

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

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

В. А. Глушников

Упрочнение металлов в обработке металлов давлением

Электронное учебное пособие

САМАРА
2010

Автор: Глушков Владимир Александрович

Дано определение упрочнения металла в обработке металлов давлением и рассмотрены кривые упрочнения и их свойства.

Пособие предназначено для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Инновационные технологии получения и обработки материалов с заданными свойствами» по направлению 150400.68 «Металлургия».

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010

Содержание

1 Определение.....	4
2 Индикаторная диаграмма	7
3 Диаграмма условных напряжений.....	11
4 Диаграмма истинных напряжений	16
5 Кривые упрочнения.....	17
6 Свойства кривых упрочнения I рода.....	18
7 Свойства кривых упрочнения II рода.....	20
8 Построение диаграмм истинных напряжений	22
9 Проверка правильности построения кривых упрочнения	25
10 Аппроксимация кривых упрочнения. Определение коэффициентов аппроксимирующих зависимостей.....	26
11 Замечательные свойства кривых упрочнения	31
12 Кривые упрочнения металлов, подвергнутых динамическому нагружению	31
Список использованных источников	33

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 1).

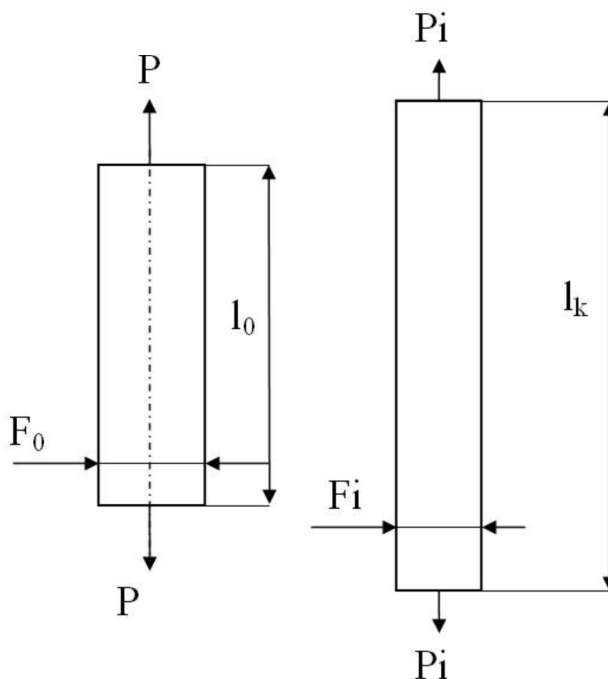


Рисунок 1 - Изменение размеров образца в процессе его растяжения

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 $P-\Delta l$ представлена на рисунке 2.

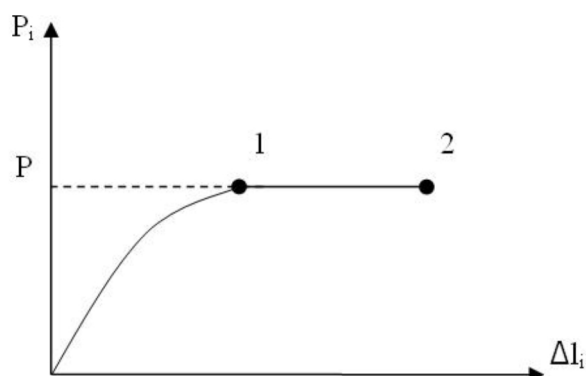


Рисунок 2 - Диаграмма $P_i - \Delta l_i$ при испытании на растяжение образца из неупрочняемого материала

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

Диаграмма $P-\Delta l$ для упрочняемого металла имеет вид, приведенный на рисунке 3.

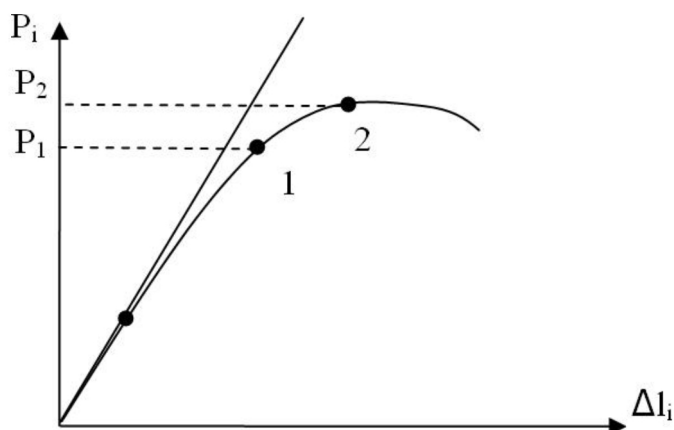


Рисунок 3 - Диаграмма $P_i-\Delta l_i$ при испытании на растяжение образца и упрочняемого материала $P_2 > P_1$

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 4.

