

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

*В.А. ГЛУЩЕНКОВ*

# УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2012

УДК СГАУ: 621.7/9(075)  
ББК 34.5  
Г 555

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Г. В. Смирнов,  
начальник КБ отдела 2612 ФГУП РКЦ  
«ЦСКБ-ПРОГРЕСС» С. С. Боровой

*Глушечков, В.А.*

Г 555 **Упрочнение металлов в обработке металлов давлением:** учеб. пособие / В.А. Глушечков. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 36 с.

**ISBN 978-5-7883-0883-8**

В пособии представлен материал, раскрывающий назначение и использование кривых упрочнения в ОМД, всю цепочку их построения: от испытания образцов на растяжение (индикаторной кривой) до диаграмм условных и истинных напряжений. Большое внимание уделено свойствам и методам построения кривых упрочнения, их аппроксимации.

Представленный материал предполагается использовать при выполнении студентами курсовых и дипломных проектов, в лекционном курсе «Механические свойства металлов», а также при подготовке магистрантов по направлению 150400.68 – Металлургия.

УДК СГАУ: 621.7/9(075)  
ББК 34.5

**ISBN 978-5-7883-0883-8**

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Определение.....	4
2 Индикаторная диаграмма.....	7
3 Диаграмма условных напряжений.....	10
4 Диаграмма истинных напряжений.....	15
5 Кривые упрочнения.....	17
6 Свойства кривых упрочнения I рода.....	18
7 Свойства кривых упрочнения II рода.....	20
8 Построение диаграмм истинных напряжений.....	21
9 Проверка правильности построения кривых упрочнения.....	25
10 Аппроксимация кривых упрочнения. Определение коэффициентов аппроксимирующих зависимостей....	25
11 Свойства «единых» кривых упрочнения.....	30
12 Кривые упрочнения металлов, подвергнутых динамическому нагрузению.....	31
Список использованных источников.....	34

# 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  $\Delta l$  и уменьшается площадь поперечного сечения  $F$  на величину  $\Delta F$  (рис. 1).

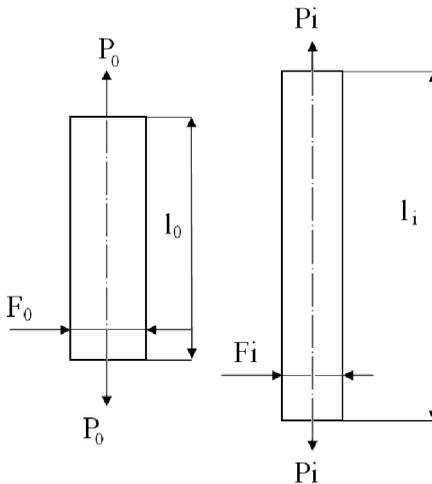


Рисунок 1 – Изменение размеров образца в процессе его растяжения:

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

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 рис. 2.

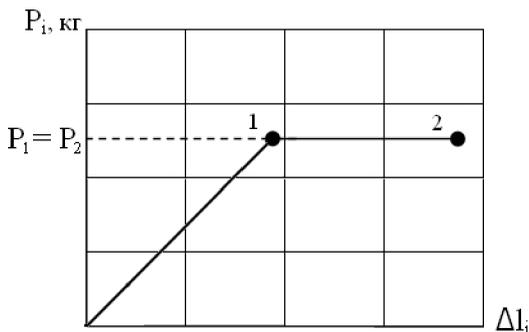


Рисунок 2 – Диаграмма  $P_i - \Delta l_i$  при испытании на растяжение образца из неупрочняемого материала;  $P_1 = P_2$

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

Диаграмма  $P_i - \Delta l_i$  для упрочняемого металла имеет вид, приведенный на рис. 3.

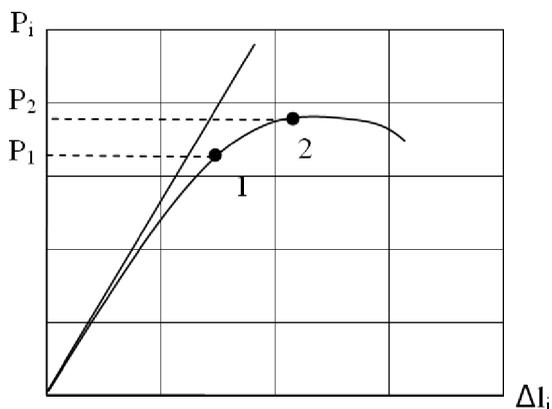


Рисунок 3 – Диаграмма  $P_i - \Delta l_i$  при испытании на растяжение образца из упрочняемого материала;  $P_2 > P_1$

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 (рис. 4).

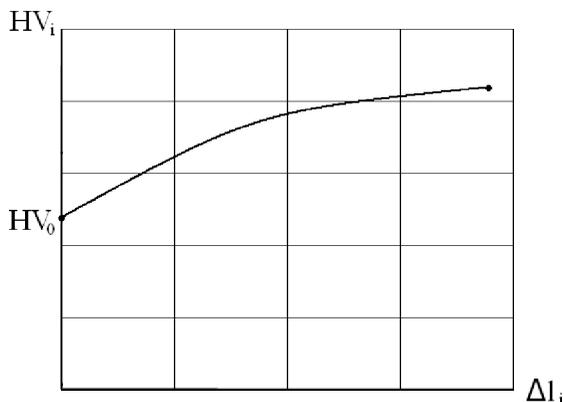


Рисунок 4 – Повышение твердости  $HV_i$  материала образца в результате его пластической деформации

Упрочнение, наклеп или повышение твердости металла – явления, которые сопровождают холодную пластическую деформацию. Эти явления связаны с природой деформирования или 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, происходит их дробление. Изменение структуры металла при пластической деформации (измельчение зерен, то есть получение мелкозернистой структуры) приводит к повышению твердости металла, 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.

