

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПУТЯХ НАГРУЖЕНИЯ

К. КАСАП

Кафедра Технической Механики Будапештского Политехнического Университета

(Поступило: 28-го сентября 1969 г.)

Представлено проф. д-р Д. Козмани

Введение

В настоящей работе автор определяет работу пластической деформации при различных путях нагружения по опытам, проведенным на никелевых и медных трубках. Рассматривается влияние «истории» нагружения на величину работы пластической деформации, совершенной до нагружения.

Эти исследования могут быть связаны с теориями предельного напряжения, основанными на удельной работе деформации. Удельная работа деформации в первую очередь используется как критерий текучести, но имеет важную роль и в исследовании условий разрушения [1—4].

По известным нам литературным данным работа деформации, совершенная до разрушения, определялась главным образом только из осевого растяжения, сжатия и кручения. Диапазон проведенных опытов недостаточно широк для полного определения роли работы деформации в возникновении разрушения, — для этого необходимы дальнейшие эксперименты.

Методика расчета работы деформации

В расчетах материал рассматривается как континуум, и изменение его объема в течение пластической деформации равняется нулю.

В настоящей работе расчеты ведутся по «истинным» напряжениям. С целью упрощения расчетов помимо истинных напряжений целесообразно пользоваться «истинными», т. е. логарифмическими удлинениями [5].

а) Пусть заданы напряженное и деформированное состояния в данной точке тела в каком-то данном моменте процесса деформации тензорами Φ и E . На дальнейшем, довольно маленьком участке процесса деформации предполагается, что изменением Φ можно пренебречь, а приращение E равняется δE . Этими обозначениями выражение для удельной работы деформации будет:

$$\delta W = \Phi \cdot \delta E, \quad (1)$$

где обе точки обозначают двойное скалярное произведение двух тензоров.

Работу деформации можно представить, как сумму работ изменения объема (δW_0) и изменения формы (δW_d):

$$\delta W = \delta W_0 + \delta W_d. \quad (2)$$

Работа изменения объема:

$$\delta W_0 = 3\sigma_k \cdot \delta\epsilon_k, \quad (3)$$

где

$$\sigma_k = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}. \quad (4)$$

Здесь $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения,

$$\delta\epsilon_k = \frac{\delta\epsilon_1 + \delta\epsilon_2 + \delta\epsilon_3}{3}, \quad (5)$$

$\delta\epsilon_1, \delta\epsilon_2, \delta\epsilon_3$ — главные компоненты тензора δE . Работа изменения формы:

$$\delta W_d = \Phi_d \cdot \delta E_d, \quad (6)$$

где Φ_d — девиатор напряжения,

δE_d — приращение девиатора деформации.

б) При обработке результатов опытов использовалось пятимерное ортогональное пространство девиаторов напряжения и деформации [6]. Вектор девиатора напряжения обозначается через $\bar{S}$, а приращение вектора девиатора деформации через $\delta\bar{\mathcal{E}}$. Компоненты вектора напряжения $\bar{S}$:

$$S_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma'_{11}; \quad S_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} (\sigma'_{22} - \sigma'_{33}); \quad (7)$$

$$S_3 = \sqrt{2} \sigma'_{12}; \quad S_4 = \sqrt{2} \sigma'_{23}; \quad S_5 = \sqrt{2} \sigma'_{31},$$

где

$$\sigma'_{mn} = \sigma_{mn} - \sigma_k \cdot \delta_{mn}; \quad (m, n = 1, 2, 3), \quad (8)$$

σ'_{mn} — координаты девиатора напряжения,

σ_{mn} — координаты тензора напряжения,

$$\delta_{mn} \begin{cases} 1 & \text{если } m = n \\ 0 & \text{если } m \neq n. \end{cases}$$

Координаты приращения вектора деформации $\delta\bar{\mathcal{E}}$:

$$\delta\mathcal{E}_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} \delta e_{11}; \quad \delta\mathcal{E}_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} (\delta e_{22} - \delta e_{33}); \quad (9)$$

$$\delta\mathcal{E}_3 = \sqrt{2} \delta e_{12}; \quad \delta\mathcal{E}_4 = \sqrt{2} \delta e_{23}; \quad \delta\mathcal{E}_5 = \sqrt{2} \delta e_{31}.$$

где

$$\delta e_{mn} = \delta \varepsilon_{mn} - \delta \varepsilon_K \cdot \delta_{mn}; \quad (m, n = 1, 2, 3), \quad (10)$$

δe_{mn} — координаты приращения девиатора деформации,

$\delta \varepsilon_{mn}$ — координаты приращения тензора деформации.