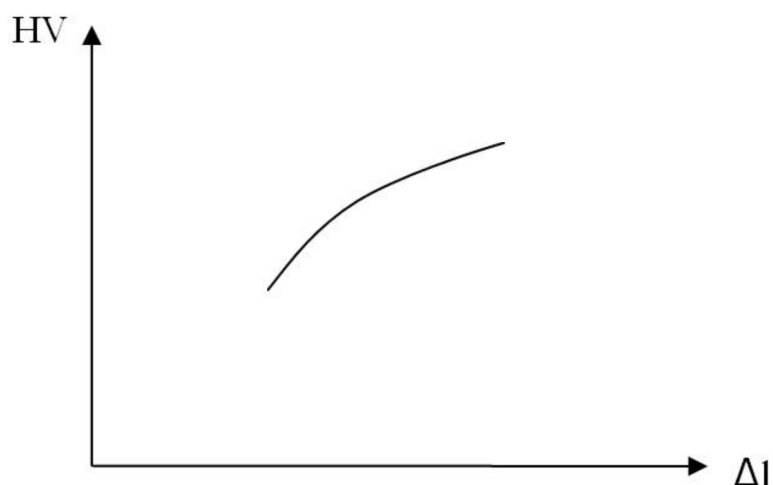


Рисунок 4 - Повышение твердости HV материала образца в результате его пластической деформации

Упрочнение, наклеп или повышение твердости металла – явления, которые сопровождают 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.

При пластической деформации одни зерна действуют на другие, приводят их дроблению. 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 очень большой степени, для других - незначительно.

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

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

Цель настоящего пособия – научить студентов учёту эффекта упрочнения при расчёте, проектировании и моделировании процессов ОМД.

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 ($P - \Delta l$). На рисунке 5 в качестве примера приведена реальная диаграмма, полученная на испытательной машине Testometric при растяжении алюминиевого (АМгбМ) образца с исходными размерами $\varnothing = 10 \text{ мм}$, $l = 100 \text{ мм}$.

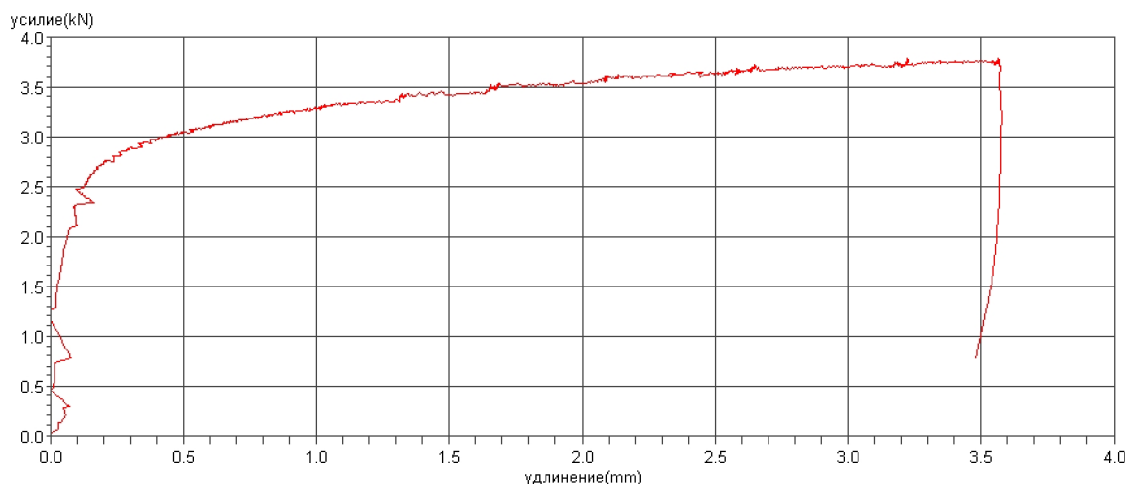


Рисунок 5 – Индикаторная (машинная) диаграмма растяжения цилиндрического образца.

На индикаторной диаграмме (рисунок 6) можно выделить два участка – упругий (в пределах которого действует закон Гука) и пластический, 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) $dP < 0$.

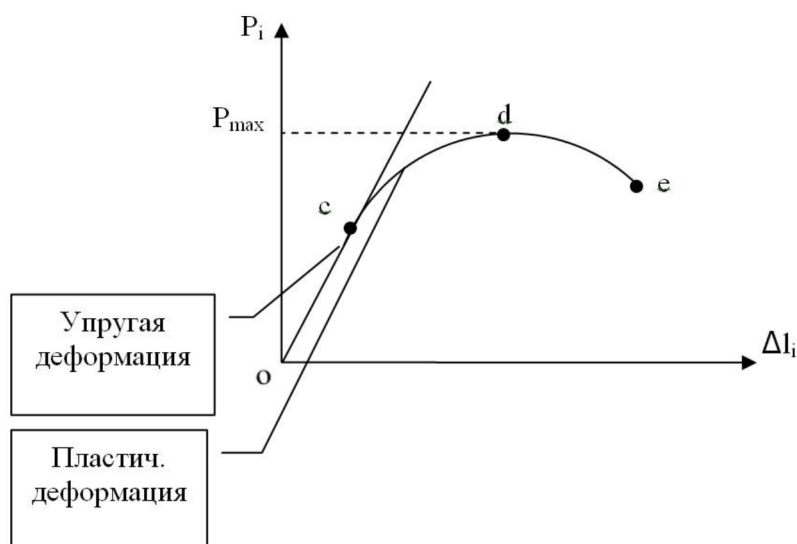


Рисунок 6 - Индикаторная диаграмма $P_i - \Delta l_i$. Участок oc – упругая деформация; участок $c - d - e$ - пластическая; $c - d$ – равномерная; $d - e$ – сосредоточенная деформация

На первом участке все сечения (1-1; 2-2; 3-3...) образца деформируются одинаково (рисунок 7) – Это так называемая стадия равномерной деформации. При дальнейшем растяжении (после $m.d$) деформация сосредотачивается на узком участке, называемом шейкой образца (рисунок 8). Все участки удалённые от шейки образца уже не деформируются. Деформация сосредотачивается в шейке. Эта ветвь диаграммы (участок de) носит название участок сосредоточенной деформации.