## 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 рис. 5 в качестве примера приведена реальная диаграмма, полученная на испытательной машине Testometric при растяжении алюминиевого (АМг6М) образца с исходными размерами  $\varnothing = 10 \text{ мм}$ ,  $l = 100 \text{ мм}$ .

На индикаторной диаграмме (рис. 6) можно выделить два участка – упругий  $oc$  (в пределах которого действует закон Гука) и пластический  $cde$ , сопровождающийся упрочнением металла. Точка  $d$  на диаграмме соответствует  $P_{\text{max}}$  и разделяет пластическую область, в свою очередь, на два участка: первый  $dP > 0$  и второй (после точки  $d$ )  $dP < 0$ .

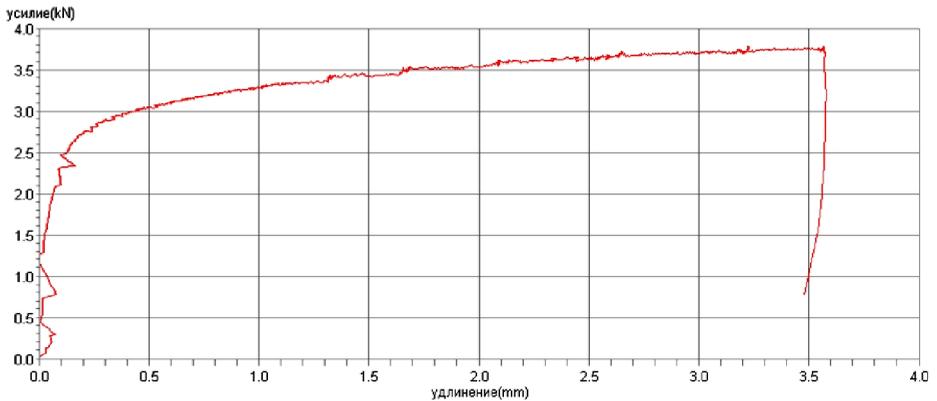


Рисунок 5 – Индикаторная (машинная) диаграмма растяжения цилиндрического образца

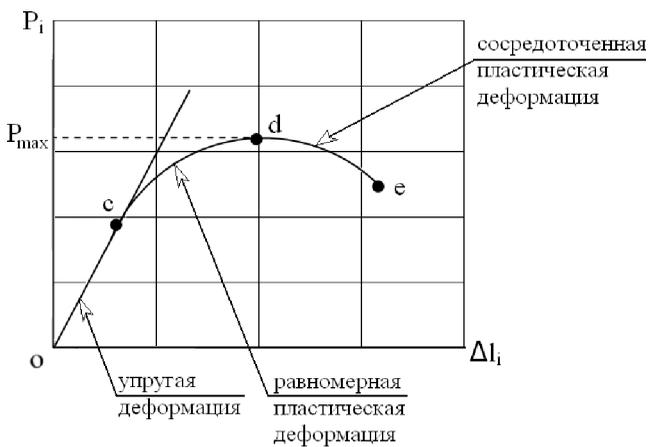


Рисунок 6 – Индикаторная диаграмма  $P_i - \Delta l_i$ . Участок  $oc$  – упругая деформация; участок  $cde$  – пластическая;  $cd$  – равномерная;  $de$  – сосредоточенная деформация

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

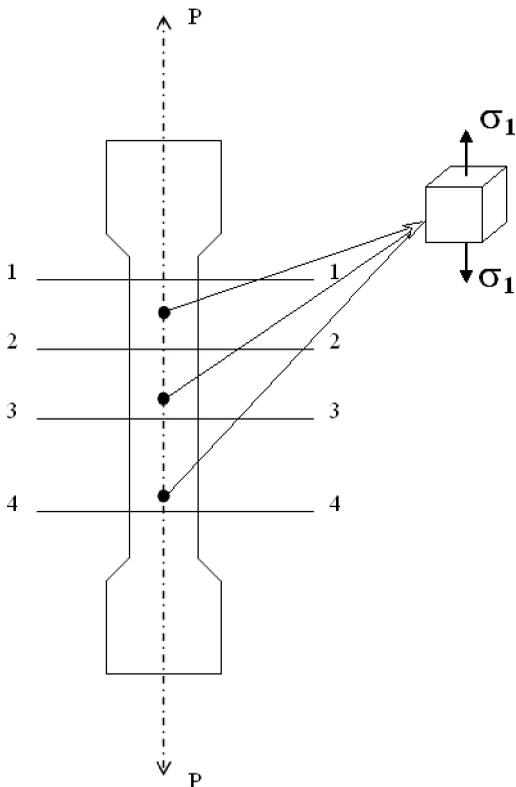


Рисунок 7 – Растяжение образца – стадии равномерной деформации:

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

Сечения 1-1 ÷ 4-4 – остаются неизменяемыми;