Проделив умножение по уравнению (6) координатами (8) и (10), с учетом (7) и (9) получается:

$$\delta W_d = \Phi_d \cdot \delta E_d = \bar{S} \cdot \bar{\delta \mathcal{E}}. \quad (11)$$

Вводим следующие обозначения:

$$S = |\bar{S}|; \quad \mathcal{E} = |\bar{\mathcal{E}}|; \quad \delta \mathcal{E} = |\bar{\delta \mathcal{E}}|;$$

ω — угол между $\bar{S}$ и $\bar{\delta \mathcal{E}}$.

Этими обозначениями уравнение (11) получит вид:

$$\delta W_d = S \cdot \delta \mathcal{E} \cdot \cos \omega. \quad (12)$$

Вместо S — пропорциональной ему интенсивностью напряжения (σ_i), а вместо $\mathcal{E}$ — интенсивностью деформации (ε_i), принято пользоваться. Связь между ними [6]:

$$S = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_i; \quad \mathcal{E} = \sqrt{\frac{3}{2}} \varepsilon_i, \quad (13)$$

где

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (14)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}. \quad (15)$$

Здесь $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ — главные удлинения.

Аналогично уравнению (15) вводим следующее обозначение:

$$\delta \varepsilon_i^* = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\delta \varepsilon_1 - \delta \varepsilon_2)^2 + (\delta \varepsilon_2 - \delta \varepsilon_3)^2 + (\delta \varepsilon_3 - \delta \varepsilon_1)^2}. \quad (16)$$

Знак* обозначает, что $\delta \varepsilon_i^*$ не является приращением интенсивности деформации, а является интенсивностью, полученной из приращения деформации. Аналогично уравнению (13):

$$\delta \mathcal{E} = \sqrt{\frac{3}{2}} \delta \varepsilon_i^*. \quad (17)$$

Учитывая выражения (13), (17), уравнение (12) можно привести к следующему виду:

$$\delta W_d = \sigma_i \cdot \delta \varepsilon_i^* \cdot \cos \omega. \quad (18)$$

Выражение работы деформации с учетом формул (2), (3), (18):

$$\delta W_d = 3\sigma_k \cdot \delta \varepsilon_k + \sigma_i \cdot \delta \varepsilon_i^* \cdot \cos \omega. \quad (19)$$

в) Работу деформации можно разделять на сумму работ упругой (δW_r) и пластической (δW_p) деформации. Для расчета этих величин необходимо разложить приращение вектора деформации на компоненты:

$$\overline{\delta \Theta} = \overline{\delta \Theta}_r + \overline{\delta \Theta}_p. \quad (20)$$

С учетом выражений (2), (3), (11), (20) можно написать, что

$$\delta W = \delta W_r + \delta W_p = 3\sigma_k \cdot \delta \varepsilon_k + \overline{S} \cdot \overline{\delta \Theta}_r + \overline{S} \cdot \overline{\delta \Theta}_p. \quad (21)$$

В уравнении (21)

$$\delta W_r = 3\sigma_k \cdot \delta \varepsilon_k + \overline{S} \cdot \overline{\delta \Theta}_r, \quad (22)$$

$$\delta W_p = \overline{S} \cdot \overline{\delta \Theta}_p. \quad (23)$$

Работа пластической деформации, выраженная с помощью интенсивности напряжения и приращения деформации:

$$\delta W_p = \sigma_i \cdot \delta \varepsilon_{ip}^* \cdot \cos \omega_p, \quad (24)$$

где

$$\cos \omega_p = \frac{\overline{S} \cdot \overline{\delta \Theta}_p}{S \cdot \delta \Theta_p}. \quad (25)$$

В формулах (24), (25) — и в дальнейшем — индекс p означает, что эти величины определяются из остающейся части деформации (разгруженное состояние).

При больших пластических деформациях упругая деформация значительно меньше остающейся деформации.