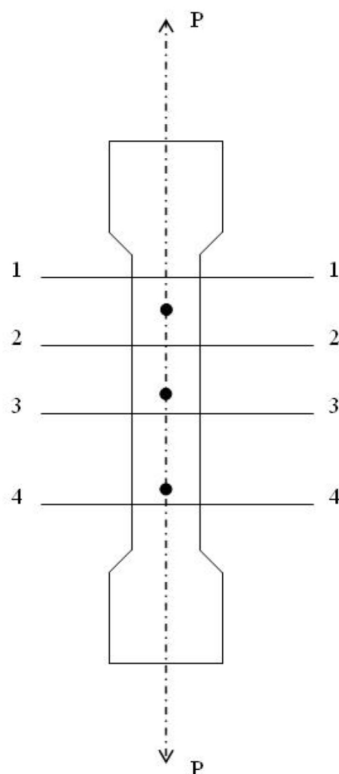


Рисунок 7 - Стадия равномерной деформации

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

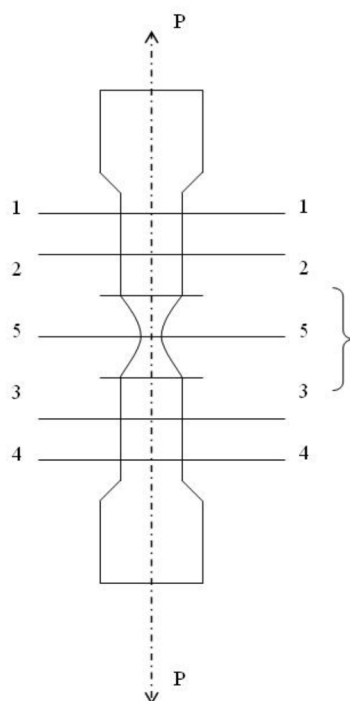


Рисунок 8 Стадия сосредоточенной деформации

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

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

В области равномерной деформации, во всех сечениях существует одноосное (линейное) напряженное состояние в сосредоточенной – объемная схема напряжённости состояния.

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.

3 Диаграмма условных напряжений

Полученную индикаторную диаграмму можно перестроить в диаграмму условных напряжений (рисунок 9), разделив текущие значения усилия P_i на исходную площадь испытываемого образца: $\sigma_{усл} = P_i/F_0$, а величину текущего абсолютного удлинения Δl_i на исходную длину образца l_0 , получив, таким образом величину относительной деформации - $\delta_i = \Delta l_i/l_0$.

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 области, равномерной и сосредоточенной пластических деформаций (рисунок 9).

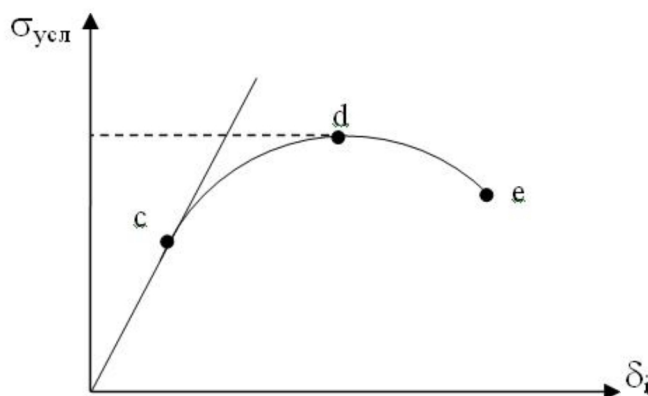


Рисунок 9 - Диаграмма условных напряжений $\sigma_{усл}$ - δ_i : oc – участок упругой деформации; cd – равномерной и de – сосредоточенной пластической деформации

Термин «условных» напряжений связан с тем, что в процессе испытания и 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 разные: относительное удлинение (δ), относительное сужение ($\psi = \Delta F / F_0$) и истинная (логарифмическая) деформация (e). Между деформационными характеристиками δ , ψ и e , существует связь, вытекающая из закона постоянства объема $\delta = \psi (1 - \psi)$.

Истинная деформация – это сумма бесконечно малых относительных деформаций. После преобразования

$$e = \frac{\ln(l_k - l_0 + l_0)}{l_0} \quad \text{также получим связь } e = \ln \left(1 + \frac{\delta}{1 - \delta} \right).$$

Следовательно, все три деформационных характеристики связаны между собой.

В зависимости от вида 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 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...).