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

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

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

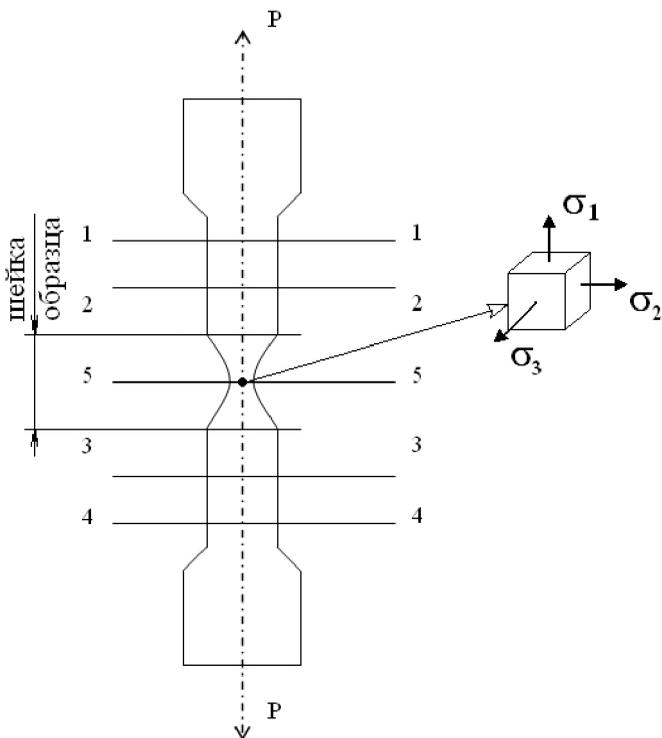


Рисунок 8 – Растяжение образца – стадия сосредоточенной деформации

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 (рис. 9), разделив текущие значения усилия  $P_i$  на исходную площадь испытываемого образца:  $\sigma_{\text{усл}} = P_i / F_0$ , а величину текущего абсолютного удлинения  $\Delta l_i$  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  $\Delta l_i$  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 (рис. 9).

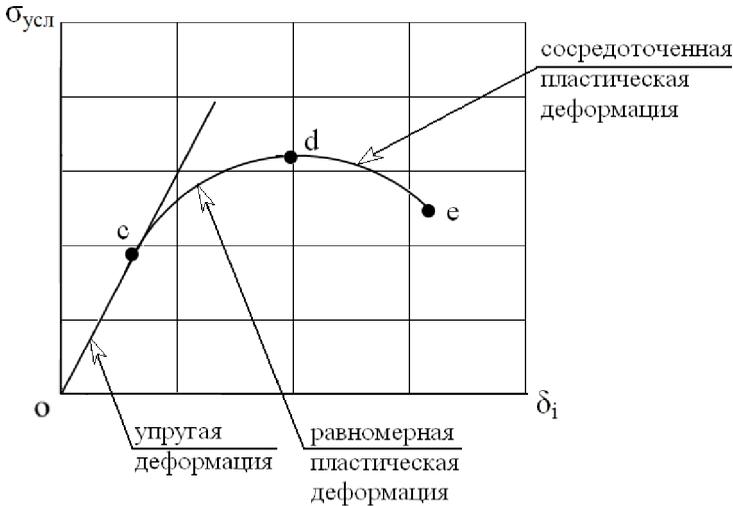


Рисунок 9 – Диаграмма условных напряжений  $\sigma_{\text{усл}} - \delta_1$ :  $oc$  – участок упругой деформации;  $cd$  – равномерной и  $de$  – сосредоточенной пластической деформации

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 выражены по-разному: относительное удлинение  $\delta$ , относительное сужение  $\psi$  ( $\psi = \Delta F/F_0$ ) и истинная (логарифмическая) деформация ( $e = \ln(l_k/l_0)$ ). Между деформационными характеристиками  $\delta$ ,  $\psi$  и  $e$  существует связь, вытекающая из закона постоянства объема, например  $\delta_i = \psi_i (1 - \psi_i)$ .

Истинная деформация – это сумма бесконечно малых относительных деформаций

— —

После преобразования

—————

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

В зависимости от способа оценки деформации  $\delta$ ,  $\psi$ ,  $e$  различают диаграммы условных напряжений I, II и III рода соответственно.

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

Для образцов из различных марок материала вид диаграмм условных напряжений меняется. Различают четыре их характерных вида со следующими особенностями (рис. 10):

- 1) наличие площадки текучести  $cc'$  (малоуглеродистые стали);
- 2) отсутствие площадки текучести и четко выраженная точка  $d$  ( $P_{\max}$ ) (см. рис. 6), наличие обеих 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).

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 (точка  $c$ ). Понятие «начинается» – качественное понятие. Количественное значение остаточной деформации для этой точки должно составлять 0,2 % от первоначальной дли-

ны  $l_0$ . 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  $\sigma_s$  или  $\sigma_T$ , то есть это также условное напряжение, но соответствующее площадке текучести:

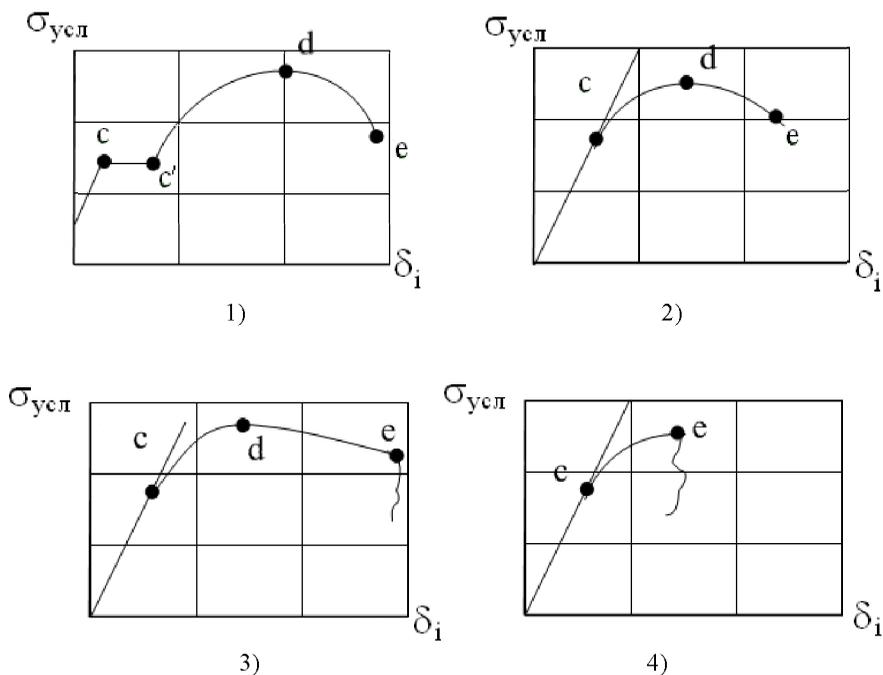


Рисунок 10 – Виды диаграмм условных напряжений для образцов из различных марок сплава

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

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 (рис. 11).