Тогда

$$\delta W_r \ll \delta W_p, \quad (26)$$

поэтому в этом случае

$$\delta W \cong \delta W_p. \quad (27)$$

г) В настоящей работе, работа пластической деформации определяется из опытов на тонкостенных трубках. Трубки были нагружены одновременно растягивающей силой и внутренним гидростатическим давлением. В дальнейшем рассматривается этот случай нагружения. В этом случае главные оси напряжения и деформации совпадут с осевым, радиальным и тангенциальным направлениями трубок. Координаты S_3, S_4, S_5 и координаты $\delta\epsilon_3, \delta\epsilon_4, \delta\epsilon_5$ равняются нулю.

Расчет S_1, S_2 проводится по формулам (7), с учетом того, что радиальное напряжение, происходящее из внутреннего давления в случае тонкостенных труб:

$$\sigma_r \cong 0. \quad (28)$$

По формулам (7) и (8) для нашего случая,

$$\sigma_{11} = \sigma_a; \quad \sigma_{22} = \sigma_t; \quad \sigma_{33} = \sigma_r = 0 \quad \text{и} \quad \sigma_{mn} = 0,$$

если $m \neq n$, то

$$S_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} (\sigma_a - 0,5\sigma_t); \quad S_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_t, \quad (29)$$

где

σ_a — осевое напряжение,

σ_t — тангенциальное напряжение.

Учитывая, что в процессе пластической деформации объем не меняется, то аналогично написанным выше по формуле (9), получим:

$$\delta\epsilon_{1p} = \sqrt{\frac{3}{2}} \delta\epsilon_{ap}; \quad \delta\epsilon_{2p} = \frac{\sqrt{2}}{2} (\delta\epsilon_{ap} + 2\delta\epsilon_{tp}). \quad (30)$$

Из выражений (14), (16), (25), (13) получаются формулы для определения интенсивности приращения деформации, интенсивности напряжения и угла ω_p :

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_t^2 - \sigma_a \cdot \sigma_t}, \quad (31)$$

$$\delta\epsilon_{ip}^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\delta\epsilon_{ap}^2 + \delta\epsilon_{tp}^2 + \delta\epsilon_{ap} \cdot \delta\epsilon_{tp}}, \quad (32)$$

$$\cos \omega_p = \frac{S_1 \cdot \delta\epsilon_{1p} + S_2 \cdot \delta\epsilon_{2p}}{\sigma_i \cdot \delta\epsilon_{ip}^*} = \frac{\sigma_a \cdot \delta\epsilon_{ap} + \sigma_t \cdot \delta\epsilon_{tp}}{\sigma_i \cdot \delta\epsilon_{ip}^*}. \quad (33)$$

Вводим следующие обозначения:

$$\sigma_i^* = \sigma_i \cdot \cos \omega_p; \quad \varepsilon_i^* = \sum \delta \varepsilon_{ip}^*. \quad (34)$$

Удельная работа пластической деформации, совершенная до разрушения (А) — из-за краткости в дальнейшем назовем работой разрушения — по формуле (24), учитывая (34):

$$A = \sum_{OC} \delta W_p = \int_0^{\varepsilon_{ic}^*} \sigma_i^* d\varepsilon_{ip}^*. \quad (35)$$

где

$$\varepsilon_{ic}^* = \sum_{OC} \delta \varepsilon_{ip}^*.$$

$\sum_{OC}$ — означает, что суммирование ведется от начала нагружения (О) до разрушения (С).

Общее построение эксперимента

На никелевых и медных трубках проводились простые и сложные нагружения.¹ В случае сложного нагружения, нагружение проводилось в двух ступенях. В первой ступени отдельные группы труб нагружались по-разному, а потом разгружались. Во второй ступени все трубки разрушались по одинаковому процессу нагружения.

Характерные точки процесса нагружения обозначаются следующими буквами:

- О — начало нагружения
- А — конец первой ступени нагружения
- В — предел несущей способности²
- С — точка, соответствующая разрушению.

Эти буквы используются, как индексы напряжения и удельной деформации, соответствующих данным точкам нагружения.

¹ Нагружение называется простым, если все компоненты вектора напряжения во время нагружения меняются пропорционально одному общему параметру. Если это условие не выполняется, то процесс нагружения является сложным.

² Образец вида трубки нагруженный растягивающей силой (F) и внутренним давлением (p) одновременно или отдельно, достигает предела несущей способности, когда F и p одновременно или отдельно достигают такой величины, при которой трубка разрушается.