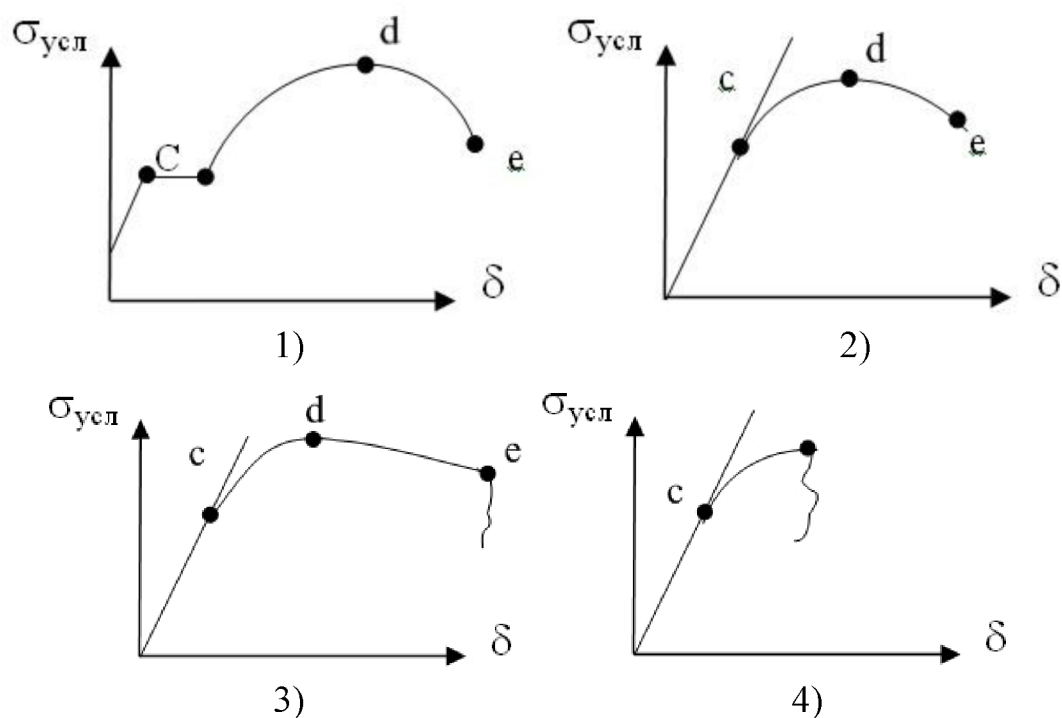


Рисунок 10 - Виды диаграмм условных напряжений для различных марок сплава

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 при линейной схеме 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 должна 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

$$\sigma_s = \frac{P_{cc_1}}{F_0}.$$

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

Под разрушением образца понимают начало процесса образования шейки, а не фактическое разделение образца на две части (точка e). Диаграмма условных напряжений позволяет продемонстрировать (наглядно показать) все составляющие деформационного процесса (рисунок 11). Так для т.1 на диаграмме условных напряжений деформация образца под нагрузкой соответствует отрезку « om ».