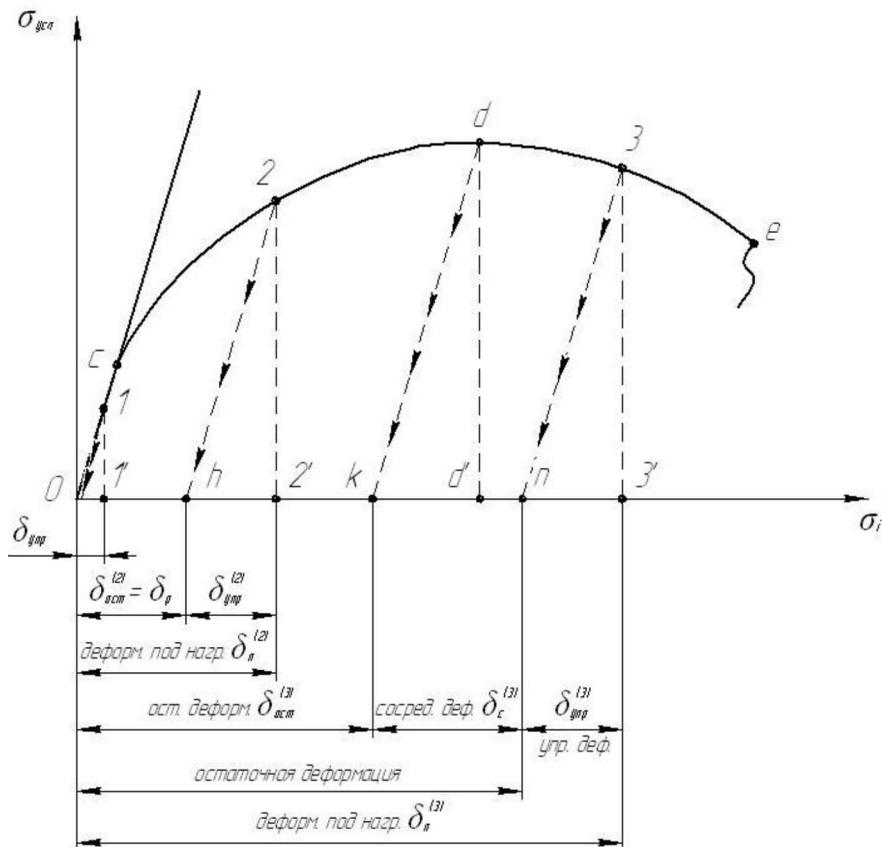


Рисунок 11 – Составляющие деформационного процесса растяжения образца

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  $0n$ , причем точка  $k$  делит эту деформацию на равномерную  $ok$  и сосредоточенную  $kn$ .

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.

Истинные напряжения в этом случае обозначим как  $\sigma_i$ . Итак,  $\sigma_i = P_i/F_i$ . Диаграммы истинных напряжений могут быть построены в координатах  $\sigma_i = f(\delta)$ ;  $\sigma_i = f(\psi_i)$  и  $\sigma_i = f(e_i)$ , то есть диаграммы истинных напряжений также могут быть I, II и III 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  $\sigma_i$  в этой области текущая нагрузка делится на минимальный диаметр в шейке образца. На рис. 12 приведена диаграмма истинных напряжений и для сравнения пунктиром изображена диаграмма условных напряжений.

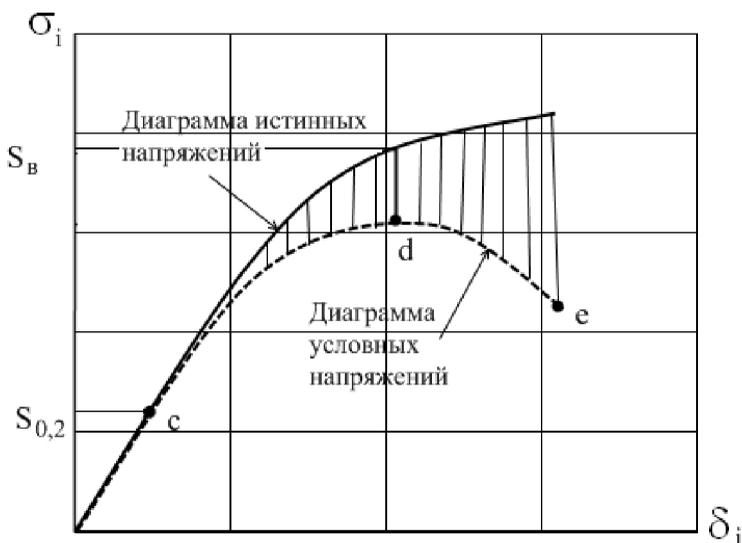


Рисунок 12 – Диаграмма истинных напряжений  $\sigma_I = f(\delta_i)$

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  $S_e$ .

—  
—

но  $F_c \approx F_o$  (отличие только на величину упругой деформации) и, следовательно,  $S_{0,2} \approx \sigma_{0,2}$ .

