок 1.6-Схема процесса высадки

дефектов (пустот) и улучшает механические свойства металла в осевом направлении заготовки.

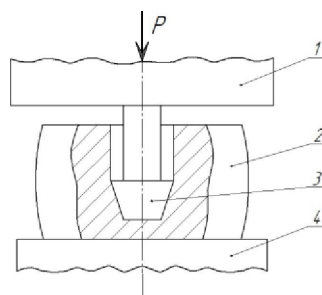
Протяжка производится на плоских бойках, в вырезных бойках, протяжка на оправке (рисунок 1.7).



1-верхний боек; 2-заготовка; 3-нижний боек; 4-оправка

Рисунок 1.7-Схемы процесса протяжки: а) протяжка на плоских бойках; б) протяжка в вырезных бойках; в) протяжка на оправке

Прошивка - это получение полостей в заготовке за счет вытеснения материала. Прошивка бывает открытой и закрытой. При открытой прошивке боковая поверхность заготовки является свободной, при закрытой - заготовка заключена в контейнер, определяющий ее наружный диаметр после прошивки.

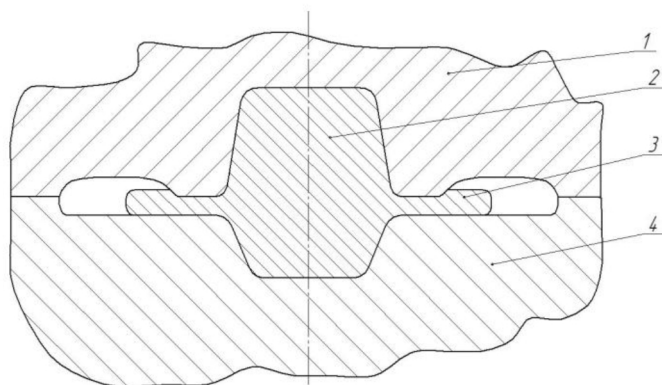


1-верхний боек; 2-заготовка; 3-прошивень; 4-нижний боек

Рисунок 1.8-Схема процесса свободной прошивки

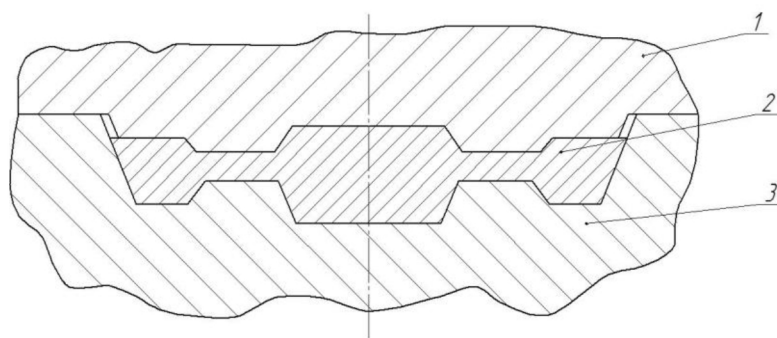
Схема процесса свободной прошивки представлена на рисунке 1.8.

При объемной горячей штамповке заготовку помещают в полость одной части штампа и под действием другой части штампа, заготовка деформируется и заполняет полость, принимая ее форму. Различают два вида объемной штамповки: открытую (рисунок 1.9) и закрытую (рисунок 1.10). В закрытой объемной штамповке объем заготовки равен объему детали. В открытой объемной штамповке объем заготовки больше объема детали и часть металла, по мере заполнения полости штампа, вытекает в заусенец.



1-верхняя часть штампа; 2-изделие; 3-заусенец; 4-нижняя часть штампа

Рисунок 1.9-Схема открытой объемной штамповки



1-верхняя часть штампа; 2-изделие; 3-нижняя часть штампа

Рисунок 1.10-Схема закрытой объемной штамповки

Листовая штамповка представляет собой процесс получения полых изделий из листового, ленточного и полосового металла без значительного изменения толщины заготовки.

Основные операции листовой штамповки - вытяжка без утонения стенки, гибка, отбортовка, обжим, раздача и другие операции. Некоторые операции листовой штамповки представлены на рисунке 1.11.

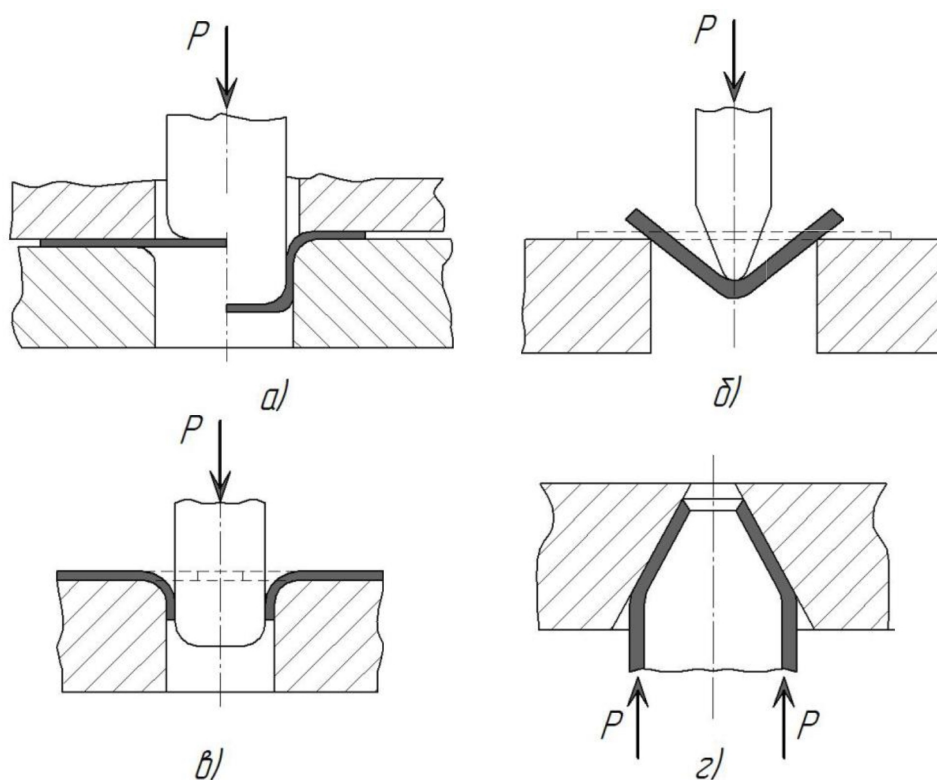


Рисунок 1.11- Схемы операций листовой штамповки: а) вытяжка без утонения стенки; б) гибка; в) отбортовка; г) обжим

Многообразие по форме и размерам получаемых листовой штамповкой изделий определяет значительное количество штамповочных операций, отличающихся характером изменения формы заготовки, а следовательно, и условиями деформации металла при выполнении данной технологической операции.

2. Природа пластической деформации

2.1. Строение металлов

Все металлы и сплавы имеют кристаллическое строение. Оно характеризуется закономерным и периодичным расположением атомов в пространстве, при котором каждый атом находится в идентичном окружении соседних.

Рентгенограммы металлов показывают, что атомы в них расположены по прямым линиям и по плоскостям образуя пространственную кристаллическую решетку.

Кристаллическая решетка представляет собой трехмерную сетку из прямых линий. В точках пересечения линий, называемых узлами, размещены атомы. Точнее, узлы являются центрами, относительно которых происходят тепловые колебания атомов. Пространственная кристаллическая решетка состоит из элементарных ячеек.

Большинству промышленных металлов свойственны три типа кристаллических решеток (рисунок 2.1):

- объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку;
- гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку;
- гексагональную плотноупакованную (ГПУ) решетку.

Решетку ОЦК имеют, например, металлы:

α – и β – железо, ванадий, вольфрам, молибден, хром, тантал, литий и другие.

Решетку ГЦК имеют металлы: γ – железо, медь, алюминий, никель, свинец, β – кобальт, серебро, золото, платина и другие.

Решетка ГПУ свойственна бериллию, кадмию, кобальту, α – титану, цинку и другим металлам.

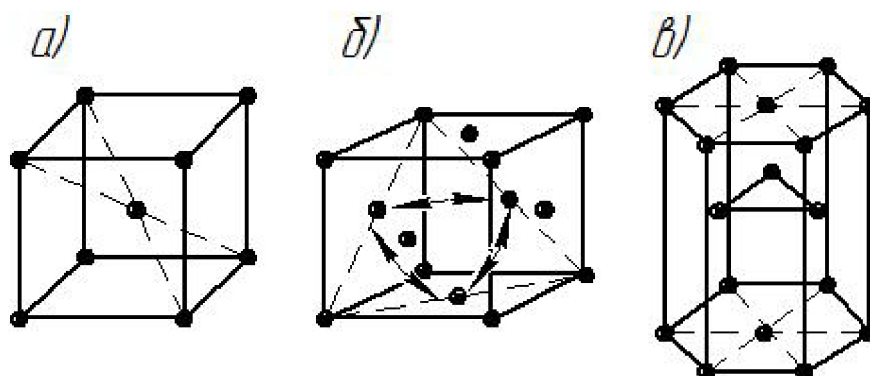


Рисунок 2.1 – Типы пространственных решеток: а) объемно-центрированная кубическая; б) гранецентрированная кубическая; в) гексагональная плотноупакованная

Позволяющее большинство металлов, применяемых в машиностроении, имеют решетку указанных трех типов. Исключением являются олово, марганец, церий, имеющие тетрагональную решетку, и мышьяк, сурьма, висмут, кристаллизующиеся в ромбоэдрическую решетку. Как показывают сами названия, базой решетки последних двух типов являются треугольник и ромб.

Для определения плоскостей, которые можно провести в кристаллической решетке, а также для определения кристаллографических направлений принята система индексаций.

Кристаллографические плоскости обозначаются тремя или четырьмя цифрами в круглых скобках. Цифры представляют собой обратную величину отрезков отсекаемых на координатных осях (рисунок 2.2). Единица измерений - параметр решетки (расстояние между узлами).

Индексация кристаллографических направлений осуществляется следующим образом. Линию направления переносят в начало координат. Положение прямой в пространстве определяется координатами первого

атома, лежащего на этой прямой. Координаты атома записываются в квадратные скобки (рисунок 2.3). Единица измерения – параметр решетки.

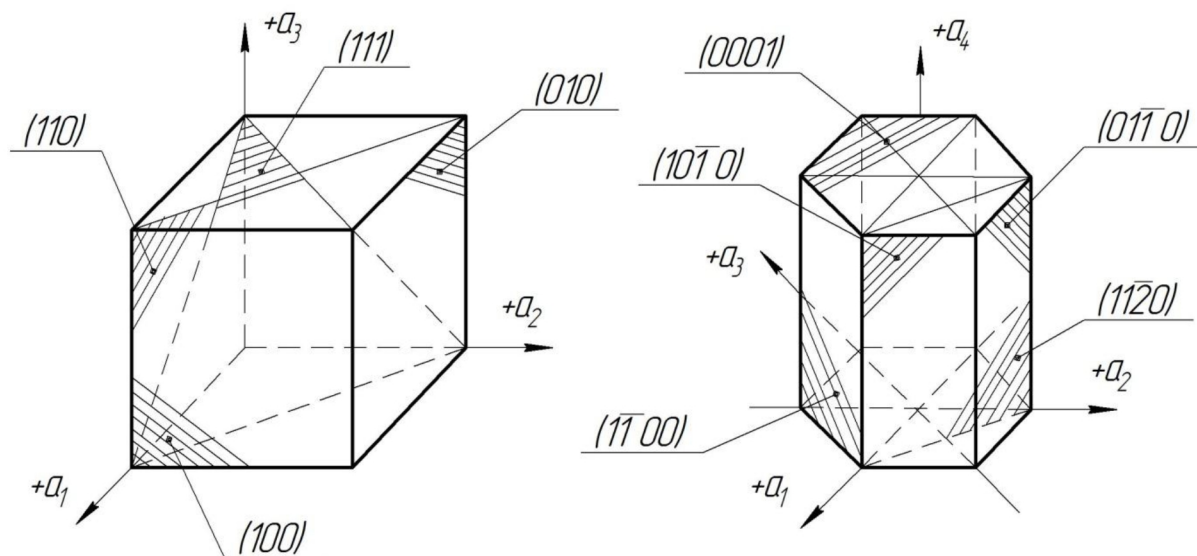


Рисунок 2.2 – Индексация кристаллографических плоскостей

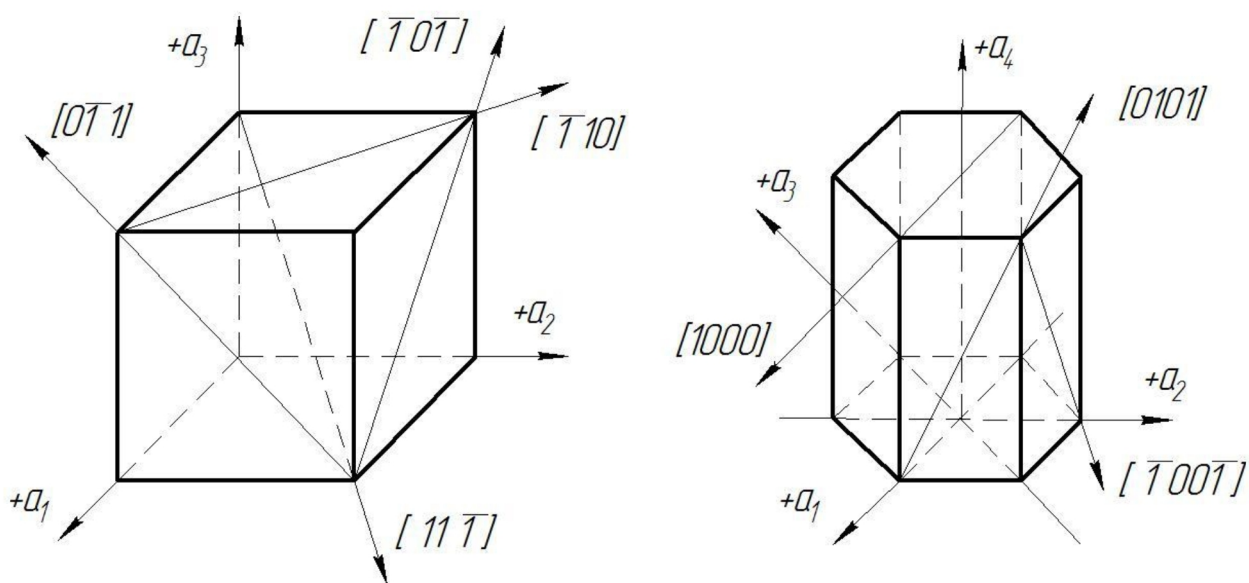


Рисунок 2.3 – Индексация кристаллографических направлений

Если для всего объема кристаллического тела характерно постоянство кристаллографических направлений, то тело называют монокристаллом.