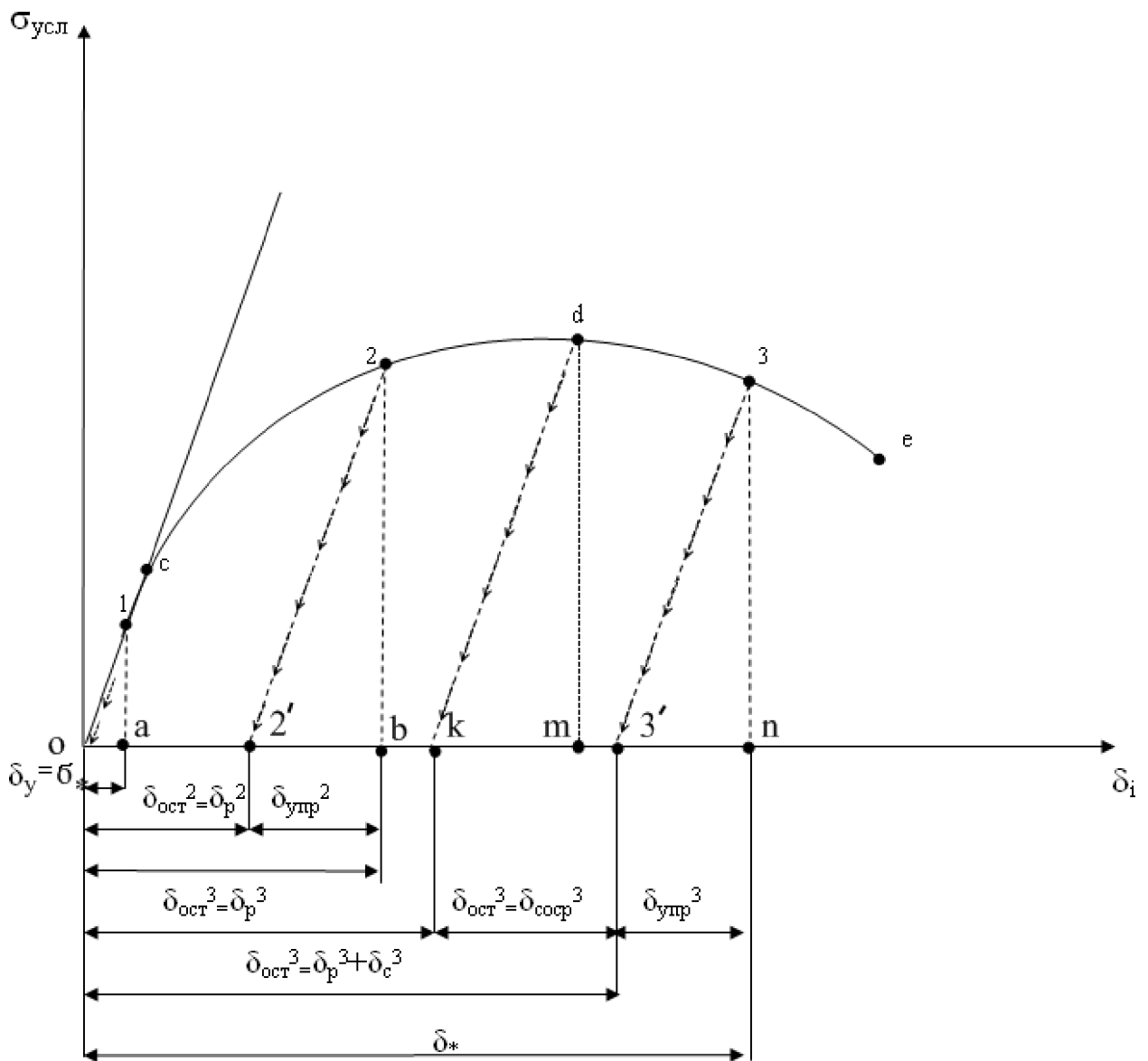


Рисунок 11 - Составляющие деформационного процесса растяжения образца: $\delta_{упр}$ - упругая ; δ_p - равномерная; δ_c – сосредоточенная; δ_* - полная (под нагрузкой) деформации

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. о, то есть остаточная деформация отсутствует.

Для точки 2 – деформация под нагрузкой соответствует отрезку «ов». После снятия нагрузки разгрузка осуществляется вдоль линии параллельной линии, соответствующей упругой деформации (ос) получим остаточную

деформацию, соответствующую отрезку $02'$, причем эта деформация будет равномерной.

Для точки 3 – деформация под нагрузкой соответствует отрезку «on». После снятия нагрузки получим остаточную деформацию, соответствующую отрезку «03'», причем т. «k» делит эту деформацию на равномерную «ок» и сосредоточенную «k3».

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

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 $\sigma_i = f(\delta_i)$, $\sigma_i = f(\psi_i)$ и $\sigma_i = f(\epsilon_i)$. то есть диаграммы истинных напряжений 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 12 приведена диаграмма истинных напряжений и для сравнения пунктиром изображена диаграмма условных напряжений.

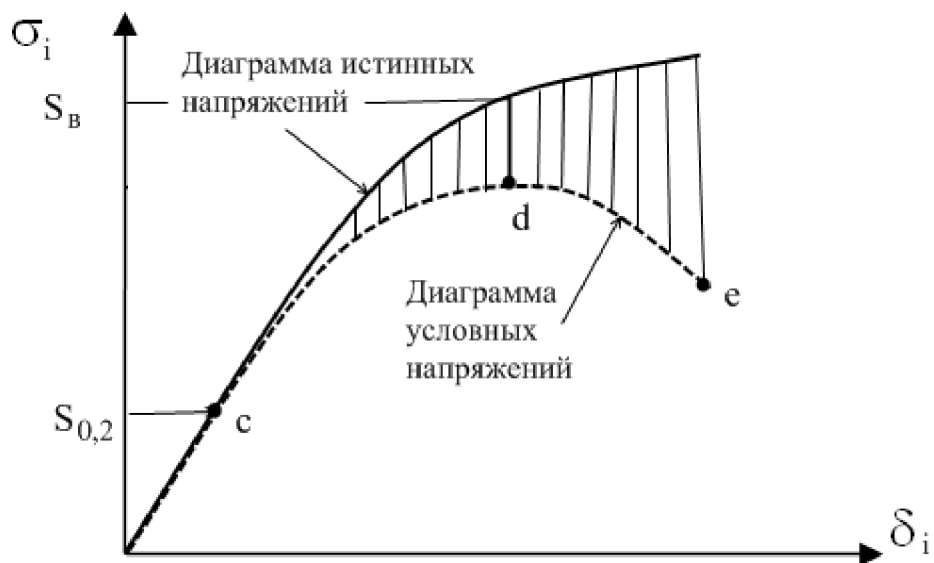


Рисунок 12 Диаграмма истинных напряжений $\sigma_i = f(e_i)$

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 .

$$S_{0,2} = \frac{P_c}{F_c}, \text{ но } F_c \approx F_0 \text{ (отличие только на величину упругой деформации)}$$

и, следовательно, $S_{0,2} \approx \sigma_{0,2}$, а $S_B = P_{\max}/F_d$.

Используя закон постоянства объема $F_0 l_0 = F_i l_i$, получим

$S_B = \sigma_B (1 + \delta_p)$ или $S_B = \sigma_B (1 - \psi_p)$. Реальное упрочнение металлов в процессе пластической деформации должно учитываться с помощью диаграмм истинных напряжений.

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 13).

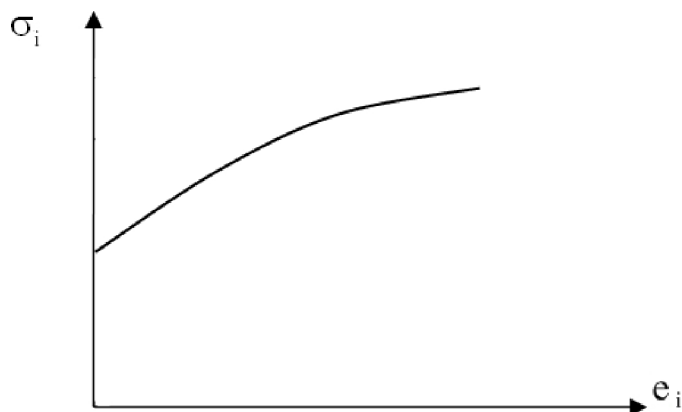


Рисунок 13 - Кривая упрочнения $\sigma_i = f(e_i)$

На рисунке 14 представлен процесс перехода от исходной индикаторной (машинной) диаграммы до кривой упрочнения.