Используя закон постоянства объема  $F_o l_o = F_i l_i$ , получим

$$S_e = \sigma_e (1 + \delta_p)$$

или

$$S_e = \sigma_e / (1 - \psi_p).$$

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 *c*. Таким образом, «кривая упрочнения» отражает эффект упрочнения металла в процессе пластической деформации и является не чем иным, как «усечённой» диаграммой истинных напряжений (рис. 13).

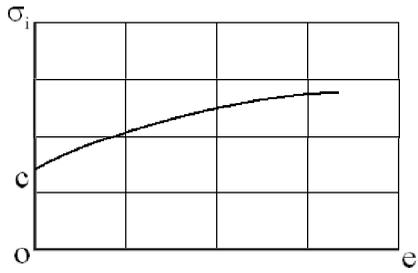


Рисунок 13 – Кривая упрочнения  $\sigma_i = f(e_i)$

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

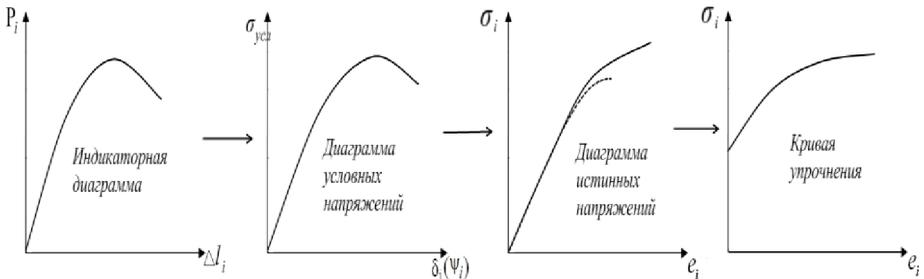


Рисунок 14 – От индикаторной диаграммы до кривой упрочнения

Такой переход осуществим для диаграмм I, II и III 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  $S_\sigma$  и  $\delta_p$  (рис. 15).

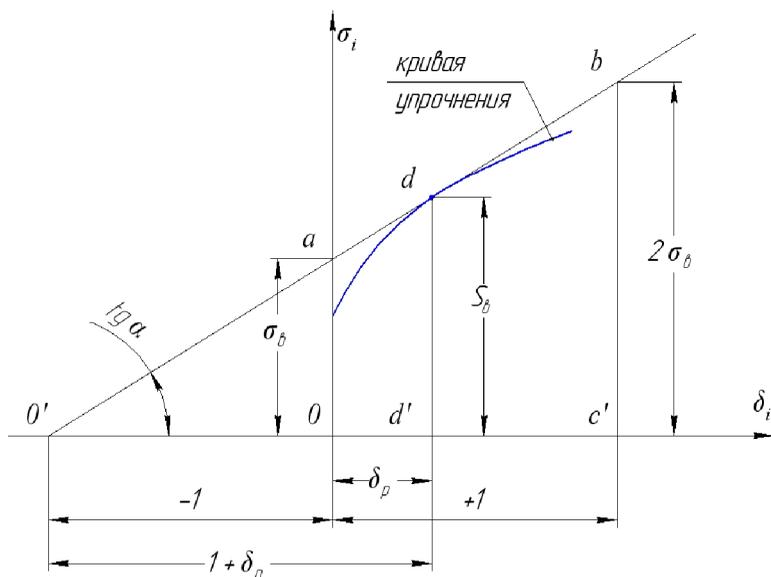


Рисунок 15 – Свойства кривых упрочнения первого рода

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

Используя закон постоянства объема, запишем

$$\sigma_{\text{усл}} = \sigma_i / (1 + \delta_i).$$

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

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

В точке  $d$  значения  $\sigma_i$ ,  $\delta_i$  имеют конкретные значения  $S_\sigma$  и  $\delta_p$ .

$$d\sigma_{yca} = \frac{dS_6 \cdot 1 + \delta_p - S_6 \cdot d\delta_p}{1 + \delta_p^2} = 0.$$

После преобразования получим:

$$\frac{dS_6}{d\delta_p} = \frac{S_6}{1 + \delta_p}$$

и по определению производной это есть  $\operatorname{tg} \alpha$ .

Из рис. 15 следует, что  $\operatorname{tg} \alpha$  равен отношению отрезков  $dd' / o'd'$  и, сопоставляя с ранее полученным его значением, будем иметь:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S_6}{1 + \delta_p} = \frac{dd'}{o'd'}.$$

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

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

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

$$oa = \frac{S_6}{1 + \delta_p} = \sigma_6.$$

Отложим вправо от начала координат отрезок, равный  $+1$ . Восставим перпендикуляр  $cb$  до пересечения с касательной. Из подобия треугольников  $obc'$  и  $o'ao$  может быть найден отрезок  $cb = 2\sigma_6$ .

Полученные значения отрезков  $oo' = 1$ ;  $oa = \sigma_6$  и  $cb \approx 2\sigma_6$  определяют свойства кривой упрочнения I рода:

- касательная, проведенная к кривой упрочнения I рода к точке начала сосредоточенной деформации, отсекает на оси ординат отрезок, равный  $\sigma_6$ ;

- касательная, проведенная к кривой упрочнения I рода к точке начала сосредоточенной деформации, отсекает на оси абсцисс слева от начала координат отрезок, равный  $-1$ ;

- касательная, проведенная к кривой упрочнения I рода к точке начала сосредоточенной деформации, отсекает на вертикали с координатой по оси абсцисс  $+1$  отрезок, равный  $2\sigma_6$ .