Для характеристики процессов нагружения вводятся следующие обозначения:

$$N = \frac{\sigma_a}{\sigma_t}, \quad (36)$$

$$\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1}. \quad (37)$$

где μ — параметр Надаи-Лодэ.

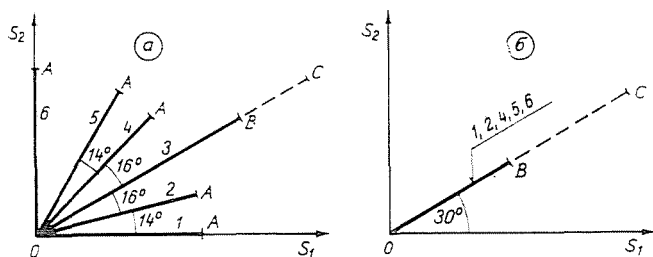


Рис. 1. Траектории нагружения никелевых и медных трубок. а) Первая ступень нагружения; б) Вторая ступень нагружения

Траектории нагружения изображаются в системе координат S_1, S_2 , где S_1, S_2 определяются формулами (29).

Траектории нагружения никелевых и медных трубок показаны на рис. 1а и 1б. На рис. 1а представлена первая ступень нагружения, а на рис. 1б вторая ступень нагружения. В случае никелевых трубок нагружение проводилось по программам 1, 2, 3, 4, 5, 6, а в случае медных трубок по программам 3 и 6. Нагружение 3 является простым. Параметр N в течении нагружения не меняется и совпадает с параметром N второй ступени нагружения. При всех нагружениях во второй ступени параметр μ и направление главных осей совпадают, различна только т. н. «история» нагружения. При таком методе нагружения становится возможным исследование влияния истории нагружения на работу разрушения независимо от влияния других параметров.

В процессе нагружения на трубке появляются местные деформации, например, при растяжении сужение, а при внутреннем давлении выпучивание. Выбрали такой метод нагружения, при котором большие местные деформации не появляются.

В случае нагружения тонкостенных труб внутренним давлением и растягивающей силой наименьшая местная деформация возникает при $\mu = 0$ ($N = 2$), в этом случае диаметр трубки в процессе нагружения не меняется и сужение и выпучивание не наблюдаются [7]. Поэтому во второй

ступени выбран этот метод нагружения. Средний диаметр трубки остается постоянным и по результатам наших экспериментов, но по толщине стенки и в этом случае возникает сужение.

Граница первой ступени нагружения определялась так, чтобы деформация в первой ступени была по возможности большой, но еще не появилась местная деформация. Данные точки A кривой $\sigma_i^* = f(\epsilon_i^*)$ приведены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики траекторий осуществленных программ нагружения

Материал	Обозначение программы	участок $O-A$		участок $A-B$		Данные точки A	
		μ	N	μ	N	ϵ_A [%]	σ_{1A} [$\frac{кг}{мм^2}$]
Никель	1	-1	∞			18,00	40,61
	2	-0,5	4			16,25	35,23
	3	0	2			—	—
	4	0,5	1,33	0	2	19,00	37,08
	5	1	1			16,15	34,56
	6	0	0,5			16,62	32,54
Медь	3	0	2			—	—
	6	0	0,5	0	2	21,38	21,63

Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились в Лаборатории Кафедры Сопротивления Материалов Ленинградского Политехнического Института, на установке, описанной в [8]. С помощью этой установки возможно одновременное нагружение образца в виде трубки, растягивающей силой и внутренним гидростатическим давлением.

Во время экспериментов размеры трубки, рабочая длина и диаметр определялись после разгрузки. Толщина стенки трубки в области равномерной деформации не измерялась, а определялась из условия постоянства объема. После разрушения диаметр трубки и толщина стенки измерялись на месте разрушения, а удельное удлинение в осевом направлении определялось также из условия постоянства объема.

Данные образцов, изготовленных из никелевых трубок:

Материал: сплав никеля ТУ—18—33—51

Содержание никеля: мин. 99,73%

Длина образцов: 220 мм

Наружный диаметр образцов: $D_0 = 7,5$ мм

Толщина стенки: $\nu_0 = 0,25$ мм.

Данные образцов, изготовленных из медных трубок:

Материал: сплав меди М2

Содержание меди: мин. 99,7%

Длина образцов: 220 мм

Наружный диаметр: $D_0 = 7,92$ мм

Толщина стенки: $\nu_0 = 0,50$ мм.