Монокристалл обладает анизотропией свойств, т.к. расстояние между атомами в разных направлениях различные.

Все технические металлы имеют поликристаллическое строение, т.е. представляют собой множество спаянных между собой кристаллитов (зерен) неправильной формы. Нерастворимые примеси, чаще всего окислы и силикаты, располагаются по границам спайности зерен, образуя так называемое межкристаллическое (межзеренное) вещество. Форма и размеры зерен зависят от условий кристаллизации и последующей обработки. Зерна ориентированы совершенно произвольно. Разнообразная и беспорядочная ориентировка кристаллографических направлений в различных зернах поликристаллического тела позволяет рассматривать тело как изотропное.

2.2. Пластическая деформация монокристалла

Для понимания процессов деформации реальных металлов, являющихся поликристаллическими телами, целесообразно вначале рассмотреть закономерности деформации монокристаллов.

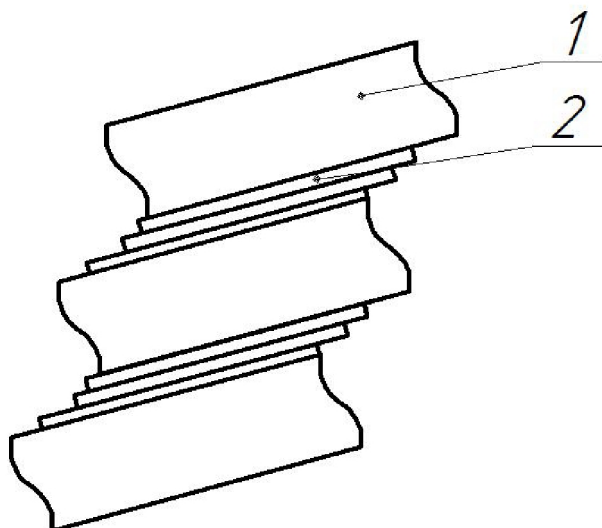
Экспериментально установлено, механизмами пластической деформации кристаллов являются скольжение (трансляция) и двойникование. Преобладающим механизмом, свойственным кристаллам с кубической и гексагональной решеткой, является скольжение.

2.2.1. Скольжение

Скольжение представляет собой параллельное смещение тонких слоев монокристалла относительно друг друга. Движение охватывает ряд плоскостей или тончайших слоев (полосы скольжения), в промежутках между которыми элементы пластической деформации отсутствуют.

(рисунок 2.4).

Экспериментально установлено, что полосы скольжения отстоят одна от другой в среднем на расстоянии около 1 мкм [], в то время как расстояния между соседними атомными плоскостями выражаются величиной порядка $1\cdot 10^{-4}\text{ мкм}$.



1-участок отсутствия скольжения; 2-участок скольжения

Рисунок 2.4 - Схема пластического скольжения при деформации монокристалла

Скольжение происходит по кристаллографическим плоскостям, которые называются плоскостями скольжения. Плоскостями скольжения обычно являются плоскости с наибольшей плотностью размещения атомов, а направлениями скольжения являются направления, по которым межатомные расстояния имеют минимальную величину.

Например, в металлах с решеткой ОЦК плоскостями скольжения являются плоскости типа (111) , а направлениями скольжения направления типа $[101]$.

В металлах с решеткой ГЦК скольжение может осуществляться по плоскостям несколько типов (112), (123) и (110). Направлениями скольжения является направление [111].

В металлах с решеткой ГПУ плоскостью скольжения обычно бывает плоскость (0001), а направлением скольжения является диагональ шестиугольника [1120]. С повышением температуры увеличиваются амплитуды колебаний атомов, и в металлах с решеткой ГПУ появляется возможность скольжения по плоскостям типа $(10\bar{1}1)$ и $(10\bar{1}2)$.

Внешним проявлением скольжения в металлах обычно считают линии скольжения или линии Чернова-Людерса, наблюдаемые на практике. Если поверхность образца или заготовки полированная или покрыта твердой окисной пленкой, то в месте выхода плоскости скольжения на поверхность, образуется микротрещина. Совокупность таких трещин приводит к образованию сетки, состоящей из двух семейств линий, пересекающихся под прямым углом друг с другом. Впервые эти линии описаны В.Людерсом и Д.Черновым.

2.2.2. Влияние ориентации плоскости скольжения на величину касательного напряжения при пластической деформации

Рассмотрим растяжение образца из монокристалла усилием P . Площадь поперечного сечения образца обозначим через F_0 . Плоскость скольжения, площадью F , расположим произвольно, у которой нормаль с осью образца составляет угол φ (рисунок 2.5).

$$\tau = \frac{P}{F} \cdot \cos \gamma,$$

Рисунок 2.5 – Схема к определению касательного напряжения при растяжении монокристалла

Величина касательного напряжения в плоскости скольжения определяется из выражения:

$$\tau = \frac{P}{F_0} \cdot \cos\varphi \cdot \cos\gamma.$$

где γ - угол между направлением скольжения и силой P .

В свою очередь $F \approx F_0 / \cos\varphi$, тогда:

$$\tau = \frac{P}{F_0} \cdot \cos\varphi \cdot \cos\gamma.$$

Величина $P/F_0 = \sigma_1$, где σ_1 – нормальное напряжение действующее вдоль образца. Следовательно:

$$\sigma_s = \frac{\tau_{кр}}{\cos\varphi \cdot \cos\gamma}.$$

Для того, чтобы началась пластическая деформация при линейном напряженном состоянии, нормально напряжение σ_1 должно достигнуть предела текучести σ_s . Тогда касательное напряжение достигает критического значения $\tau_{кр}$. Отсюда выражение (2.1) можно переписать в виде:

$$\sigma_s = \frac{\tau_{кр}}{\cos\varphi \cdot \cos\gamma}.$$

Касательное напряжение, необходимое для начала пластической деформации, величина постоянная для данного металла, при данной температуре и скорости деформации $\tau_{кр} = \text{const}$, не зависящая от ориентировки плоскостей скольжения относительно действующих на тело сил. Построим график зависимости $\sigma_s = f(\cos\varphi \cdot \cos\gamma)$ (рисунок 2.6).

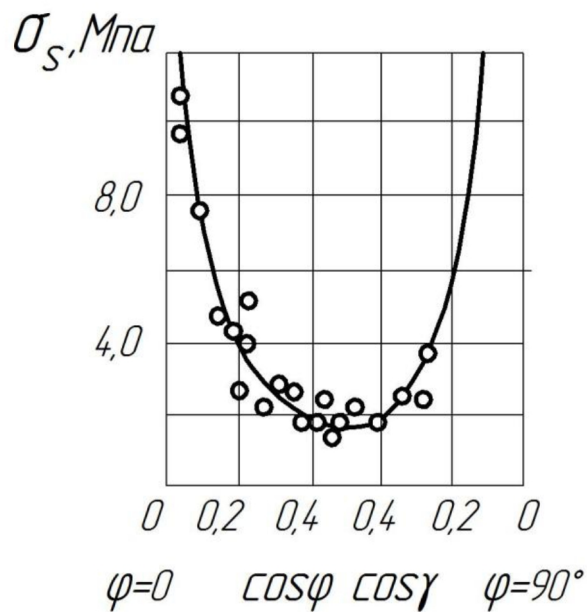


Рисунок 2.6 – Зависимость предела текучести монокристалла от ориентировки плоскостей скольжения

Из графика видно, что величина предела текучести монокристалла для каждого металла существенно зависит от ориентировки плоскостей скольжения относительно направления действия сил, имея минимум при углах $\varphi=\gamma=45^\circ$.

Результаты экспериментального определения зависимости σ_s (сопротивления деформации) от ориентировки монокристалла с гексагональной решеткой нанесены в виде точек на рисунке 2.6.

Совокупность плоскости и направления скольжения называют системой скольжения. При наличии нескольких систем скольжения в монокристалле сдвиг начинается в плоскости, наиболее благоприятно расположенной относительно действующей силы. Как было показано, касательное напряжение достигает максимального значения в плоскости расположенной под углом 45° к действующей силе. Следовательно, скольжение начинается в плоскости скольжения, нормаль к которой образует

45° с осью растяжения или сжатия. Тогда угол между осью образца и направлением скольжения будет равен также 45°.

При деформации монокристалла происходит поворот систем скольжения. При растяжении угол между нормалью к плоскости скольжения и направлением оси растяжения увеличивается и направление скольжения приближается к оси растяжения. Это видно на модели растяжения монокристалла с решеткой ГПУ (рисунок 2.7).

При сжатии угол между нормалью к плоскости скольжения и направлением сжимающей силы уменьшается (рисунок 2.8).

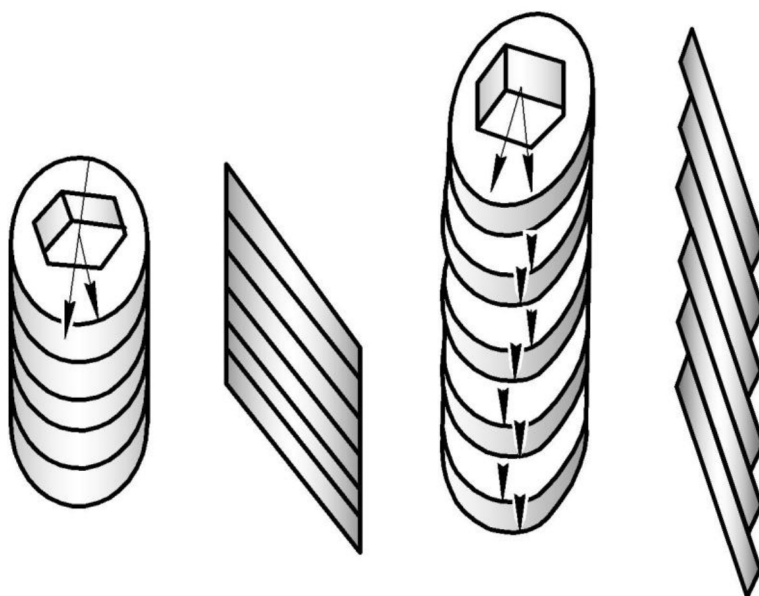


Рисунок 2.7 – Схема скольжения при растяжении монокристалла: а – исходное положение; б – после растяжения

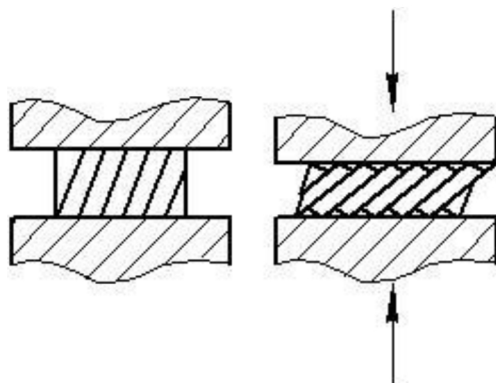


Рисунок 2.8 – Поворот плоскостей скольжения при сжатии

Поворот систем скольжения приводит к тому, что система, расположенная сначала благоприятно (углы γ и ϕ близки к 45°), занимает неблагоприятное положение, при этом касательные напряжения уменьшаются. В то же время другая возможная система скольжения вследствие поворота приближается к благоприятному положению.

2.2.3. Двойникование

Наряду с основным механизмом пластической деформации металлов – скольжением в некоторых металлах деформация происходит путем двойникования.

Двойникование представляет собой смещение атомов, расположенных в плоскостях, параллельных некоторой плоскости, называемой плоскостью двойникования, на расстояния, пропорциональные расстоянию этих плоскостей от плоскости двойникования (рисунок 2.9).

При двойниковании части кристалла переходят в положение, симметричное остальной части кристалла относительно плоскости двойникования. Двойникование редко наблюдается при статическом нагружении и значительно чаще при деформации ударом.

При двойниковании не происходит непрерывного изменения ориентировки плоскостей, как при скольжении. Переход решетки в новое положение происходит почти мгновенно и сопровождается часто характерным потрескиванием. Двойникование может возникнуть не только при воздействии внешних сил на деформируемое тело, но и в результате отжига после пластической деформации. Такое явление наблюдается, в частности, у меди, латуни и некоторых других металлов с решеткой ГЦК.