## 7 СВОЙСТВА КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ II РОДА

Кривые упрочнения II рода построены в координатах  $\sigma_i$  ( $\psi_i$ ). Проведем к точке  $d$  кривой упрочнения II рода касательную. Тогда точка  $d$  имеет координаты  $S_b$  и  $\psi_p$  (рис. 16). Для диаграмм условных напряжений в точке  $d$   $d\sigma_{ysl} = 0$ .

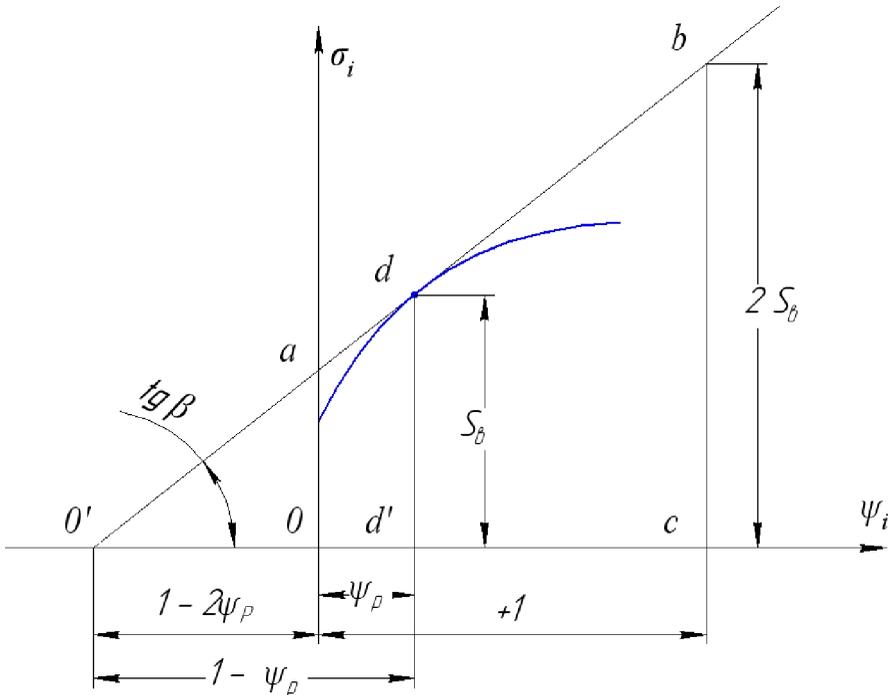


Рисунок 16 – Свойства кривых упрочнения II рода

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

Продифференцируем:

$$d\sigma_{ysl} = d\sigma_{ysl}(1 - \psi_i) - \sigma_i \cdot d\psi_i = 0,$$

в т. д.  $\psi_i = \psi_p$ ;  $\sigma_i = S_b$ .

Тогда

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{d\sigma_i}{d\psi_i} = \frac{S_b}{1 - \psi_p},$$

следовательно, отрезок  $o'd'$  на рис. 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  $o'dd'$  и  $o'bc$  следует: отрезок  $bc$  равен  $2S_6$ .

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 вертикали с координатой по оси абсцисс  $+1$  отрезок, равный  $2S_6$ .

## 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  $\Delta l_i$  на индикаторной диаграмме разделяют на  $n$  участков, обычно 6-7 (рис. 17) (последняя точка должна соответствовать  $P_{\max}$ ). Прежде всего находят масштабы записи диаграммы по осям  $\Delta l_i$  и  $P_i$ :

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

где  $\Delta l$  – 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.

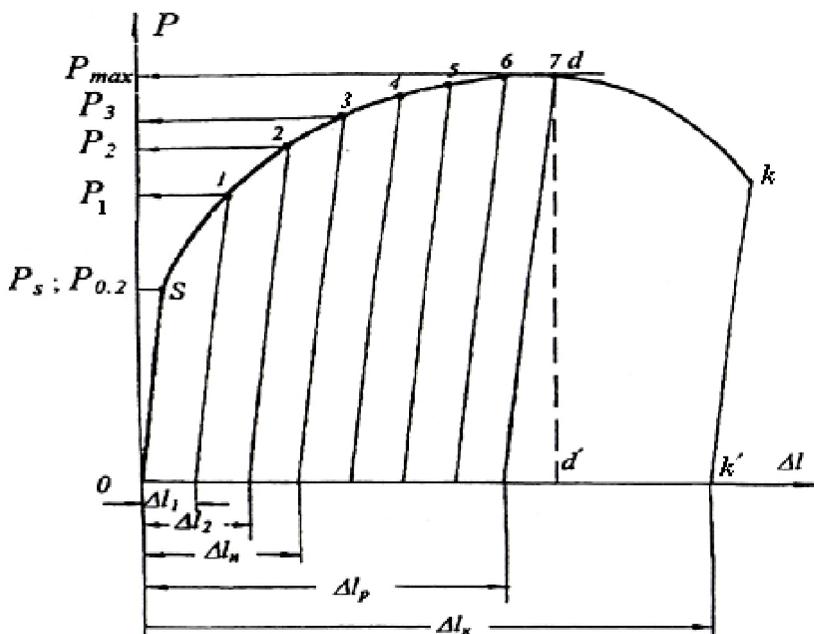


Рисунок 17 – Графическая обработка индикаторной диаграммы растяжения

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

Затем вычисляют относительные удлинения испытуемого образца для выделенных точек:

$$\text{-----} \quad \text{-----} \quad \text{-----}$$

и соответствующие текущие площади поперечного сечения:

$$F_1 = \frac{F_0}{1 + \delta_1}, F_2 = \frac{F_0}{1 + \delta_2}, \dots, F_n = \frac{F_0}{1 + \delta_n}.$$

Истинное напряжение  $\sigma_i$  получаем делением величины нагрузки ( $P_i / \mu_p$ ) 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  $\sigma_i$  и  $\delta_i$  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

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

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  $\sigma_i$  может быть подсчитана с учетом изменившейся схемы напряженно-деформированного состояния, то есть с введением поправочного коэффициента формы по формуле

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_{i0}} = \frac{d_0}{d_{\min}}$$

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

$R$  – радиус кривизны на контуре шейки (рис. 18).