Определение работы разрушения

Для определения работы разрушения процесс нагружения разделяется на два участка:

участок $O-B$ — от начала нагружения до предела несущей способности, участок $B-C$ — от предела несущей способности до разрушения.

Это разделение необходимо было, потому что диаграмму $\sigma_i^* = f(\epsilon_i^*)$ измерением возможно было снять только до предела несущей способности. С помощью имеющегося измерительного устройства в области неравномерной деформации (участок BC) растягивающую силу невозможно было измерять.

На основании разделения, изложенного выше, работа разрушения по формуле (35) имеет вид:

$$A = A_{OB} + A_{BC} = \int_0^{\epsilon_{iB}^*} \sigma_i^* d\epsilon_{ip}^* + \int_{\epsilon_{iB}^*}^{\epsilon_{iC}^*} \sigma_i^* d\epsilon_{ip}^*. \quad (38)$$

Диаграммы $\sigma_i^* = f(\epsilon_i^*)$ до предела прочности (участок OB) для никелевых трубок изображены на рис. 2, а для медных трубок на рис. 3. На рисунках индексы рядом с A и B обозначают, что какому процессу нагружения соответствуют данные точки. В каждой программе нагружения эксперименты проводились на 5—5 трубок. На рис. 2 и 3 — из-за ясности — для каждой программы нагружения изображалась только одна кривая, имеющая среднее положение по отношению остальных кривых, соответствующих данной программе.

По результатам экспериментов значительное расхождение от $\cos \omega_p = 1$ наблюдается только в первой ступени первой и второй программ нагружения, где $\cos \omega_p = 0,983$. В рассмотренных остальных случаях $\cos \omega_p > 0,995$.

Работа A_{OB} определялась планиметрированием площади под кривой $\sigma^* = f(\epsilon_i^*)$. Работа A_{OB} в каждой программе определялась, как среднее арифметическое значение работ A_{OB} отдельных трубок. Эти данные приведены в табл. II.

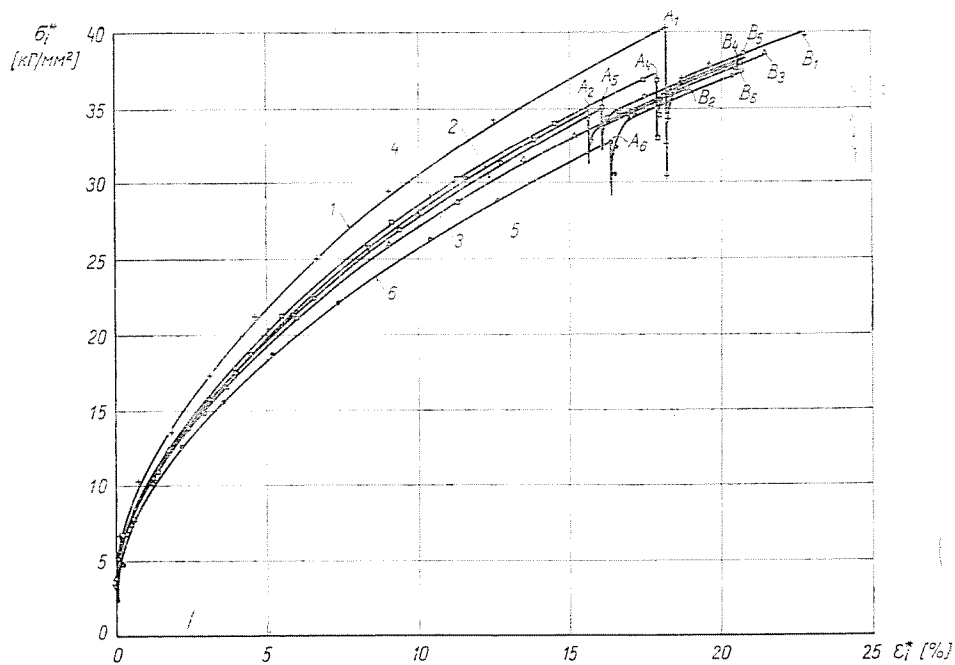


Рис. 2. Кривые $\sigma_i^* = f(\epsilon_i^*)$ никелевых трубок, полученных по программам 1, ..., 6