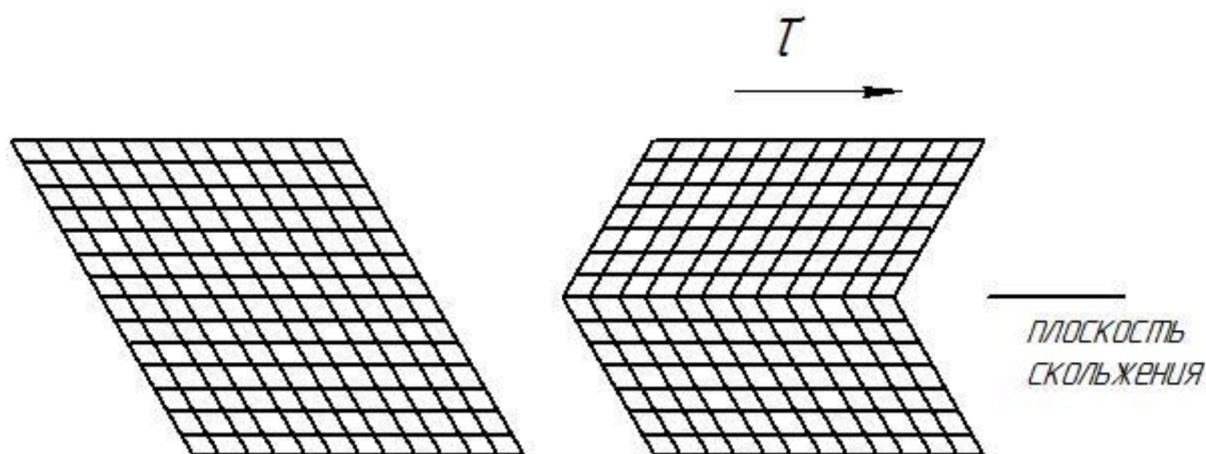


Рисунок 2.9 – Перемещение решетки при двойниковании: а – до деформации;
б – после деформации

Плоскостями двойникования являются плоскости (112) у металлов с решеткой ОЦК, для металлов с решеткой ГЦК – плоскость (111) и для металлов с решеткой ГПУ – плоскость $(10\bar{1}2)$.

Двойникованием может быть получена незначительная степень деформации. Этот механизм сопутствует основному механизму – скольжению.

2.2.4. Типы дислокаций и их роль в процессе пластической деформации

Скольжение в металлических кристаллах нельзя рассматривать как одновременный сдвиг одной части монокристалла относительно другой по всей плоскости скольжения. Расчеты показывают, что для такого смещения в идеальном кристалле необходимо создать напряжения в сотни раз превышающие величины, найденные из опыта. В таблице 2.1 приведены фактические и теоретические значения критического касательного напряжения при скольжении [].

Большая разница между теоретической и действительной величинами критического касательного напряжения при деформации кристаллов приводит к выводу, что представление о механизме скольжения как одновременном сдвиге по плоскости скольжения не соответствуют действительной картине процесса.

Таблица 2.1 – Фактические и теоретические значения критического касательного напряжения при скольжении

Металл	Фактическое значение $\tau_{кр}$, МПа	Теоретическое значение $\tau_{кр}$, МПа
Алюминий	1,2 – 2,4	900
Медь	10,0	1540
Никель	5,8	2600
Железо	29,0	2300

Отличие фактических значений $\tau_{кр}$ от теоретических объясняется тем, что в реальных кристаллах имеются места ослабленных связей между атомами, обусловленных несовершенствами кристаллической решетки.

В реальных металлах присутствуют дефекты кристаллического строения четырех типов:

- точечные (вакансии и внедренные атомы посторонних примесей);
- линейные (дислокации);
- поверхностные (границы зерен, границы двойников, границы фаз);
- объемные (пустоты и различные объемные включения).

Возможность последовательного смещения отдельных групп атомов вдоль плоскости скольжения при уменьшенных напряжениях возникает вследствие наличия линейных дефектов кристаллической решетки – дислокаций.

Появление элементов теории дислокаций относится к 20-м годам прошлого столетия (работы Я.И.Френкиля, Дж.Тейлора, Е.Орована и др.). однако экспериментальное подтверждение существования дислокаций получено лишь в 50-х годах благодаря развитию экспериментальных средств исследования строения кристаллов. Существование дислокаций было подтверждено как прямыми методами исследования (с помощью ионного проектора, рентгеновской топографии, электронно-микроскопического исследования), так и косвенными методами исследования (метод ямок травления, муаровых фигур и др.).

Основными типами дислокаций, встречающихся в реальных монокристаллах, являются краевая и винтовая дислокации.

Краевая дислокация представляет собой несовершенство решетки, когда по одну сторону от плоскости скольжения количество атомных плоскостей, перпендикулярных к плоскости скольжения, больше чем по другую (рисунок 2.10). из рисунка видно, что выше плоскости скольжения δ имеется добавочная плоскость α перпендикулярная плоскости скольжения. Линию bc пересечения добавочной плоскости с плоскостью скольжения называют линией дислокации.

Краевая дислокация считается положительной (обозначается $\perp$), если дополнительная плоскость находится выше плоскости скольжения, и отрицательной (обозначается $\top$), если дополнительная плоскость расположена ниже плоскости скольжения. Наибольшее нарушение правильности взаимного расположения атомов наблюдается вблизи линии дислокации. Таким образом, вблизи дислокации возникает силовое поле с повышенным уровнем потенциальной энергии.

Под действием касательных напряжений τ , действующих параллельно плоскости скольжения, краевая дислокация способна перемещаться. Элементарный акт смещения краевой дислокации на одно межатомное расстояние схематично показан на рисунке 2.11.

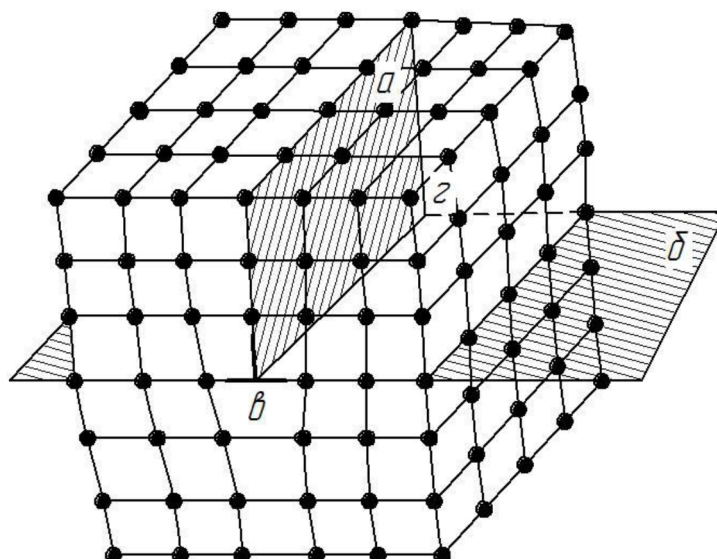


Рисунок 2.10 – Схема краевой дислокации

Перемещение краевой дислокации состоит в том, что дополнительной плоскостью становятся поочередно плоскости параллельные плоскости av (рисунок 2.). Штриховыми линиями на рисунке 2. показано, как первоначальная линия плоскости av замыкается на расположенную ниже плоскости скольжения плоскость bc , а лишней плоскостью становится плоскость a_1b_1 .

Пробег краевой дислокации от одной боковой поверхности кристалла дает смещение верхней части кристалла относительно нижней.

Винтовую дислокацию схематически можно представить следующим образом: часть кристаллической решетки разрезана по плоскости скольжения, и разделенные участки смещены один относительно другого на одно межатомное расстояние (рисунок 2.12).

В области винтовой дислокации кристаллографические плоскости, перпендикулярных плоскости скольжения, получают изгиб.

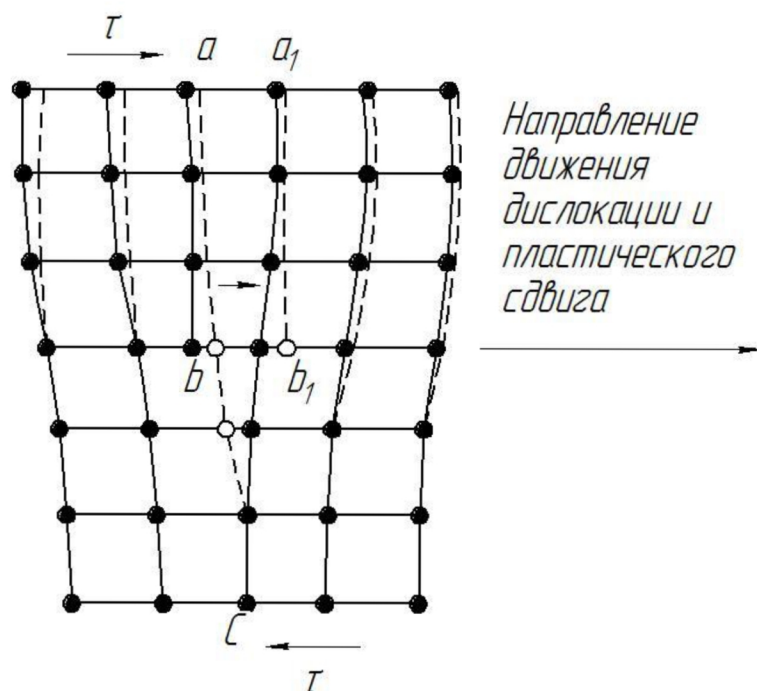


Рисунок 2.11 – Схема перемещения краевой дислокации на одно межатомное расстояние

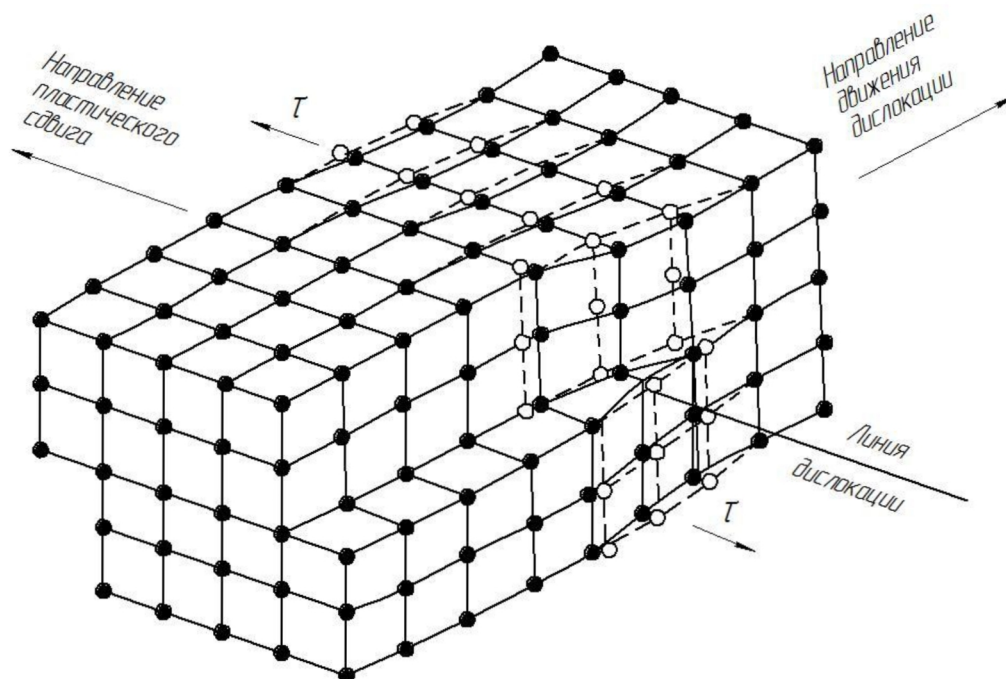


Рисунок 2.12 – Схема винтовой дислокации

3. Кривые упрочнения

3.1. Определение

В процессах обработки металлов давлением под действием приложенных усилий заготовка деформируется, то есть изменяет свою форму и размеры.

Если после снятия нагрузки форма и размеры тела восстанавливаются, то такая деформация носит название упругой, если же нет – необратимой, пластической.

Так например, в процессе растяжения цилиндрического стержня под нагрузкой P происходит изменение его размеров: увеличивается длина l на величину Δl и уменьшается площадь поперечного сечения F на величину ΔF (рисунок 3.1).

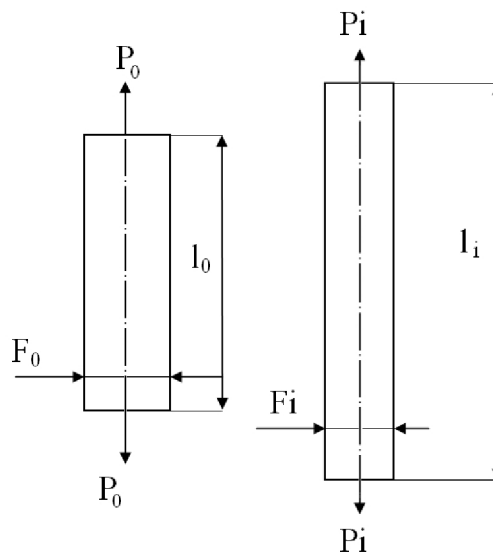


Рисунок 3.1 - Изменение размеров образца в процессе его растяжения

$$\Delta l_i = l_i - l_0; \Delta F_i = F_0 - F_i$$

В процессе пластической деформации в каждый последующий момент времени, чтобы продолжить процесс, приходится прикладывать возрастающее усилие.

Эффект повышения усилия (нагрузки) в процессе пластической деформации носит название «упрочнение металла».

Если бы металл в процессе пластической деформации не упрочнялся, то его деформация осуществлялась бы при постоянной нагрузке. Для рассматриваемого примера - растяжения образца - диаграмма $P_i - \Delta l_i$ представлена на рисунке 3.2.