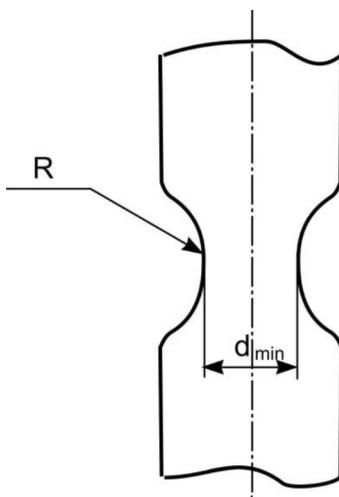


Рисунок 18 – Геометрические размеры образца в шейке

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

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, например, для кривой упрочнения I рода через точку  $o'$ , соответствующую удлинению  $\delta = -1$ , проводят касательную к построенной кривой. Затем измеряют величину полученного отрезка  $oa$  (см. рис. 15) и сравнивают ее со значением  $\sigma_s$ . Совпадение этих величин свидетельствует о правильности построения кривой упрочнения I рода.

Аналогично для кривой упрочнения II рода через точку  $o'$ , соответствующую сужению  $1 - \psi_p$ , проводят касательную к кривой упрочнения. Измеряя величину отрезка  $bc$  (рис. 16) и сравнивая ее со значением  $2S_s$ , оценивают правильность построения кривой упрочнения II 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  $\sigma_i = f(e_i)$  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 приближенным 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

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

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  $(S_\sigma, \delta_p)$  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 (рис. 19).

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

$$\sigma_i = \sigma_\sigma (1 + \delta_i).$$

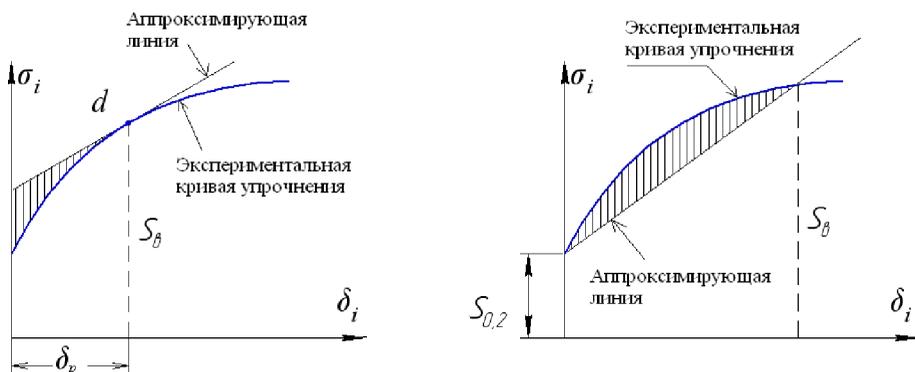


Рисунок 19 – Линейная аппроксимация кривых упрочнения

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:

$$a = \frac{\sigma_6}{1 - \varphi_P} \frac{1 - 2\varphi_P}{2}, \quad b = \frac{\sigma_6}{1 - \varphi_P} \frac{1}{2},$$

$$\sigma_i = \frac{\sigma_6}{1 - \varphi_P} \frac{1 - 2\varphi_P}{2} + \varphi_i.$$

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 (рис. 20).

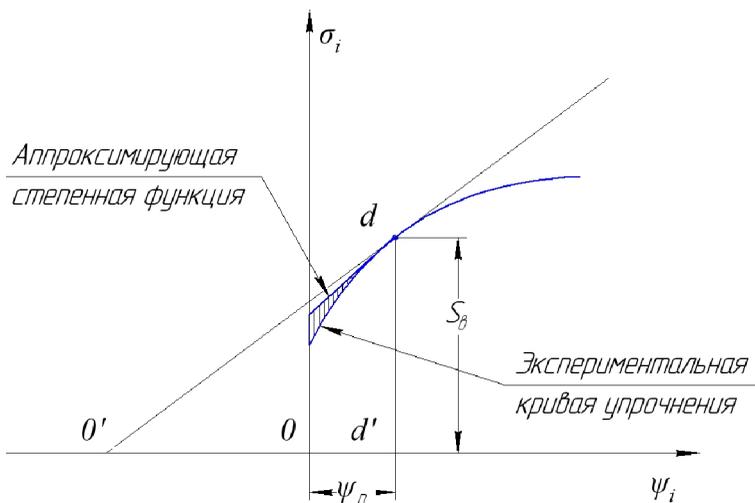


Рисунок 20 – Степенная аппроксимация кривых упрочнения

Степенная аппроксимирующая зависимость для кривой упрочнения II рода имеет вид

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

Подставляя в уравнение координаты точки начала сосредоточенной деформации  $(S_e, \varphi_p)$ , получим выражение для определения коэффициента  $k$ :

$$S_e = k\varphi_p^n,$$

$$k = \frac{S_e}{\varphi_p^n}.$$

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

$$\sigma_i = \frac{S_e}{\varphi_p^n} \varphi_i^n.$$

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

$$P_i = \sigma_i \cdot F_i = F_i \cdot \frac{S_0}{\varphi_P^n} \cdot \varphi_i^n,$$

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  $\psi_P$ , соответствующей 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 I рода:

— —————

Степенная аппроксимация кривой упрочнения I рода выразится следующей формулой:

— —————

Часто используется другое условие проведения степенной аппроксимирующей функции: аппроксимирующая степенная функция должна проходить через две точки: истинного предела текучести и истинного предела прочности. Координаты этих точек для кривой упрочнения I рода  $(S_{0,2}, \delta_{0,2})$  и  $(S_0, \delta_p)$ .