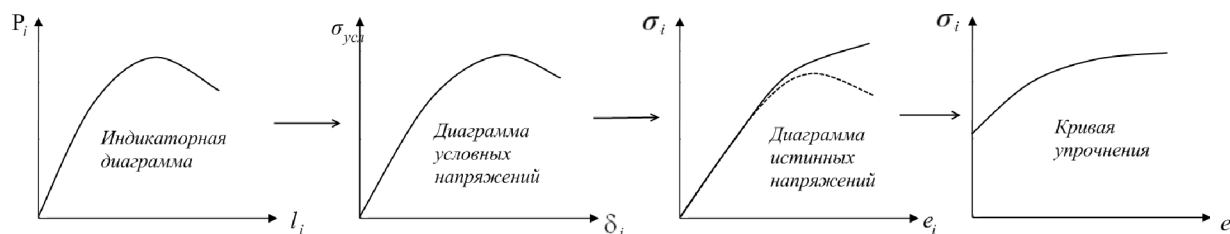


Рисунок 14 - От индикаторной диаграммы до кривой упрочнения

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

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 15).

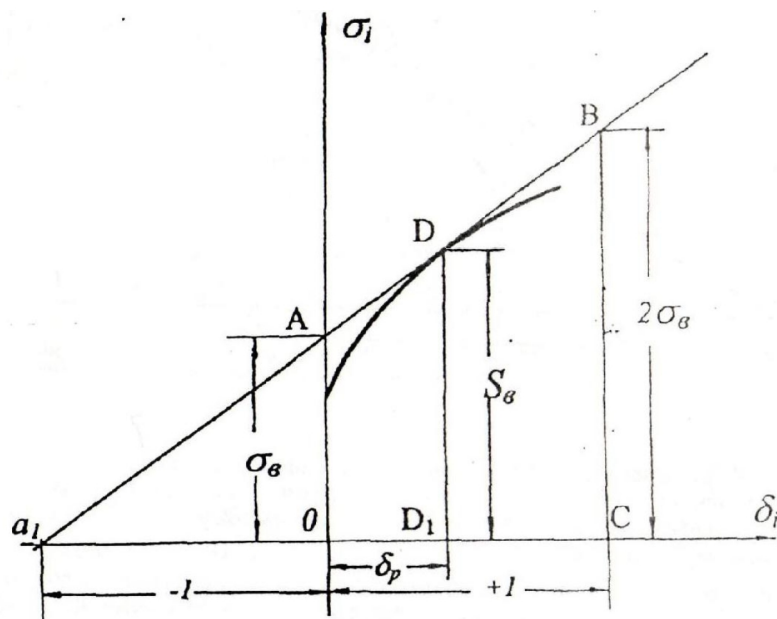


Рисунок 15 - Свойства кривых упрочнения первого рода

Для диаграммы условных напряжений $\sigma_{\text{усл}}$ d соответствует экстремуму функциональной зависимости $\sigma_{\text{усл}}(\delta)$, то есть $d\sigma_{\text{усл}}(d) = 0$.

Из закона постоянства объема

$$\sigma_{\text{усл}} = \frac{\sigma_i}{1 + \delta_i}$$

В точке d $d\sigma_{\text{усл}} = 0$,:

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

В точке d σ_i , δ_i имеют конкретные значения и обозначения S_B и δ_p

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

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 16 следует, что $\operatorname{tg} \alpha$ равен отношению отрезков «ad'/o'a» и, сопоставляя, с ранее полученным его значением, будем иметь:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S_B}{1 + \delta_p} = \frac{d'a}{o'a}$$

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

Из подобия треугольников o'ad' и o'oc' следует:

$$\frac{d'a}{o'a} = o'c \text{ и } o'c = \frac{S_B}{1 + \delta_p} = \sigma_B$$

Отложим вправо от начала координат отрезок равный +1. Восстановим перпендикуляр «mn» до пересечения с касательной.

Из подобия треугольников o'mn и o'oc' может быть найден отрезок $mn = 2\sigma_B$

Полученные значения отрезков $oo' = 1$; $o'c = \sigma_B$ и $mn \approx 2\sigma_B$ 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_B .
- 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 $2\sigma_B$.

7 Свойства кривых упрочнения II рода

Кривые упрочнения II рода построены в координатах σ_i . Проведем к точке d кривой упрочнения II рода касательную. Тогда точка d имеет

координаты S_B и ψ_p (рисунок 16). Для диаграмм условных напряжений в тд $d\delta_{\text{усл}} = 0$.