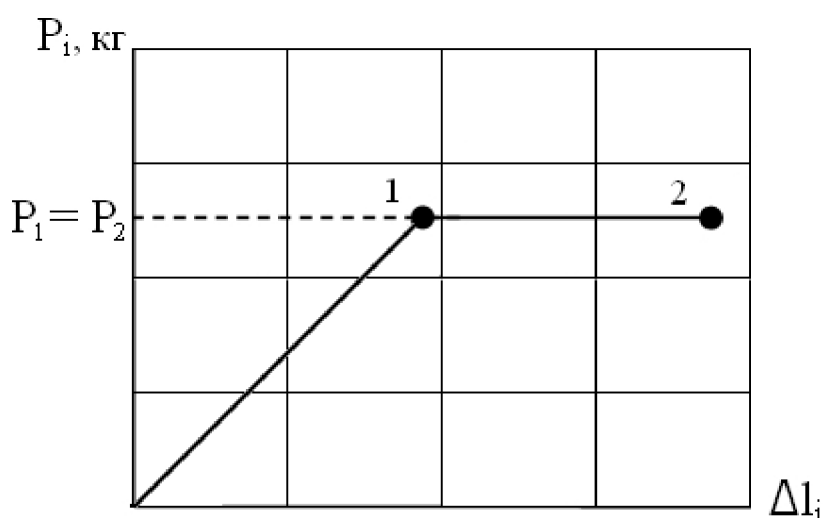


Рисунок 3.2 – Диаграмма $P_i - \Delta l_i$
при испытании на растяжение образца из неупрочняемого материала;
 $P_1 = P_2$

Деформации, соответствующие точкам 1 и 2, достигаются при одной из той же нагрузке P . Металл не упрочняем.

Диаграмма $P_i - \Delta l_i$ для упрочняемого металла имеет вид, приведенный на рисунке 4.3.

Деформации, соответствующие точкам 1 и 2, требуют возрастающей нагрузки: $P_2 > P_1$. Материал упрочняем. Упрочнение металла в процессе

пластической деформации можно выразить и другими эффектами, например, наклепом металла, то есть повышением его твердости рисунок 3.4.

Упрочнение, наклеп или повышение твердости металла – явления, которые сопровождают холодную пластическую деформацию. Эти явления связаны с природой – механизмом пластической деформации. По одной из гипотез в основе пластической деформации - перемещение дислокаций. Их «переползание» через «препятствия» для продолжения пластической деформации требует увеличения нагрузки. По другой гипотезе пластическая деформация связана со скольжением одной части кристалла относительно другой. Это скольжение в первую очередь происходит по плоскостям, наиболее благоприятно ориентированным к направлению нагрузки, то есть по плоскостям, где возникают максимальные касательные напряжения. Чтобы привести в скольжение другие плоскости, отличные от плоскостей с $\tau_{\max}$, нужно увеличить нагрузку.

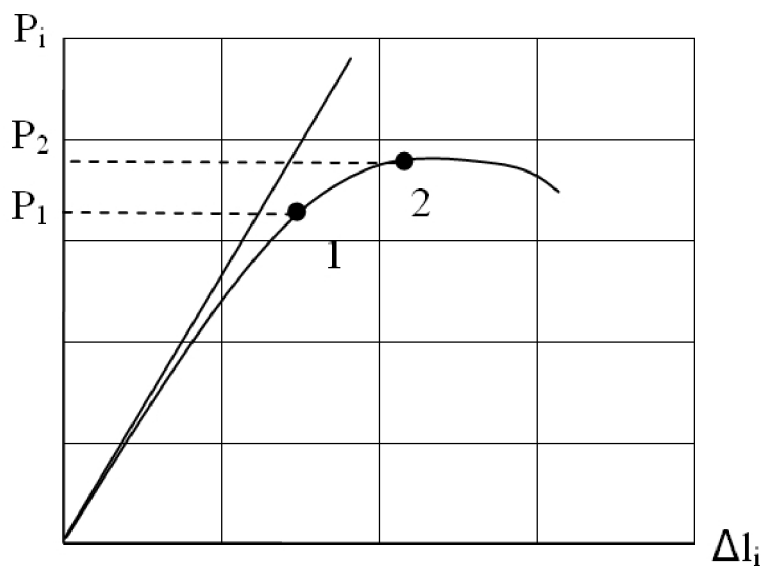


Рисунок 3.3 – Диаграмма

$P_i - \Delta l_i$ при испытании на растяжение образца из упрочняемого материала;
 $P_2 > P_1$

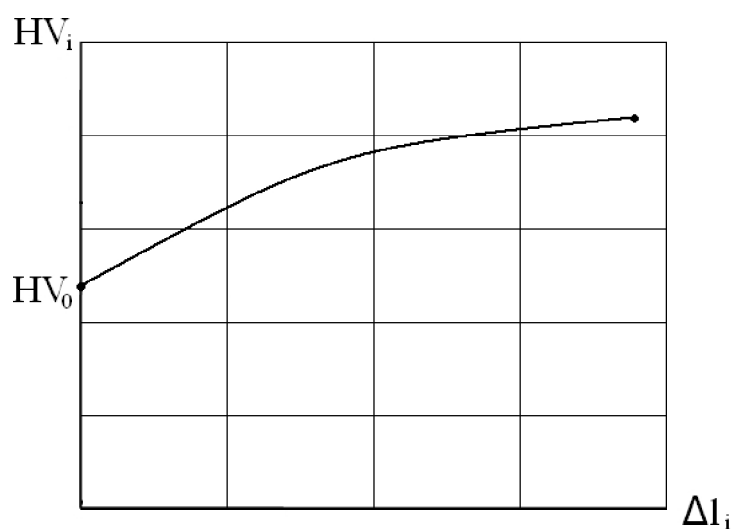


Рисунок 3.4 – Повышение твердости HV_i материала образца в результате его пластической деформации

При пластической деформации одни зерна действуют на другие, происходит их дробление. Изменение структуры металла при пластической деформации (измельчение зерен, то есть получение мелкозернистой структуры) приводит к повышению твердости металла, к так называемому его наклёпу. Для одних металлов упрочнение выражено в большой степени, для других -незначительно.

Не упрочняются, например, металлы, деформируемые при $T > T_{\text{рекр}}$. (горячая обработка металлов давлением).

При проектировании «холодных» процессов ОМД необходимо учитывать упрочнение металла. Неучёт упрочнения может привести к ошибкам в расчетах, превышающим 30 % от истинных значений.

Цель настоящего пособия – дать студентам представление об явлении «упрочнения» и его учёту при расчёте, проектировании и моделировании процессов ОМД.

3.2. Индикаторная диаграмма

Исходным материалом, отражающим упрочнение металла, является индикаторная или машинная диаграмма, получаемая при испытании стандартных образцов на статическое растяжение (ГОСТ 1497-88).

Образцы закрепляют в губках испытательной машины и подвергают растяжению. Специальный измерительный механизм испытательной машины записывает машинную (индикаторную) диаграмму: усилие – удлинение ($P_i - \Delta l_i$). На рисунке 3.5 в качестве примера приведена реальная диаграмма, полученная на испытательной машине Testometric при растяжении алюминиевого (АМгбМ) образца с исходными размерами $\varnothing = 10$ мм, $l = 100$ мм.

На индикаторной диаграмме (рисунок 3.6) можно выделить два участка – упругий «ос» (в пределах которого действует закон Гука) и пластический «сde», сопровождающейся упрочнением металла. Точка d на диаграмме соответствует P_{max} и разделяет пластическую область в свою очередь на два участка: 1 $dP > 0$ и 2-й (после m.d) $dP < 0$.

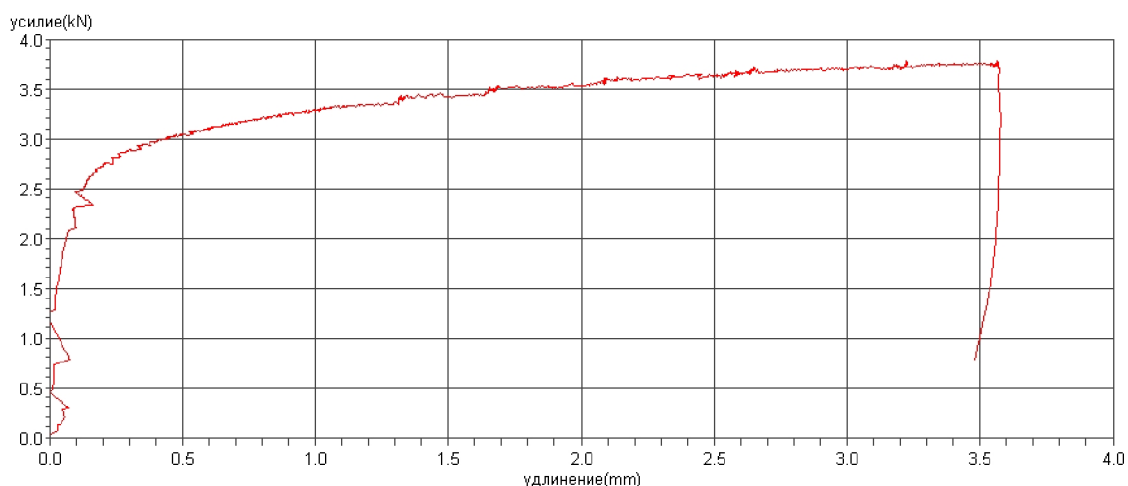


Рисунок 3.5 – Индикаторная (машинная) диаграмма растяжения цилиндрического образца

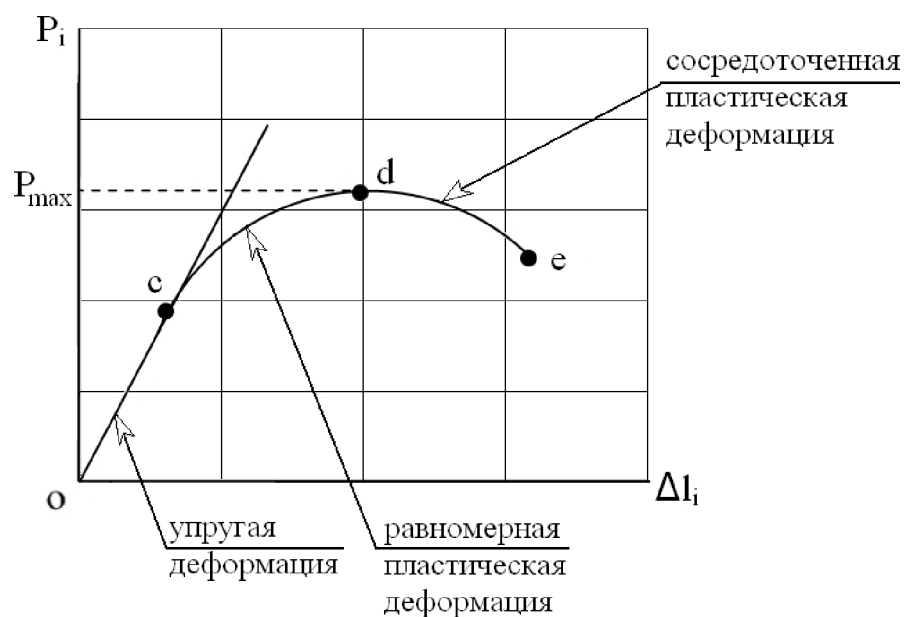


Рисунок 3.6 - Индикаторная диаграмма $P_i - \Delta l_i$. Участок oc – упругая деформация; участок cde - пластическая; cd – равномерная; de – сосредоточенная деформации

На первом участке все сечения (1-1; 2-2; 3-3...) образца деформируются одинаково (рисунок 3.7) – Это так называемая стадия равномерной деформации. При дальнейшем растяжении (после $m.d$) деформация сосредотачивается на узком участке, называемом шейкой образца (рисунок 3.8). Все участки удалённые от шейки образца уже не деформируются. Деформация сосредотачивается в шейке. Эта ветвь диаграммы (участок de) носит название участок сосредоточенной деформации.

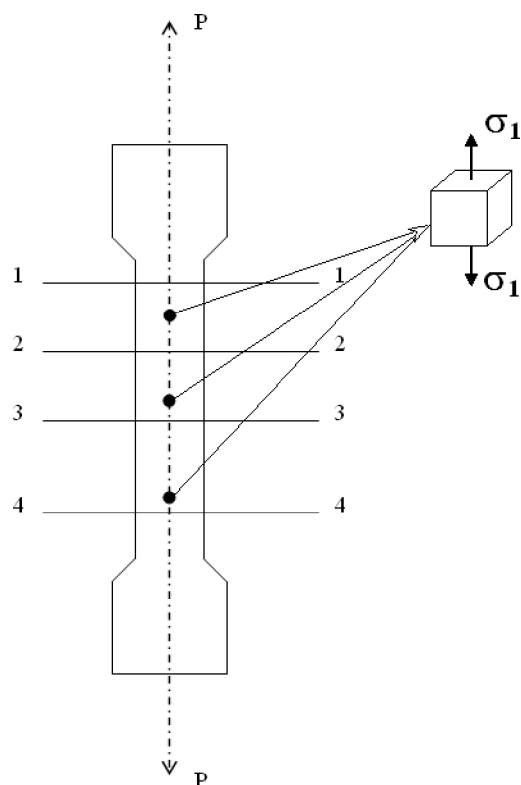


Рисунок 3.7 - Растяжение образца - стадия равномерной деформации

$$\Delta F_{1-1} = \Delta F_{2-2} = \Delta F_{3-3} = \Delta F_{4-4}$$

В области равномерной деформации, во всех сечениях существует одноосное (линейное) напряженное состояние, в сосредоточенной – объемное.

Резкое уменьшение площади поперечного сечения образца (шейка) влечёт за собой уменьшение требуемого усилия (ниспадающая ветвь индикаторной диаграммы). Материал продолжает упрочняться, но требуемое усилие для дальнейшей пластической деформации падает, из-за резкого сокращения сечения образца.

В испытательных машинах нового поколения измерительная система связана с ПК, позволяющем не только распечатать индикаторную диаграмму, но и по стандартным программам провести её дальнейшую обработку.