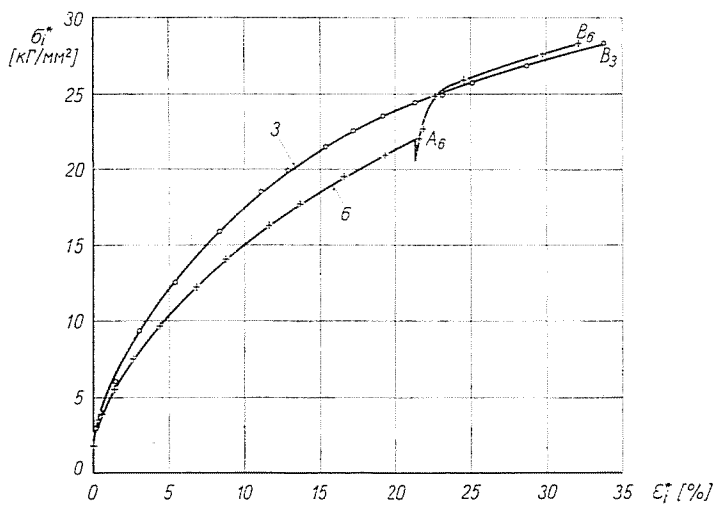


Рис. 3. Кривые $\sigma_i^* = f(\epsilon_i)$ медных трубок, полученных по программам 3, 6

Таблица II

Сводка параметров и работ деформации, полученных из отдельных программ нагружения

Материал	Обозначение программы	$\epsilon_{iB}^{\circ/\circ}$	$\epsilon_{iC}^{\circ/\circ}$	$\frac{кг}{см^3}$ A_{OB}	$\frac{кг}{см^3}$ A_{BC}	$\frac{кг}{см^3}$ A
Никель	1	22,34	125,00	6,55	63,1	69,7
	2	18,83	124,96	4,75	63,7	68,5
	3	21,79	122,94	5,83	60,9	66,7
	4	21,43	122,32	5,75	61,3	67,1
	5	19,61	124,00	5,03	63,6	68,6
	6	19,77	125,48	4,74	64,4	69,1
Медь	3	34,37	231,68	7,00	85,3	92,3
	6	32,80	234,24	6,06	88,1	94,2

Из результатов видно, что работа, совершенная до предела несущей способности, при различных нагружениях имеет различное значение. Максимальное отклонение от простого нагружения (программа 3) наблюдается в случае работы A_{OB} программы 6. Величина этого отклонения для никеля:

$$\frac{A_{OB3} - A_{OB6}}{A_{OB3}} 100 = 19\% ; \quad (39)$$

для меди:

$$\frac{A_{OB3} - A_{OB6}}{A_{OB3}} 100 = 13,4\% . \quad (40)$$

Результаты (39) и (40) показывают, что при рассмотренных условиях история нагружения влияет на работу деформации, совершенную до предела несущей способности.

Работа пластической деформации от предела несущей способности до разрушения (A_{BC}) определялась методом экстраполяции.

Из рис. 2 и 3 видно, что во второй ступени нагружения кривые $\sigma_i^* = f(\epsilon_i^*)$, полученные из различных путей нагружения — после переходного отрезка — практически сливаются с кривой программы 3. Метод экстраполяции в данном случае основан на том, что из участка $A-B$ определяется зависимость $\sigma_i^* = f(\epsilon_i^*)$, и предполагается, что эта функция действительна и для участка $B-C$. Правильность этого предположения проверялась исследованием, изложенным ниже.

На рис. 4 в логарифмической системе координат изображена диаграмма $\sigma_i = f(\epsilon_i^*)$ до предела несущей способности (до точки B), полученная из диаграммы программы 3 никелевых и медных трубок. Из рисунка видно, что эта связь имеет приблизительно линейный характер. Это означает, что зависи-

мость $\sigma_i = f(\varepsilon_i^*)$ можно определить приближением со степенной функцией. Опыты, проведенные при различных простых нагружениях [9], также подтверждают правильность такого приближения. Для определения того, что эта степенная зависимость действительна и на участке от предела несущей способности до Разрушения, проводились опыты на растяжение никелевых и медных трубок. Опыты проводились на прессе Гагарина [10]. Полученная из этих опытов диаграмма $\sigma_i = f(\varepsilon_i^*)$ до разрушения (точка С) изображена также на рис. 4. Из рисунка видно, что точки, относящиеся к участку В—С располагаются