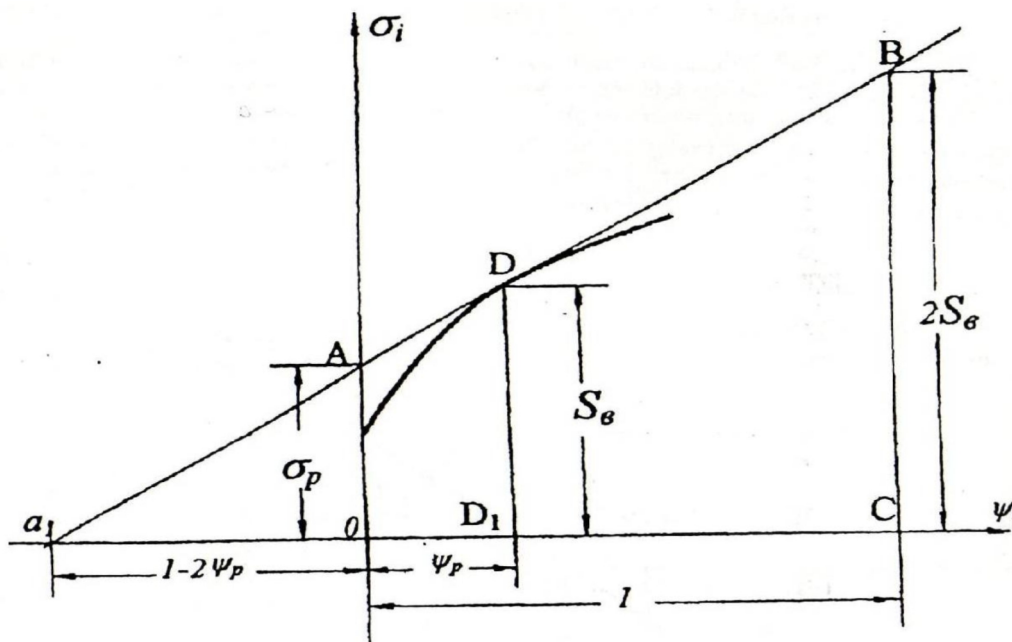


Рисунок 16 – Свойства кривых упрочнения II рода

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

Продифференцируем:

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

$$\text{в тд } \psi_i = \psi_p \quad \sigma_i = S_B$$

Точка

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

следовательно, отрезок $o \cdot a$ на рисунке 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 «nm». Из подобия треугольников $o \cdot d \cdot a$ и $o \cdot mn$ следует: отрезок «nm» равен $2S_B$

$$m = \frac{(-2\psi_P + 1)S_B}{1 - 2\psi_P + \psi_P} = \frac{2(-\psi_P)S_B}{1 - \psi_P} = 2S_B$$

Полученные значения отрезков « oo' » и « nm » 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 $2S_B$.

8 Построение диаграмм истинных напряжений

Для построения диаграммы истинных напряжений первого рода используется индикаторная диаграмма $P - \Delta l$. Первый метод основан на применении графических приемов. Область равномерной деформации Δl на индикаторной диаграмме разделяют на n точек, обычно 6-7 (рисунок 17). Прежде всего, находится масштаб записи по осям Δl и P_i :

$$M_{\Delta l} = \frac{\Delta l_{испыт}}{\Delta l_{диагр(ол)}} \text{ и } M_P = \frac{P_{\max испыт}}{P_{\max диагр(dk)}}$$

Δl_u – увеличение длины замеренное на образце при испытании;

Δl_d – соответствующая этому удлинению длина отрезка на диаграмме;

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

$P_{\max.диагр.}$ - длина соответствующего участка на диаграмме.

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

Затем вычисляют относительные удлинения испытуемого образца для выделенных точек:

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

и соответствующие текущие площади :

$$F_1 = \frac{F_o}{1 + \delta_1}, F_2 = \frac{F_o}{1 + \delta_2}, \dots, F_P = \frac{F_o}{1 + \delta_P}$$

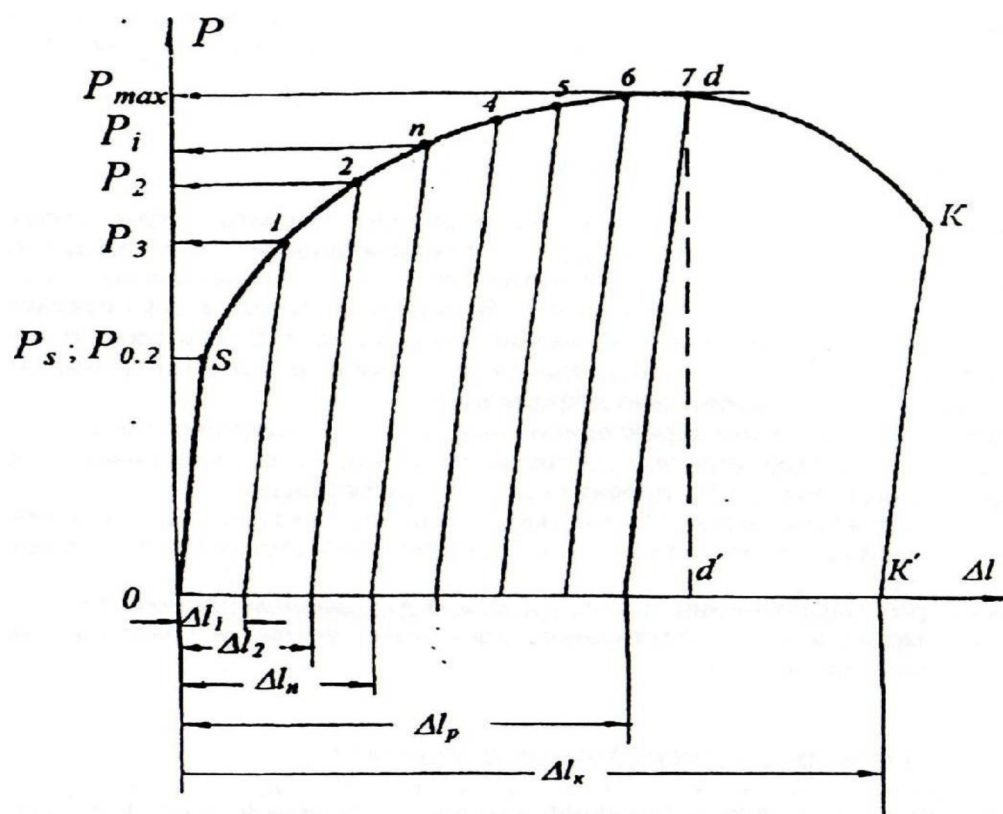


Рисунок 17 - Графическая обработка индикаторной диаграммы растяжения

Истинное напряжение σ_i получаем делением величины нагрузки на соответствующую площадь:

$$\sigma_{i1} = \frac{P_{d1} \cdot \mu_P}{F_1}, \sigma_{i2} = \frac{P_{d2} \cdot \mu_P}{F_2}, \dots, \sigma_{id} = \frac{P_{\max}}{F_P}$$

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

$$F_1 = \frac{F_0}{1 + \delta_1} = F_0 \left(1 - \psi_1 \right),$$

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:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_i}.$$

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

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

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:

$$\psi_i = \frac{F_i - F_0}{F_0} = 1 - \frac{F_i}{F_0}$$

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

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 В, соответствующую удлинению $\delta = -1$, проводят касательную к построенной кривой. Затем измеряют величину полученного отрезка АО 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 В, соответствующую сужению $1 - \psi_p$, проводят касательную к кривой упрочнения. Измеряя величину отрезка EF и сравнивая ее со значением $2S_B$, оценивают правильность построения кривой упрочнения 2-го рода.

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 ($\delta, \varphi, \epsilon$), 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 приближенные 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

$$\sigma_i = a + b\delta_i$$

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 20).

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

$$\sigma_i = \sigma_B (1 + \sigma_i)$$

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

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

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

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 21). 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:

$$\sigma_i = \frac{S_B}{\varphi_P^n} \varphi_i^n \quad (3)$$

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

$$P_i = \sigma_i \cdot F_i = F_i \cdot \frac{S_B}{\varphi_P^n} \cdot \varphi_i^n \quad (4)$$

Для которого в точке начала сосредоточенного сужения справедливо условие

$dP_i^{max} = 0$. Заменяя $F_i = F_0(1-\psi_i)$, дифференцируя выражение для P_i и приравнявая dP_i в точке, соответствующей $\psi_P = 0$, найдем формулу для определения коэффициента n :

$$n = \frac{\psi_P}{1 - \psi_P} \quad (5)$$

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

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

Степенная аппроксимация кривой упрочнения первого вида выразится следующей формулой:

$$\sigma_i = \frac{S_B}{\delta_p^n} \cdot \delta_i^n = S_B \left(\frac{\delta_i}{\delta_p} \right)^n$$

На практике довольно часто используется другое условие проведения степенной аппроксимации, когда аппроксимирующая функция имеет две общие точки с экспериментальной кривой.

Обычно это точки, соответствующие:

- моменту образования шейки (напряжение S_B и деформация δ_p);
- началу пластической деформации (напряжение предела текучести S_s или $S_{0,2}$).

Граничные условия для этих точек имеют вид

$$S_B = K \delta_p^n; \quad S_{S(0,2)} = K \delta_{S(0,2)}^n; \quad (6)$$

Решив систему уравнений с неизвестными K и n , получим

$$n = \frac{\ln S_B - \ln S_{S(0,2)}}{\ln \delta_p - \ln \delta_{S(0,2)}}; \quad (7)$$

Где $S_B = \sigma_B(1 + \delta_p)$, $S_{S(0,2)} \approx \sigma_{S(0,2)}$,

$$\delta_s = \frac{\sigma_s}{E} \quad \text{или} \quad \delta_{0,2} = 0,002.$$

Таким образом, зная константы механических свойств, по приведенным формулам можно найти коэффициенты аппроксимирующих зависимостей.

Аналогично определяются коэффициенты степенной аппроксимации k и n кривой упрочнения первого рода

$$\delta_i = k\delta_i^n$$

$$k = \frac{S_B}{\delta_p^n}, n = \frac{\delta_p}{1 + \delta_p}, \text{ а сама аппроксимирующая зависимость примет вид}$$

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

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 %.

11 Замечательные свойства 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, объемной), то кривые сольются, получим полное совпадение кривых. Этот факт и говорит об 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.

12 Кривые упрочнения металлов, подвергнутых динамическому нагружению

При высоких скоростях деформации ϵ происходит изменение механических свойств металла. Для оценки влияния ϵ на константы механических свойств $\sigma_B, \sigma_{0,2}, \delta$ 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.

Причем, как правило, $k_{\sigma_{0,2}} > k_{\sigma_B}$. Так, для сплава АМг6М коэффициенты динамичности имеют следующие значения $k_{\sigma_{0,2}} = 1,4 - 1,6$ $k_{\sigma_B} = 1,1 - 1,2$ $k_{\delta} = 1,6 - 1,8$.

Изменение констант механических свойств приводит к 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.

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.

Список использованных источников

- 1 Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Т.2 [Текст]/ С.И. Губкин. - М: Metallurgizdat, 1961.
- 2 Золотаревский В.С. Механические испытания и свойства металлов [Текст]/ В.С. Золотаревский.- М.: Metallurgiya, 1984
- 3 Уваров В.В. Упрочнение металлов при статическом растяжении. Методические указания к дом. заданию [Текст]/В.В. Уваров, В.А. Глущенко. – Самара, 1993. – 16 с.