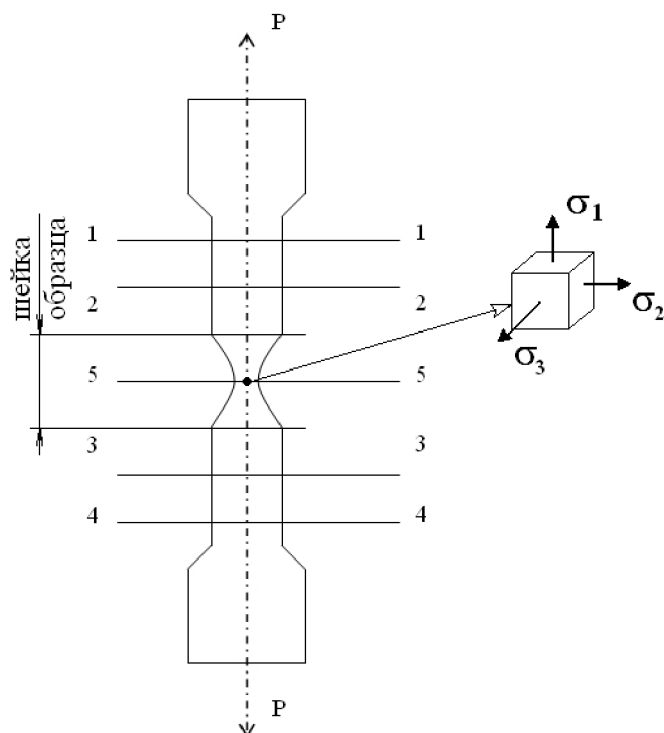


Рисунок 3.8 - Растяжение образца - стадия сосредоточенной деформации

Сечения 1-1 ÷ 4-4 – остаются не изменяемыми;

$$\Delta F_{5-5} > \Delta F_{1-1} \div \Delta F_{4-4}$$

3.3. Диаграмма условных напряжений

Полученную индикаторную диаграмму можно перестроить в диаграмму условных напряжений (рисунок 3.9), разделив текущие значения усилия P_i на исходную площадь испытываемого образца: $\sigma_{\text{усл}} = P_i/F_0$, а величину текущего абсолютного удлинения Δl_i на исходную длину образца l_0 , получив, таким образом величину относительной деформации (относительное удлинение) - $\delta_i = \Delta l_i/l_0$.

Вид диаграммы условных напряжений не меняется, меняется масштаб её записи по осям координат, так как деление текущих значений P_i и Δl_i осуществляется на постоянные величины F_0 и l_0 .

Таким образом, диаграмма условных напряжений имеет те же характерные участки, что и индикаторная диаграмма – упругий и пластический, равномерной и сосредоточенной пластических деформаций (рисунок 3.9).

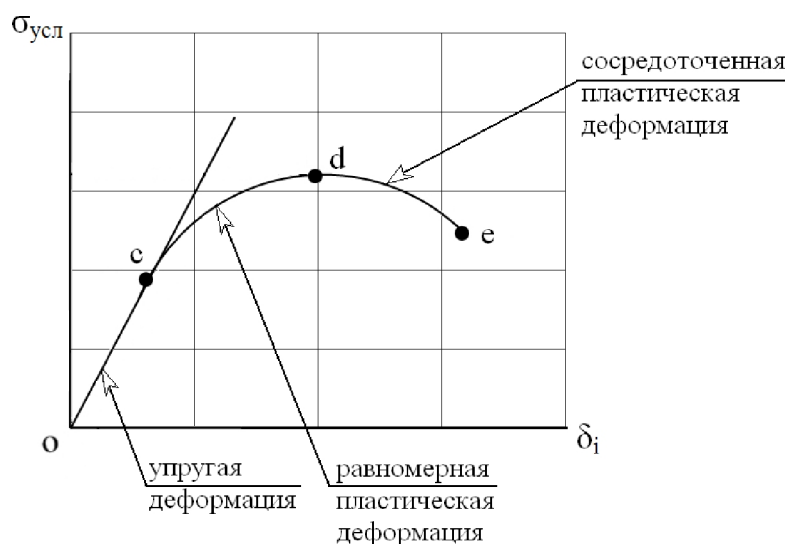


Рисунок 3.9 - Диаграмма условных напряжений $\sigma_{\text{усл}}$ - δ_i : oc – участок упругой деформации; cd – равномерной и de – сосредоточенной пластической деформации

Термин «условных» напряжений связан с тем, что в процессе испытания F , и l меняются. Мы же условно принимаем их неизменными, равными исходным значениям F_0 и l_0 .

Кроме того, термин «диаграмма условных напряжений» подчеркивает главенствующую роль именно напряжений, а не деформаций, подразумевая под этим, что по оси абсцисс деформации могут быть выражены по-разному: относительное удлинение δ , относительное сужение ψ ($\psi = \Delta F / F_0$) и истинная (логарифмическая) деформация ($\epsilon = \ln(l_k / l_0)$). Между деформационными характеристиками δ , ψ и ϵ , существует связь, вытекающая из закона постоянства объема, например $\delta_i = \psi_i (1 - \psi_i)$.

Истинная деформация – это сумма бесконечно малых относительных деформаций

$$e = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_k}{l_0}$$

После преобразования

$$e = \frac{\ln(l_k - l_0 + l_0)}{l_0}$$

также получим связь $e = \ln(1 + \delta)$. Следовательно, все три деформационных характеристики связаны между собой.

В зависимости от способа оценки деформации δ , ψ , e различают диаграммы условных напряжений первого, второго рода и третьего рода соответственно.

Используя связь между деформациями, имея одну диаграмму, всегда можно перестроить её в других координатах.

Для различных марок материала вид диаграмм условных напряжений меняется. Различают четыре их характерных вида со следующими особенностями (рисунок 3.10):

- 1) – наличие площадки текучести (малоуглеродистые стали);
- 2) – отсутствие площадки текучести и четко выраженная $m.d(P_{\max})$, наличие обоих участков равномерной и сосредоточенной деформаций (алюминиевые сплавы);
- 3) – размытый максимум ($P_{\max}$) и большая область сосредоточенной деформации (титановые сплавы);
- 4) – отсутствие сосредоточенной деформации (литейные сплавы).

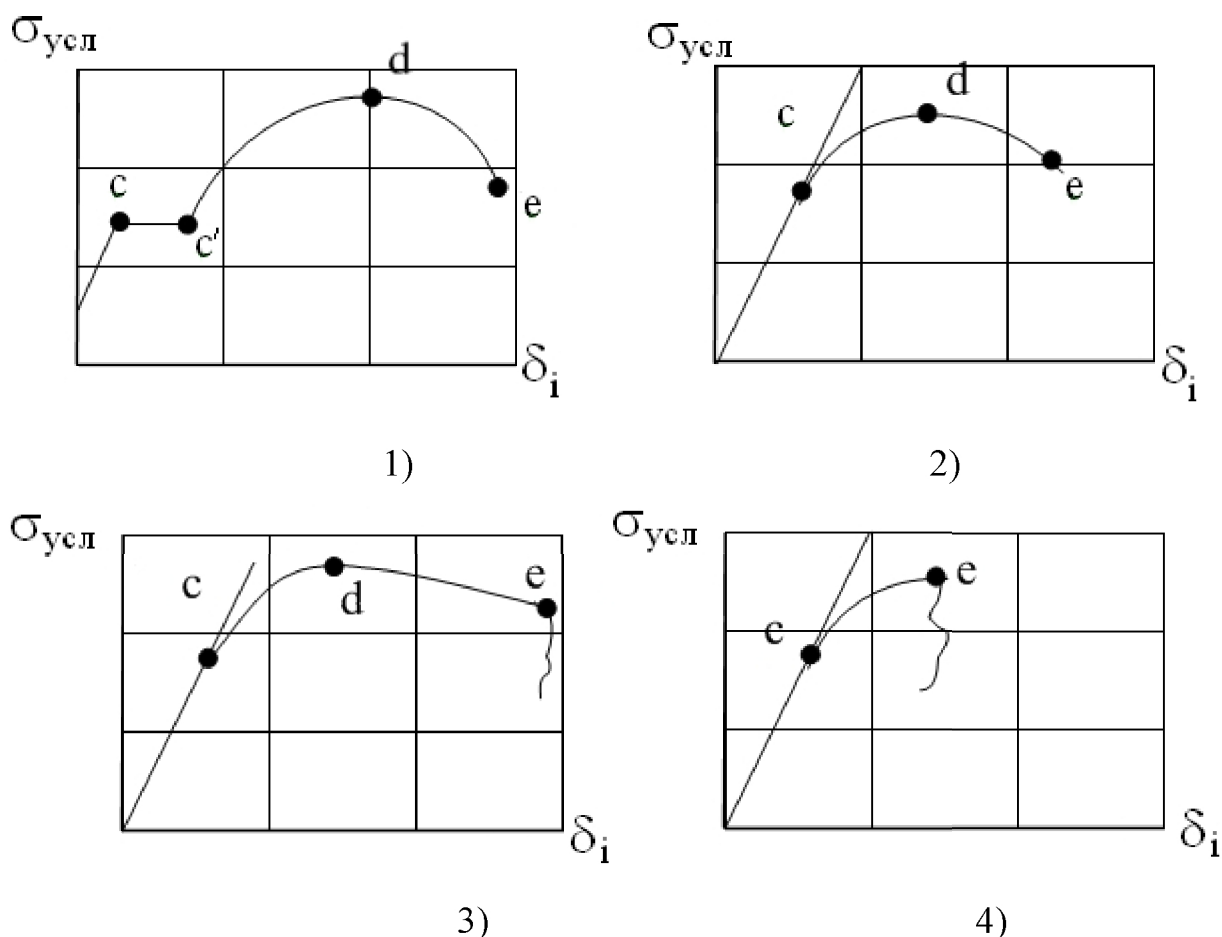


Рисунок 3.10 - Виды диаграмм условных напряжений для образцов из различных марок сплава

Диаграммы условных напряжений позволяют определить условные константы механических свойств: условный предел текучести и условный предел прочности.

Условный предел текучести – условное напряжение, при превышении которого начинается пластическая деформация, когда в образце реализуется линейная схема напряженного состояния. Этой характеристике соответствует точка на диаграмме условных напряжений перехода из упругой области в пластическую (т. С). Понятие «начинается» - качественное понятие. Количественное значение остаточной деформации для этой точки должно составлять 0,2 % от первоначальной длины l_0 . Вот почему условный предел текучести для всех диаграмм условных напряжений не имеющих площадки

текучести обозначается $\sigma_{0,2}$. Чтобы отличать условный предел текучести для диаграмм с площадкой текучести ему дали термин «физический предел текучести» и ввели обозначения σ_s или σ_T , то есть это также условное напряжение, но соответствующее площадке текучести

$$\sigma_s = P_{cc1}/F_0$$

Условный предел прочности – условное напряжение при превышении, которого начинается разрушение образца. На диаграмме условных напряжений условному пределу прочности соответствует точка d, обозначается σ_b и равен P_{max}/F_0 .

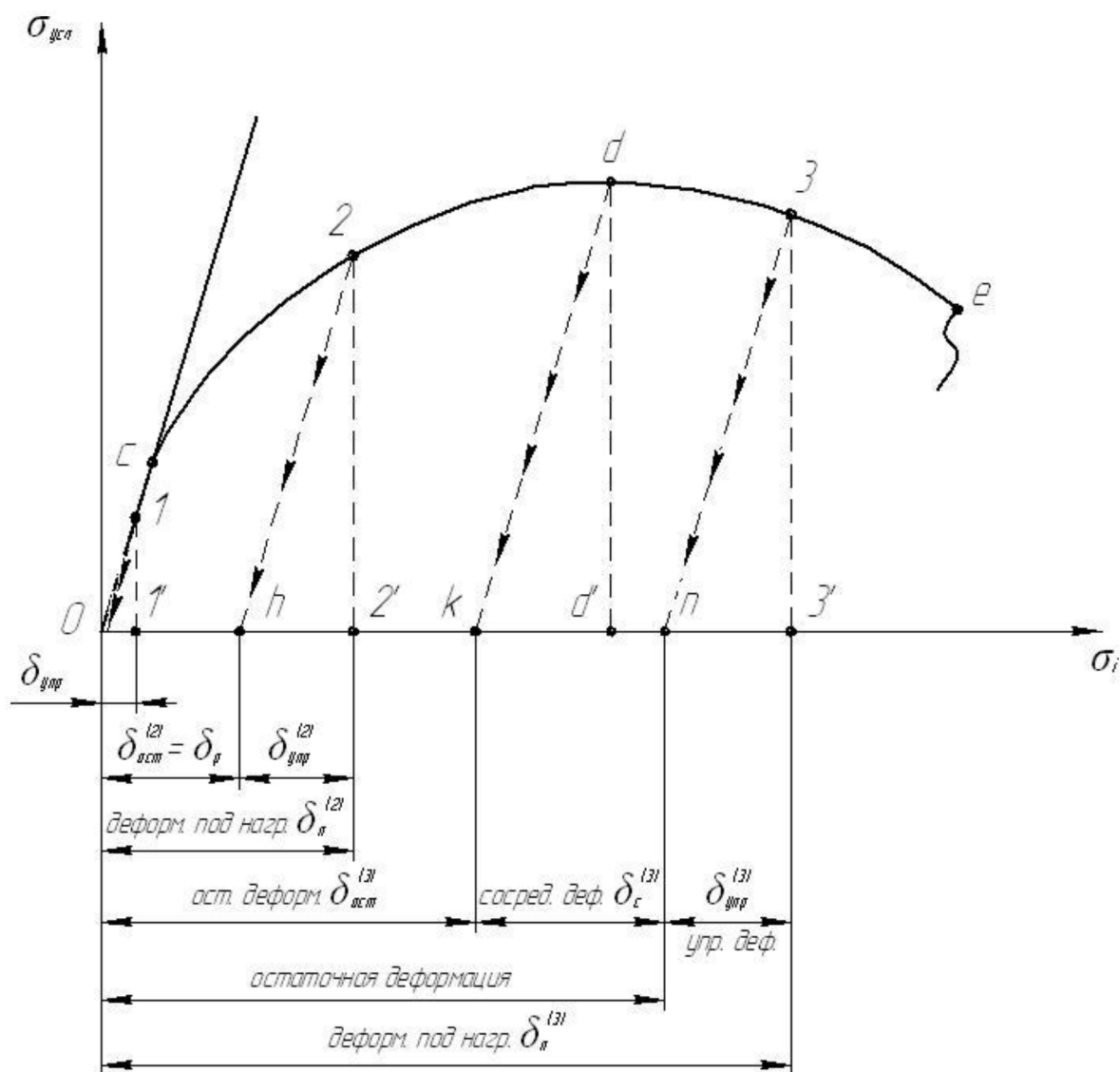


Рисунок 3.11 - Составляющие деформационного процесса растяжения
образца

Под разрушением образца понимают начало процесса образования шейки, а не фактическое разделение образца на две части (точка ϵ).