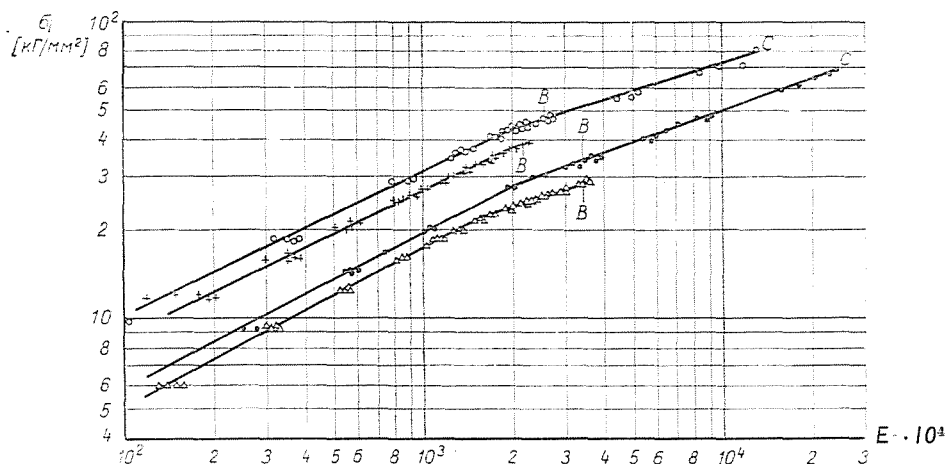


Рис. 4. Зависимость между ε_i и σ_i . Обозначения: $\circ$ — никель; растяжение до разрушения; $+$ — никель; по программе 3 до точки В; $\bullet$ — медь; растяжение до разрушения; Δ — медь; по программе 3 до точки В

приблизительно на продолжении прямого отрезка непосредственно перед точкой В. Это значит, что зависимость $\sigma_i = f(\varepsilon_i^*)$ определенная на участке до предела несущей способности, действительна и на участке за пределом несущей способности. Однако, в нашем случае нагружение во второй ступени не осевое растяжение, а соответствует программе нагружения 3. По результатам опытов [9] при различных значениях μ зависимость $\lg \sigma_i - \lg \varepsilon_i^*$ остается линейной, т. е. зависимость $\sigma_i = f(\varepsilon_i^*)$ является степенной. Т. к. $\sigma_i^* = \sigma_i \cdot \cos \omega$, и в нашем случае $\cos \omega = \text{const}$, поэтому зависимость $\sigma_i^* = f(\varepsilon_i^*)$ также является степенной функцией.

На основании вышеизложенных можно написать:

$$\sigma_i^* = k \cdot \varepsilon_i^{*n}. \quad (41)$$

Так, из формулы (38) выражение для A_{BC} получит следующий вид:

$$A_{BC} = \int_{\varepsilon_{iB}^*}^{\varepsilon_{iC}^*} k \cdot \varepsilon_i^{*n} d\varepsilon_{ip}^* = \frac{k}{n+1} [\varepsilon_{iC}^{*n+1} - \varepsilon_{iB}^{*n+1}]. \quad (42)$$

Для определения k и n необходимо взять логарифмы выражения (41)

$$\lg \sigma_i^* = \lg k + n \lg \varepsilon_i^*.$$

Из этого видно, что если $\varepsilon_i^* = 1$, то $k = \sigma_i^*$, а n является тангенсом угла наклона прямой, полученной в логарифмической системе координат. Полученные таким путем значения параметров для никелевых трубок изменяются в пределах $k = 65,6-76$ кг/мм², $n = 0,361-0,446$, для медных трубок $k = 39,9-41,3$ кг/мм², $n = 0,311-0,346$.

Значения A_{BC} , полученные по формуле (42) для каждой программы нагружения, приведены в таблице II.

Значения $A = A_{OB} + A_{BC}$ также приведены в таблице II. Значения A_{BC} и A для каждой программы, определялись как средние арифметические значения A_{BC} и A 5—5 трубок.

Максимальное отклонение работ от работы простого нагружения (программа 3):
для никеля

$$\frac{A_{(1)} - A_{(3)}}{A_{(3)}} 100 = 4,5\% , \quad (43)$$

для меди

$$\frac{A_{(6)} - A_{(3)}}{A_{(6)}} 100 = 2,1\% . \quad (44)$$

Индекс рядом с A обозначает номер программы.

По результатам (43), (44) видно, что величина работы разрушения — при рассмотренных условиях — практически не зависит от истории процесса нагружения в области равномерной деформации.