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

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

Решение системы дает возможность определить  $k$  и  $n$ :

$$k = \frac{S_e}{\delta_p^n},$$

$$n = \frac{\ln S_e - \ln S_{0,2}}{\ln \delta_p - \ln \delta_{0,2}},$$

где  $S_e = \sigma_e (1 + \delta_p)$ ,  $S_{0,2} \approx \sigma_{0,2}$ ,

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

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 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 и получим полное совпадение кривых. Этот факт 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.

## 12 КРИВЫЕ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ДИНАМИЧЕСКОМУ НАГРУЖЕНИЮ

При высоких скоростях деформации происходит изменение механических свойств металла. Для оценки влияния на константы механических свойств  $\sigma_6$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  вводятся соответствующие коэффициенты динамичности:

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

$$k_{\sigma_6} = \frac{\sigma_6^{дин}}{\sigma_6^{ст}},$$

$$k_{\delta} = \frac{\delta^{дин}}{\delta^{ст}}.$$

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:  $k_{\sigma_{0,2}} = 1,4 - 1,6$ ;  $k_{\sigma_6} = 1,1 - 1,2$ ;  $k_{\delta} = 1,6 - 1,8$ .

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 (рис. 21).

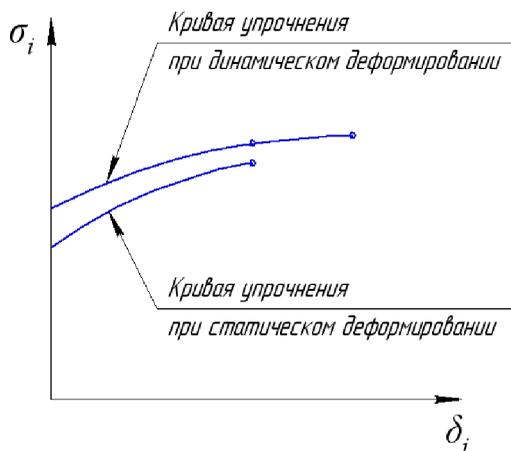


Рисунок 21 – Статические и динамические кривые упрочнения

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.

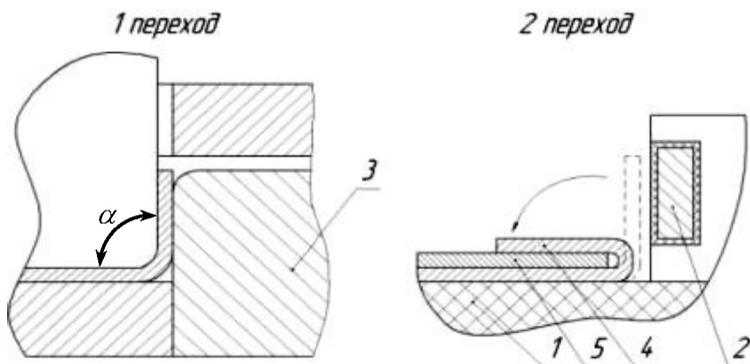


Рисунок 22 – Комбинированная технология «зафланцовки»:  
 1 – корпус индуктора, 2 – виток индуктора, 3 – матрица,  
 4 – внешняя заготовка, 5 – внутренняя заготовка

Так, например, операция «зафланцовки» может осуществляться в два этапа: гибка на угол  $\alpha = 90^\circ$  осуществляется в инструментальном штампе (статическая нагрузка), а дальнейшая гибка на угол  $\alpha = 180^\circ$  – импульсным магнитным полем (динамическая нагрузка) (рис. 22).

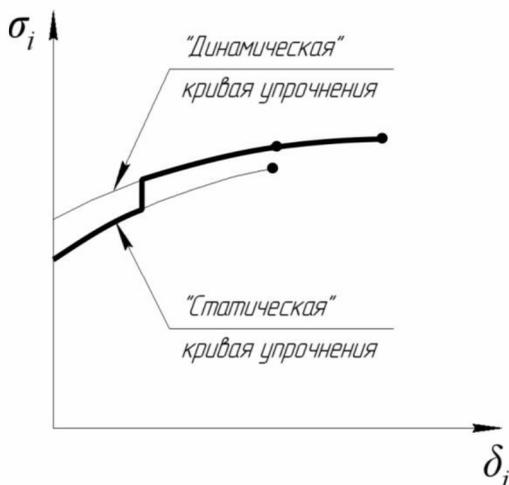


Рисунок 22 – Переход со статической на динамическую кривую упрочнения

Таким образом, кривые упрочнения и особенно их математическое выражение позволяют оценивать эффект упрочнения металла при расчете или моделировании режимов пластического деформирования процессов ОМД (рис. 23).

## 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 [Текст]: метод. указания к дом. заданию / В.В. Уваров, В.А. Глущенко. – Самара, 1993. – 16 с.
- 4 Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов– М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
- 5 Пэжина, П. Основные вопросы вязкопластичности [Текст] / П. Пэжина; пер. с англ. – М.: Мир, 1968. – 176 с.

Учебное издание

*Глуценков Владимир Александрович*

**УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ  
В ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

*Учебное пособие*

Редактор Н. С. Купринова  
Компьютерная верстка Т. Е. Половнева

Подписано в печать 12.10.2012 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 2,25.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. 11/2012

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34