Диаграмма условных напряжений позволяет продемонстрировать (наглядно показать) все составляющие деформационного процесса (рисунок 3.11).

Для точки 1 – деформация под нагрузкой соответствует отрезку $01'$, после снятия нагрузки (разгрузка осуществляется по линии параллельной линии упругой деформации (закону Гука), мы возвращаемся в т. 0, то есть остаточная деформация отсутствует.

Для точки 2 – деформация под нагрузкой соответствует отрезку « $02'$ ». После снятия нагрузки (разгрузка осуществляется вдоль линии параллельной линии, соответствующей упругой деформации $0c$), получим остаточную деформацию, соответствующую отрезку $0h$, причем эта деформация будет равномерной.

Для точки 3 – деформация под нагрузкой соответствует отрезку « 03 ». После снятия нагрузки получим остаточную деформацию, соответствующую отрезку « $03'$ », причем т. « $d'n$ » делит эту деформацию на равномерную « $0d'$ » и сосредоточенную « $d'n$ ».

Аналогично определяются все деформационные составляющие на диаграмме условных напряжений II рода.

3.4. Диаграмма истинных напряжений

Индикаторную диаграмму можно перестроить и в диаграмму истинных напряжений, если текущие значения нагрузки P_i относить не к исходной площади образца F_0 , а к его текущей площади F_i в данный момент времени

Истинное напряжение в этом случае обозначим как σ_i . Итак, $\sigma_i = P_i/F_i$. Диаграммы истинных напряжений могут быть построены в координатах σ_i

$=f(\delta_i)$; $\sigma_i = f(\psi_i)$ и $\sigma_i = f(e_i)$. то есть диаграммы истинных напряжений также могут быть 1-го, 2-го и 3 рода. Диаграмма истинных напряжений по внешнему виду отличается от диаграммы условных напряжений. Во первых, так как $F_i < F_0$ при испытании на растяжение, то всеми своими точками она проходит выше диаграммы условных напряжений. В упругой области это отличие незначительно, а в дальнейшем это различие увеличивается и в точке d достигает значительной величины. Во-вторых, у диаграммы истинных напряжений отсутствует ниспадающая ветвь, соответствующая сосредоточенной деформации, так как при определении σ_i в этой области текущая нагрузка делится на минимальный диаметр в шейке образца. На рисунке 3.12 приведена диаграмма истинных напряжений и для сравнения пунктиром изображена диаграмма условных напряжений.

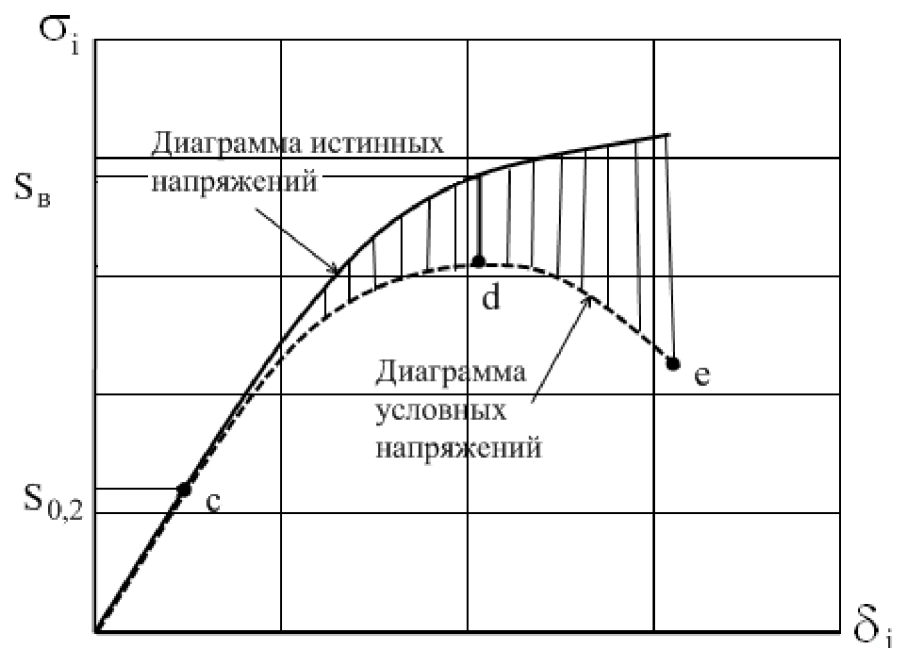


Рисунок 3.12 - Диаграмма истинных напряжений $\sigma_i = f(\delta_i)$

Диаграмма истинных напряжений позволяет получить истинные значения констант механических свойств. Истинный предел текучести $S_{0,2}$ или (S_T, S_s) и истинный предел прочности S_B .

$$S_{0,2} = P_c/F_c; S_2 = P_c/F_c; S_b = P_{max}/F/d$$

но $F_c \approx F_0$ (отличие только на величину упругой деформации)

и, следовательно, $S_{0,2} \approx \sigma_{0,2}$.

Используя закон постоянства объема $F_0 l_0 = F_1 l_1$, получим

$$S_b = \sigma_b (1 + \delta_p) \text{ или } S_b = \sigma_b / (1 - \psi_p).$$

Реальное упрочнение металлов в процессе пластической деформации должно учитываться с помощью диаграмм истинных напряжений.

3.5. Кривые упрочнения

Так как в процессах ОМД основное внимание уделяется пластическим деформациям, то, исключая из диаграмм истинных напряжений упругий участок, получим кривые упрочнения. Это соответствует переносу начала координат, сдвиг оси ординат вправо, в точку «с». Таким образом, «кривая упрочнения» отражает эффект упрочнения металла в процессе пластической деформации и является не чем иным как «усечённой» диаграммой истинных напряжений (рисунок 3.13).

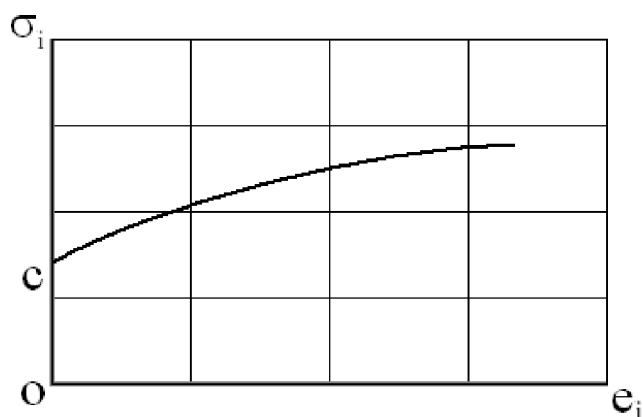


Рисунок 3.13 - Кривая упрочнения $\sigma_i = f(e_i)$

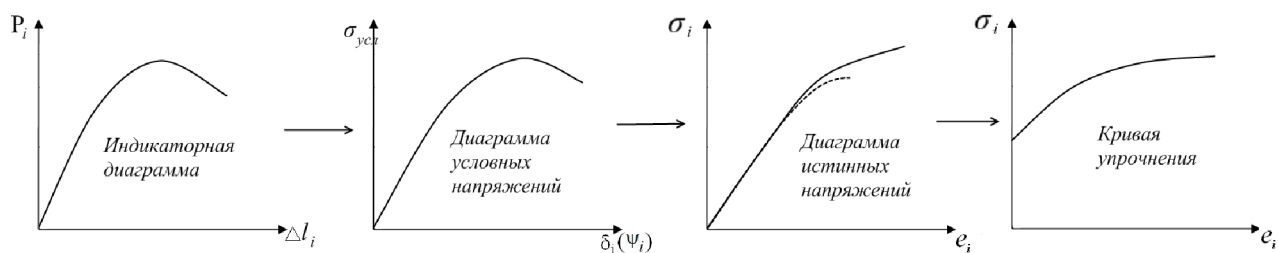


Рисунок 3.14 - От индикаторной диаграммы до кривой упрочнения

На рисунке 3.14 представлен процесс перехода от исходной индикаторной (машинной) диаграммы до кривой упрочнения.

Такой переход осуществим для диаграмм 1,2 и 3 рода.

3.6. Свойства кривых упрочнения I рода

Кривые упрочнения I рода построены в координатах $\sigma_i(\delta_i)$.

Проведем в т. d кривой упрочнения касательную. Точка d имеет координаты S_b и δ_p (рисунок 3.15).

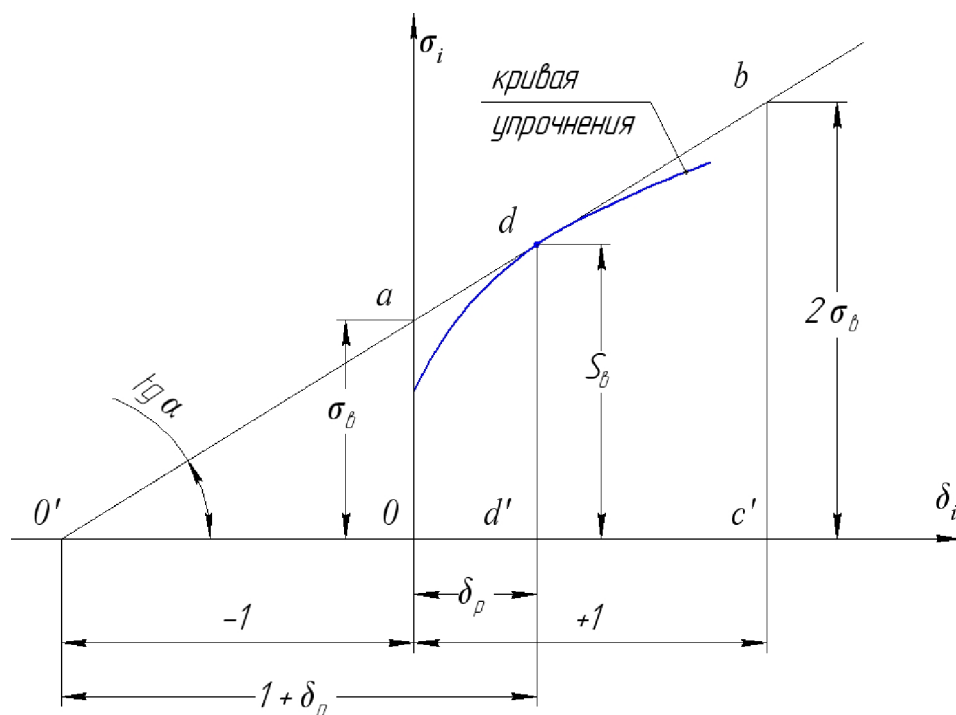


Рисунок 3.15 - Свойства кривых упрочнения первого рода

Для диаграммы условных напряжений т. d соответствует экстремуму функциональной зависимости $\sigma_{ysl}(\delta_i)$, то есть $d\sigma_{ysl(d)} = 0$.

Используя закон постоянства объема, запишем

$$\sigma_{ysl} = \sigma_i / (1 + \delta_i)$$

В точке d $\sigma_{ysl} = 0$; дифференцируя, получим

$$\frac{d\sigma_i(1 + \delta_i) - \sigma_i \cdot d\delta_i}{(1 + \delta_i)^2} = 0$$

В точке d значения $-\delta_i, \delta_i$, имеют конкретные значения - S_B и δ_p

$$d\sigma_{ysl} = \frac{dS_B(1 + \delta_p) - S_B \cdot d\delta_p}{(1 + \delta_p)^2} = 0$$

После преобразования получим:

$$\frac{dS_B}{d\delta_p} = \frac{S_B}{1 + \delta_p}$$

и по определению производной это есть $\tan \alpha$.

Из рисунка 3.15 следует, что $\tan \alpha$ равен отношению отрезков «dd'/o'd'», и сопоставляя с ранее полученным его значением, будем иметь:

$$\tan \alpha = \frac{S_B}{1 + \delta_p} = \frac{dd'}{o'd'}$$

Тогда отрезок $o'd' = 1 + \delta_p$, а отрезок oo' будет равен - 1.

Из подобия треугольников $o'oa$ и $o'dd'$ следует:

$$\frac{oo'}{o'd'} = \frac{oa}{dd'}$$

$$oa = \frac{S_B}{1 + \delta_p} = \sigma_B$$

Отложим вправо от начала координат отрезок, равный +1. Восстановим перпендикуляр «c'b» до пересечения с касательной.

Из подобия треугольников $o'bc'$ и $o'ao$ может быть найден отрезок $c'b = 2\sigma_B$

Полученные значения отрезков $oo' = 1$; $oa = \sigma_v$ и $c'b \approx 2\sigma_v$ определяют свойства кривой упрочнения 1 вида:

- Касательная, проведенная к кривой упрочнения 1 рода к точке начала сосредоточенной деформации, отсекает на оси ординат отрезок равный σ_v .

- Касательная, проведенная к кривой упрочнения 1 рода к точке начала сосредоточенной деформации, отсекает на оси абсцисс слева от начала координат отрезок равный -1 .

- Касательная, проведенная к кривой упрочнения 1 рода к точке начала сосредоточенной деформации, отсекает на вертикале с координатой по оси абсцисс $+1$, отрезок равный $2\sigma_v$.