Потребность работы пластической деформации при простых нагружениях

Рассмотрим работу пластической деформации простых нагружений в зависимости от интенсивности напряжения и деформации. Определим, что для достижения данной σ_i^* какая работа деформации нужна, если в состоянии, характеризуемое σ_i^* , приходим различным простым нагружением. На рис. 5а, 5б изображены кривые $\sigma_i^* = f(\varepsilon_i^*)$, относящиеся к двум простым нагружениям.

На рисунке 5а если проводим горизонталь из данной σ_i^* , то получим по одной точке пересечения на кривых. Работу пластической деформации, совершенную до этих точек, обозначим через A_a и A_b . В первых ступенях (участок OA) выполненных программ осуществлялось простое нагружение. Плани-

метрировав площади под кривыми $\sigma_i^* = f(\varepsilon_i^*)$ изображенных на рис. 5а, то получим, что отношение работ деформаций, относящихся к данной σ_i будет

$$\frac{A_a}{A_b} = \frac{\varepsilon_{ia}^*}{\varepsilon_{ib}^*} = \frac{\varepsilon_{ia}}{\varepsilon_{ib}}. \quad (45)$$

Правая часть равенства правильна потому что при простых нагружениях $\varepsilon_i^* = \varepsilon_i$.

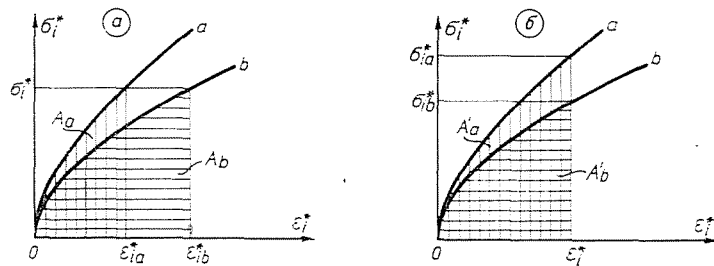


Рис. 5. Работы деформации при простых нагружениях для достижения а) данного σ_i^* , б) данного ε_i^*

Аналогично, планиметрированием кривых, полученных из экспериментов (рис. 5б) получим, что отношение работ деформаций, необходимых для достижения данного ε_i будет:

$$\frac{A'_a}{A'_b} = \frac{\sigma_{ia}^*}{\sigma_{ib}^*}. \quad (46)$$

Выражения (45), (46) дадут количественную зависимость между работами пластической деформации двух простых нагружений.

Резюме

В настоящей работе рассматривается влияние истории нагружения на работу пластической деформации с помощью экспериментов, проведенных на трубках из никеля и меди. При расчете работы деформации учитывается отклонение от подобия девиаторов напряжения и деформации.

Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что при рассмотренных условиях «история» нагружения влияет на работу пластической деформации, совершенной до предела несущей способности. Работа пластической деформации, совершенная до разрушения, практически не зависит от истории нагружения в области равномерной деформации.

С помощью экспериментальных данных определяется простая количественная зависимость между работами пластической деформации при различных нагружениях.

Литература

1. MINER, M. A.: Journ. Appl. Mechanics **12**, A-159 (1945).
2. GILLEMOT, L.: MTA Műsz. Tud. Oszt. Közleményei **37**, 9—32 (1966).
3. REUSS, E.: Acta Techn. Hung. **39**, 259—263 (1962).
4. КАТОР, Л.: Kandidátusi értekezés, Budapest 1962.
5. Новожилов, В. В.: Прикладная мат. и механика **15**, 709—722 (1951).
6. Ильюшин, А. А.: Пластичность. Москва, Изд. АН СССР, 1963.
7. NÁDAI, Á.: Theory of flow and fracture of solids. McGraw-Hill 1950. v. I. p. 260.
8. Ягн, Ю. И.—Шишмарев, О. А.: Заводская лаборатория **10**, 1243—1245 (1958).
9. Щеглов, Б. А.—Бродская, А. Н.—Копылов, А. К.: Пластическое течение металлов, Изд. Наука, Москва 1968, 14—24.
10. SAROSNYIKOV, N. A.: Fémek mechanikai vizsgálata, Nehézipari Kiadó, Budapest 1952, p. 113.

Kálmán KASZAP, Budapest, XI., Műegyetem rkp. 3, Венгрия