3.7. Свойства кривых упрочнения II рода

Кривые упрочнения II рода построены в координатах σ_i (ψ_i). Проведем к точке d кривой упрочнения II рода касательную. Тогда точка d имеет координаты S_v и ψ_p (рисунок 3.16). Для диаграмм условных напряжений в точке d

$$d\sigma_{\text{усл}} = 0.$$

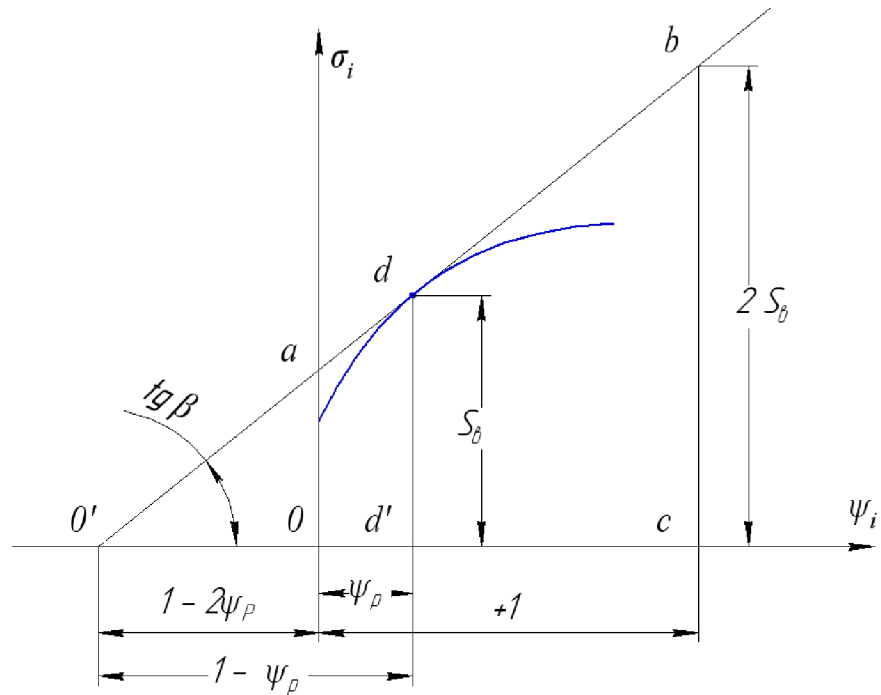


Рисунок 3.16 – Свойства кривых упрочнения II рода

В общем случае $\sigma_{\text{усл}} = \sigma_i (1 - \psi_i)$; для точки d - $d\sigma_{\text{усл}} = 0$

Продифференцируем:

$$d\sigma_{\text{усл}} = d\sigma_{\text{усл}} (1 - \psi_i) - \sigma_i \cdot d\psi_i = 0$$

в т.д

$$\psi_i = \psi_p ; \sigma_i = S_B$$

Тогда

$$\text{tg} \beta = \frac{d\sigma_i}{d\psi_i} = \frac{S_B}{1 - \psi_p}$$

следовательно, отрезок $o'd'$ на рисунке 3.16, равен $1 - \psi_p$. Тогда отрезок oo' будет равен $1 - 2\psi_p$.

Отложим вправо от начала координат отрезок $+1$ и восстановим перпендикуляр до пересечения с касательной - отрезок «bc». Из подобия треугольников $o'd \cdot d'$ и $o'bc$ следует: отрезок «bc» равен $2S_B$

Полученные значения отрезков « oo' » и «bc» определяют свойства кривой упрочнения II рода:

- Касательная, проведенная к кривой упрочнения II рода к точке начала сосредоточенной деформации, отсекает на оси абсцисс слева от начала координат отрезок равный $1-2\psi_p$.

- Касательная проведенная к кривой упрочнения II рода к точке начала сосредоточенной деформации, отсекает на вертикале с координат по оси абсцисс +1 отрезок равный $2S_b$.

3.8. Построение диаграмм истинных напряжений

Для построения диаграммы истинных напряжений первого рода используется индикаторная диаграмма $P - \Delta l_i$. Первый метод построения основан на применении графических приемов. Область равномерной деформации Δl_i на индикаторной диаграмме разделяют на n участков*, обычно 6-7 (рисунок 3.17). Прежде всего, находят масштабы записи диаграммы по осям Δl_i и P_i :

$$\mu_l = \frac{\Delta l}{ok}; \quad \mu_P = \frac{P_{\max}}{dd'}$$

* - (последняя точка должна соответствовать $P_{\max}$)

Δl_u – увеличение длины образца, замеренное на нём после испытания;

ok – соответствующая этому удлинению длина отрезка на диаграмме;

$P_{\max}$ – максимальное усилие растяжения, фиксируемое испытательной машиной;

dd' - длина соответствующего участка на диаграмме.

Используя масштаб записи диаграммы определяют, исходя из положения точек на диаграмме, абсолютные удлинения Δl_i и усилия P_i в каждой из точек 1, 2, 3...n.

Затем вычисляют относительные удлинения испытуемого образца для выделенных точек:

$$\delta_1 = \frac{\Delta l_1 \cdot \mu_i}{l_0}; \delta_2 = \frac{\Delta l_2 \cdot \mu_i}{l_0}, \dots, \delta_n = \frac{\Delta l_n \cdot \mu_i}{l_0}$$

и соответствующие текущие площади :

$$F_1 = \frac{F_o}{1 + \delta_1}, F_2 = \frac{F_o}{1 + \delta_2}, \dots, F_n = \frac{F_o}{1 + \delta_n}$$

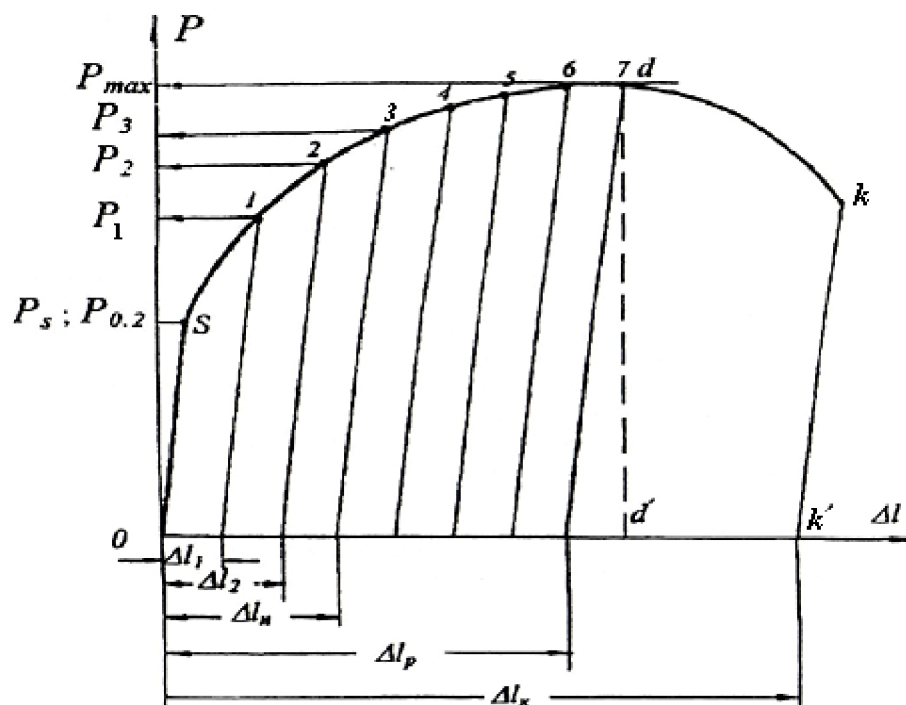


Рисунок 3.17 - Графическая обработка индикаторной диаграммы растяжения

Истинное напряжение σ_i получаем делением величины нагрузки ($P_i \cdot \mu_p$) на соответствующую площадь:

$$\sigma_1 = \frac{P_1 \cdot \mu_p}{F_1}; \quad \sigma_2 = \frac{P_2 \cdot \mu_p}{F_2}; \quad \dots; \quad \sigma = \frac{P_{\max}}{F_p}$$

По полученным значениям σ_i и δ_i строят кривую упрочнения первого рода в интервале равномерной деформации. Графический метод построения довольно прост, нетрудоемок и, в случае необходимости, обеспечивает возможность повторного ее построения. Однако этим методом можно строить кривые упрочнения только в равномерной области, так как только для равномерной области (всего образца в целом) справедливо выражение

$$F_1 = \frac{F_0}{1 + \delta_1} = F_0(1 - \psi_i),$$

вытекающее из закона постоянства объема. Кроме того, следует иметь в виду, что точность построения диаграммы истинных напряжений недостаточно высокая из-за применения графических приемов построения.

Второй метод предполагает устранить некоторые недостатки графического способа построения кривых упрочнения. В частности, появляется возможность построения кривых упрочнения и в области сосредоточенной деформации. Кроме того, исключая графические приемы, можно несколько увеличить точность построения диаграмм истинных напряжений.

Сущность метода заключается в том, что в процессе испытания поэтапно для каждой фиксированной нагрузки непосредственно при испытании измеряют поперечное сечение образца. Измерения образцов до момента образования шейки производятся одновременно в нескольких сечениях, равномерно распределенных по длине образца. Для этого на расчетной длине образца перед испытанием наносят риски через равные интервалы. С момента образования шейки все измерения производят только в сечении с минимальной площадью.

Для нахождения величины истинных напряжений в равномерной области нагрузку на каждом этапе нагружения $P_1, P_2, \dots, P_d$ делят на соответствующую замеренную площадь сечения: $\sigma_i = P_i/F_i$.

В области сосредоточенной деформации, где реализуется схема напряжений, отличная от линейной, величина σ_i может быть подсчитана с учетом изменившейся схемы напряженно-деформированного состояния, то есть с введением поправочного коэффициента формы по формуле

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_i \left(1 + \frac{d_{min}}{4R}\right)}$$

Где $d_{\min}$ – диаметр наименьшего сечения в шейке (для круглого образца);

R – радиус кривизны на контуре шейки.

Величина деформации при построении кривой упрочнения вторым методом оценивается относительным сужением:

$$\Psi_i = 1 - F_i/F_o$$

Данный метод в итоге позволяет построить кривую упрочнения второго вида в координатах $\sigma_i - \Psi_i$.

3.9. Проверка правильности построения кривых упрочнения

Для контроля правильности построения диаграмм истинных напряжений используются свойства кривых упрочнения.

Используя указанные свойства, судят о правильности построения экспериментальных кривых упрочнения. Так, для кривой упрочнения 1-го рода через точку o' , соответствующую удлинению $\delta = -1$, проводят касательную к построенной кривой. Затем измеряют величину полученного отрезка « oa » (рисунок 3.15) и сравнивают ее со значением σ_b . Совпадение этих величин свидетельствует о правильности построения кривой упрочнения 1-го рода.

Аналогично для кривой упрочнения 2-го рода через точку o' , соответствующую сужению $1 - \Psi_p$, проводят касательную к кривой упрочнения. Измеряя величину отрезка bc (рисунок 3.16) и сравнивая ее со значением $2S_b$, оценивают правильность построения кривой упрочнения 2-го рода.

3.10. Аппроксимация кривых упрочнения. Определение коэффициентов аппроксимирующих зависимостей

Кривые упрочнения позволяют учесть эффект наклепа в процессах обработки металлов давлением. Однако при аналитическом решении задач пользоваться графической зависимостью $\sigma_i = f(\epsilon_i)$ затруднительно. Определив, например, по чертежу детали, на какую величину нужно деформировать заготовку, то есть определив величину деформации, по графику построенной кривой упрочнения находят соответствующее напряжение, и далее используют это значение в расчетах.

Такая процедура трудоемка и не обеспечивает высокой точности решения.

Поэтому необходимо найти возможность замены экспериментальной кривой упрочнения приближённым математическим выражением.

Аппроксимация кривых упрочнения это и есть процедура замены экспериментальных кривых упрочнения приближенным математическим выражением.

Существует множество аппроксимирующих зависимостей, отличающихся друг от друга структурой математического выражения (уравнение прямой линии, степенной функции, тригонометрических уравнений и др.), обеспечивающего требуемую точность аппроксимации.

Найти аппроксимирующую зависимость – это значит выразить коэффициенты искомых уравнений через константы механических свойств.

Линейная аппроксимация

Уравнение аппроксимирующей прямой кривой упрочнения первого рода имеет вид

$$\sigma_i = a + b\epsilon_i$$

Нахождение коэффициентов a и b зависит от выбранного условия проведения этой функции по отношению к экспериментальной кривой упрочнения.

Например: аппроксимирующая прямая должна проходить через точку начала сосредоточенной деформации (S_b, δ_p) и являться касательной к экспериментальной кривой упрочнения, то есть должна подчиняться свойствам кривых упрочнения первого рода.

Возможны и другие условия проведения линейной аппроксимирующей зависимости, например, условия её прохождения через две точки: начала пластической деформации и начала сосредоточенной деформации (рисунок 3.18).

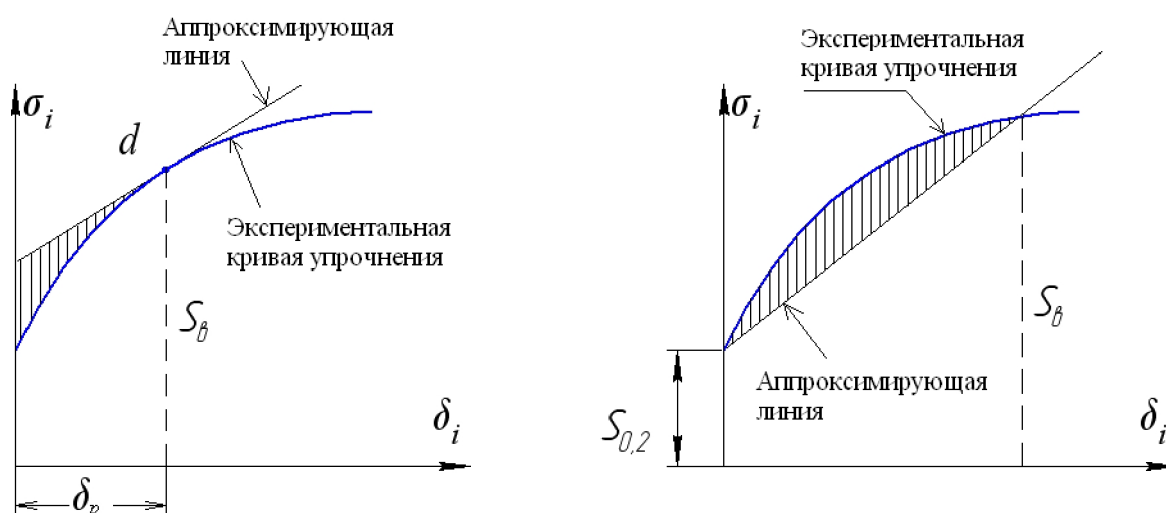


Рисунок 3.18 – Линейная аппроксимация кривых упрочнения

Точность аппроксимации, определяемая заштрихованными областями, будет разная. Но наиболее просто коэффициенты линейной аппроксимации кривой упрочнения 1 рода определяются, если использовать её свойства. В этом случае $a = \sigma_b$ $b = \sigma_b$ и аппроксимирующая зависимость будет иметь вид

$$\sigma_i = \sigma_b (1 + \delta_i)$$

Точность такой аппроксимации (расхождение аппроксимирующих и экспериментальных значений) на начальном этапе пластической деформации может достигать 20 % и уменьшается с приближением к точке начала сосредоточенной деформации, где эти значения совпадают.

Для линейной аппроксимации кривой упрочнения II рода эта зависимость имеет вид:

$$a = \frac{\sigma_B(1 - 2\varphi_P)}{(1 - \varphi_P)^2}, \quad b = \frac{\sigma_B}{(1 - \varphi_P)^2} \quad \text{и} \quad \sigma_i = \frac{\sigma_B}{(1 - \varphi_P)^2} (1 - 2\varphi_P + \varphi_i)$$

Данное выражение получено с использованием свойств кривой упрочнения II рода.

Степенная аппроксимация

Для степенной аппроксимации также возможно несколько условий проведения аппроксимирующей функции. Например, степенная функция должна проходить через точку начала сосредоточенной деформации и касательная к ней удовлетворять свойствам кривой упрочнения (рисунок 3.19).

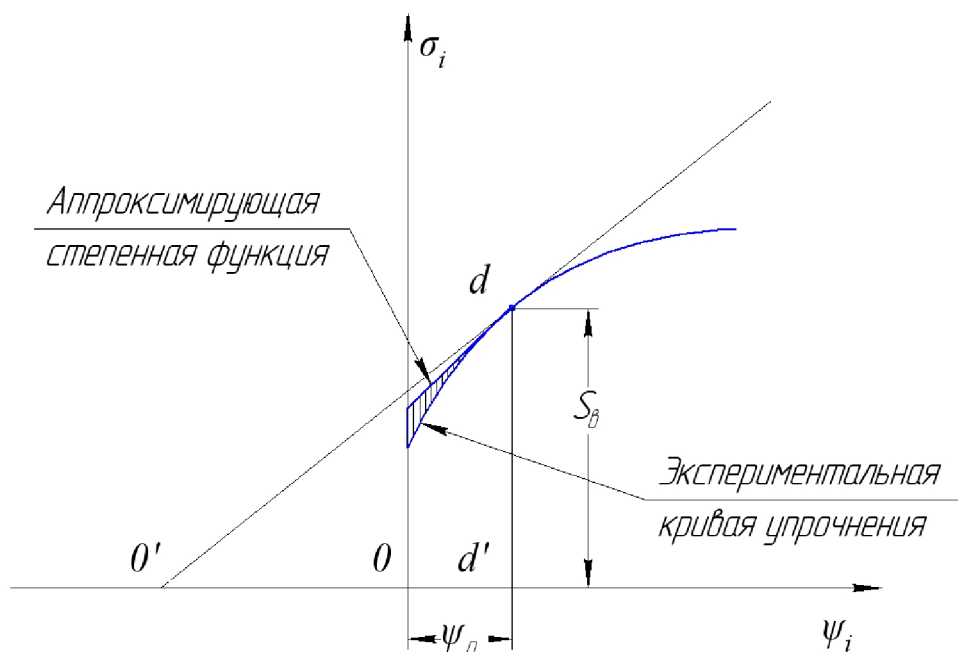


Рисунок 3.19 – Степенная аппроксимация кривых упрочнения

Степенная аппроксимирующая зависимость для кривой упрочнения II рода имеет вид

$$\sigma_i = k\varphi_i^n$$

Подставляя в уравнение координаты точки начала сосредоточенной деформации (S_B, φ_P) получим выражение для определения коэффициента k

$$S_B = k\varphi_P^n,$$

$$k = \frac{S_B}{\varphi_P^n}$$

После замены коэффициенты k его найденным значением искомая степенная функция примет вид:

$$\sigma_i = \frac{S_B}{\varphi_P^n} \varphi_i^n$$

Умножив обе части последнего равенства на текущую площадь F_i , получим выражение, описывающее изменение усилия P_i от степени деформации образца:

$$P_i = \sigma_i \cdot F_i = F_i \cdot \frac{S_B}{\varphi_P^n} \cdot \varphi_i^n,$$

для которого в точке d начала сосредоточенного сужения справедливо условие $dP_d = 0$

Заменяя $F_i = F_0(1-\psi_i)$, дифференцируя выражение для P_i , и приравнявая dP_i в точке, соответствующей ψ_P нулю, найдем формулу для определения коэффициента n :

$$n = \frac{\psi_P}{1 - \psi_P}$$

Аналогично определяются коэффициенты степенной аппроксимации $\sigma_i = K\delta^n$ кривой упрочнения первого вида:

$$K = \frac{S_B}{\delta_p^n}, n = \frac{\delta_p}{1 + \delta_p}$$

Степенная аппроксимация кривой упрочнения первого вида выразится следующей формулой:

$$\sigma_i = S_B \left(\frac{\delta_i}{\delta_p} \right)^{\frac{\delta_p}{1 + \delta_p}}$$

Часто используется другое условие проведения степенной аппроксимирующей функции: аппроксимирующая степенная функция должна проходить через две точки – точку истинного предела текучести и истинного предела прочности. Координаты этих точек для кривой упрочнения первого рода $(S_{0,2}, \delta_{0,2})$ и (S_B, δ_p) .

Подставив координаты этих точек в выражение степенной аппроксимирующей зависимости, получим систему двух уравнений с двумя неизвестными k и n .

$$S_B = k\delta_p^n \text{ и } S_{0,2} = k\delta_{0,2}^n$$

Решение системы дает возможность определить k и n

$$k = \frac{S_B}{\delta_p^n}, n = \frac{\ln S_B - \ln S_{0,2}}{\ln \delta_p - \ln \delta_{0,2}}; \text{ где } S_B = \sigma_B (1 + \delta_p), S_{0,2} \approx \sigma_{0,2},$$

$$\delta_{0,2} = 0,002 + \frac{\sigma_{0,2}}{E},$$

Аналогично находятся коэффициенты k и n для аппроксимирующих степенных функций кривой упрочнения II и III рода.

Точность аппроксимации кривых упрочнения степенной функцией гораздо выше линейной аппроксимации. Расхождение истинных и аппроксимирующих значений не превышает 5 %.

3.11. Свойства «единых» кривых упрочнения

Замечательным свойством кривых упрочнения является их универсальность для любой схемы напряженного состояния. Другими словами: кривая упрочнения «единая» для любой схемы напряженного состояния.

Если наложить (совместить) кривые упрочнения, полученные при испытании образцов при различных схемах напряженного состояния (линейной, плоской, объемной), то кривые сольются, получим полное совпадение кривых. Этот факт и говорит о единстве кривых упрочнения, то есть появляется возможность, получив кривую упрочнения при испытании, в котором реализуется самая простая линейная схема напряженного состояния, использовать её для анализа процессов ОМД с любой другой (сложной) схемой напряженного состояния.

Естественно, что это свойство распространяется и на аппроксимирующие зависимости.

3.12. Кривые упрочнения металлов, подвергнутых динамическому нагружению

При высоких скоростях деформации $\dot{\epsilon}$ происходит изменение механических свойств металла. Для оценки влияния $\dot{\epsilon}$ на константы механических свойств σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ вводятся соответствующие коэффициенты динамичности

$$k_{\sigma_{0,2}} = \frac{\sigma_{0,2}^{дин}}{\sigma_{0,2}^{ст}}, \quad k_{\sigma_B} = \frac{\sigma_B^{дин}}{\sigma_B^{ст}}, \quad k_{\delta} = \frac{\delta^{дин}}{\delta^{ст}}$$

Значения этих коэффициентов для большинства, например, алюминиевых сплавов больше единицы, то есть динамические свойства выше статических.

Так, для сплава АМгбМ коэффициенты динамичности имеют следующие значения $k_{\sigma 0,2} = 1,4 - 1,6$ $k_{\sigma B} = 1,1 - 1,2$ $k_{\sigma} = 1,6 - 1,8$.

Изменение констант механических свойств $k_{\delta 0,2}$ приводит к $k_{\delta B}$ изменению вида кривых упрочнения и аппроксимирующей зависимости.

Наиболее полно эти изменения учитываются при степенной аппроксимации, использующей условия прохождения её через две точки: предел текучести и предел прочности.

Из приведенных для примера числовых значений коэффициентов динамичности видно существенное изменение формы и числовых значений аппроксимирующей зависимости. Это говорит о том, что при определении коэффициентов аппроксимации k и n необходимо использовать динамические значения констант механических свойств (рисунок 3.20).

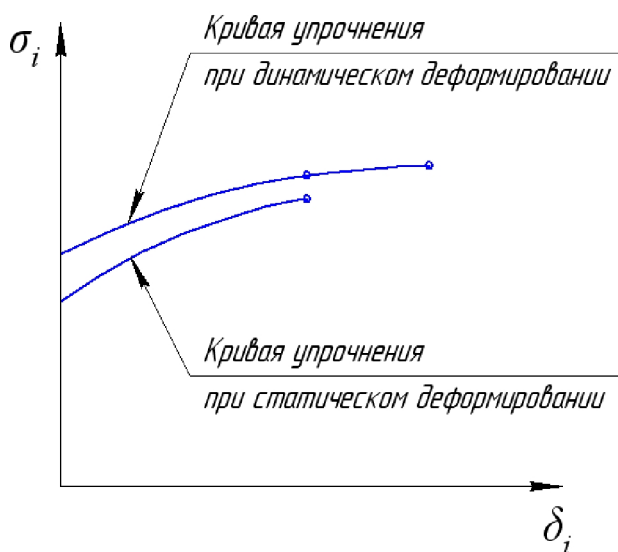
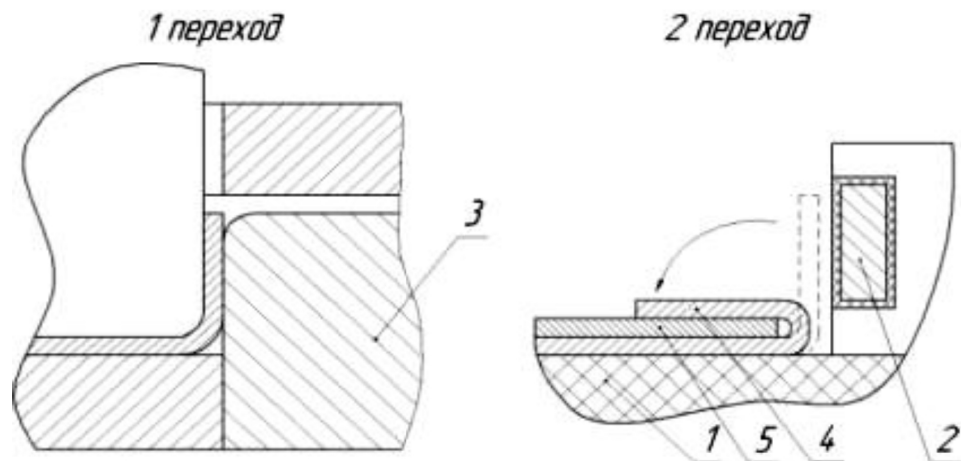


Рисунок 3.20 – Статические и динамические кривые упрочнения

Для моделирования гибридных или комбинированных операций с применением статического и динамического нагружений необходимо учитывать возможность перехода с одной кривой упрочнения на другую в пределах реализации операций одного производственного цикла.



1- корпус индуктора, 2 – виток индуктора, 3 – матрица,
4 – внешняя заготовка, 5- внутренняя заготовка

Рисунок 3.21 – Комбинированная технология «зафланцовки»

Так, например, операция «зафланцовки» может осуществляться в два этапа: гибка на $d = 90^\circ$, осуществляемая в инструментальном штампе (статическая нагрузка), а дальнейшая гибка на $d = 180^\circ$ осуществляется импульсным магнитным полем (динамическая нагрузка).

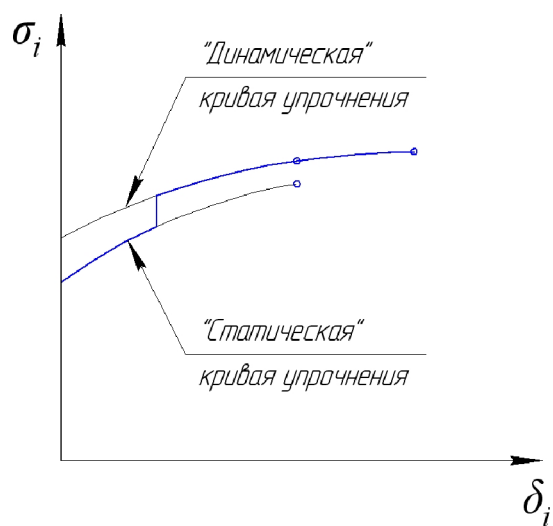


Рисунок 3.22 – Переход со статической на динамическую кривую упрочнения

