

Г.Л. Петросян, А.К. Карапетян, А.М. Арустамян
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ В ОБРАЗЦЕ
ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ В СЛУЧАЕ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ
ДЕФОРМАЦИЙ

Разработан инженерный метод определения изменения пористости материала в растянутом образце прямоугольного сечения при различных степенях однородной деформации и в различных точках наименьшего поперечного сечения шейки. Используется формула определения пористости деформационной теории пластичности пористых материалов. Полученные численные данные показывают, что опасная точка образца находится в центре наименьшего поперечного сечения шейки, откуда и начинается разрушение образца. Дается сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: пористость, однородная деформация, шейка, образец прямоугольного сечения, объемное напряженное состояние, диаграмма деформирования материала.

Форм. 4. Табл. 2. Рис. 4. Лит. 4.

Г.Л. Петросян, А.К. Карапетян, А.М. Арустамян
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОРИСТОСТІ У ЗРАЗКАХ ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ
У ВИПАДКУ ВЕЛИКИХ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

Розроблено інженерний метод визначення зміни пористості матеріалу в розтягнутому зразку прямокутного перерізу при різних ступенях однорідної деформації і в різних точках найменшого поперечного перерізу шийки. Використовується формула визначення пористості деформаційної теорії пластичності пористих матеріалів. Отримані чисельні дані показують, що небезпечна точка зразка знаходиться в центрі найменшого поперечного перерізу шийки, звідки і починається руйнування зразка. Дасться порівняння отриманих результатів з наявними експериментальними даними.

Ключові слова: пористість, однорідна деформація, шийка, зразок прямокутного перерізу, об'ємний напружений стан, діаграма деформування матеріалу.

G. Petrosyan, A. Karapetyan, A. Arustamyan
INVESTIGATION OF POROSITY DISTRIBUTION IN SPECIMENS WITH RECTANGULAR
SECTION FOR LARGE PLASTIC DEFORMATIONS

Engineering method of determining the change of material porosity in the extended rectangular cross-section sample with different degrees of homogeneous strain and at different points of the smallest cross-sectional area of the neck is developed. The formula for determining the porosity of the deformation theory of plasticity of porous materials is used. Numerical data show the dangerous point of sample is in the center of the smallest cross-section neck, and starts from the destruction of the sample. Compares the results with the available experimental data.

Keywords: porosity, homogeneous deformation, neck, rectangular sample, three-dimensional stress state, stress-strain diagram of the material.

Введение. В случае больших пластических деформаций образца прямоугольного сечения на нем образуется шейка, меняется напряженное состояние образца – от линейного к объемному, в результате чего возникает необходимость проведения расчетов определения свойств материала до и после появления шейки. При этом задача достаточно усложняется даже для сплошных материалов.

В работе [1] дается решение задачи осевого растяжения образца прямоугольного сечения из спеченной полосы на основе теории текучести пористых материалов, когда на нем образуется шейка. Однако эта задача достаточно сложна и в инженерной практике трудно применима, так как при ее решении получается система из двух дифференциальных уравнений.

Цель исследования. Целью работы является разработка инженерного метода для определения изменения пористости материала в образце прямоугольного сечения до и после образования на нем шейки.

Методика исследования. Задача решается в два этапа. На первом этапе путем решения задачи на основе классической теории пластичности сплошных материалов определяются компоненты напряженно-деформированного состояния (НДС) образца. На втором этапе, используя полученные данные, по формуле определения пористости деформационной теории пластичности пористых материалов (ДТПМ) [1] получают значения пористости при различных степенях однородной деформации и в различных точках наименьшего поперечного сечения шейки.

Принята следующая особенность влияния пористости материала на технологические процессы: при увеличении пористости величина предельного напряжения материала (пределов

текучести или прочности) уменьшается [1]. При этом характеристики пластической деформации образцов из данного материала с различной начальной пористостью (V_0) или плотностью определяются экспериментально и располагаются в разных точках соответствующей диаграммы деформирования материала (ДДМ) – кривой $\sigma_i - \varepsilon_i$ где σ_i , ε_i – интенсивности напряжения и деформации [2]. Если предельное напряжение сплошного материала 300 МПа , то при 10% пористости оно должно быть ниже (например, 280 МПа), при 20% – 250 МПа , при 30% - 210 МПа и т.д.

Решение задачи на основе классической теории пластичности сплошных материалов реализуется для определенного значения ДДМ, которое будет соответствовать данному значению начальной пористости материала. Например, при осевом растяжении образца из сплошного материала задача решается с использованием величины V_0 , которая принимается малой, скажем $V_0 = 0,01$ (1%). Затем, на основании полученных данных компонентов НДС, используя формулу определения пористости материала ДГППМ, до образования шейки определяются значения пористости материала при различных степенях деформации образца, а во время образования шейки – распределение пористости в разных точках наименьшего поперечного сечения шейки образца.

Действующие на элемент образца компоненты напряжений до и после образования шейки из сплошного материала в направлениях z - длины (l) образца прямоугольного сечения, x – его толщины (h) и y - ширины (b), а также величина интенсивности напряжений в шейке σ_{in} определяются соответственно по следующим формулам [1]:

$$\sigma_z = \sigma_i = F/A, \quad \sigma_y = \sigma_x = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_z = \sigma_i \left(1 + \frac{x_{\min}^2 - x^2}{2x_{\min} \rho} \right), \quad \sigma_x = \sigma_y = \sigma_i \frac{x_{\min}^2 - x^2}{2x_{\min} \rho}, \quad (2)$$

$$\sigma_{in} = \frac{(\sigma_z)_n}{1 + (x_{\min}/(3\rho))_n}, \quad (3)$$

где x_{\min} и x – половина минимальной толщины поперечного сечения шейки и ее текущее значение; $A = bh$ – текущая площадь поперечного сечения; ρ – радиус кривизны контура шейки; $(\sigma_z)_n = F_p / (b_p h_p)$ – среднее напряжение в наименьшем сечении образца после его разрушения.

Имея реальный график напряжений AB_2C отожженной меди [2] (рис.1), построенный на основании экспериментальных данных без учета НДС шейки, и учитывая особенности изменения напряженного состояния в шейке из линейного в объемное, можем построить ДДМ. При этом начальные размеры и их величины после разрушения образца силой $F_p = 11,5 \text{ кН}$ следующие: $l_0 = 114 \text{ мм}$, $b_0 = 20,25 \text{ мм}$, $h_0 = 5,75 \text{ мм}$, $l_p = 164 \text{ мм}$, $b_p = 13,1 \text{ мм}$, $h_p = 1,25 \text{ мм}$, $A_0 = b_0 h_0 = 116,4 \text{ мм}^2$, $A_p = b_p h_p = 16,4 \text{ мм}^2$.

Следовательно, если принять ДДМ за прямую линию, то будет достаточно с помощью данных точки C найти еще одну точку ДДМ. В данном случае это точка разрушения D . По данным экспериментов и рис.2 определяем интенсивность истинных (логарифмических) деформаций и среднее напряжение в наименьшем сечении шейки образца после его разрушения: $\varepsilon_{in} = \bar{\varepsilon}_p = \ln(A_0 / A_p) = 1,96$ (абсцисса точки D) и $(\sigma_z)_n = 700 \text{ МПа}$. Величину $(x_{\min}/\rho)_n = 1,4$ выбираем из [3]. Тогда

$$\sigma_{in} = \frac{(\sigma_z)_n}{1 + (x_{\min}/(3\rho))_n} = \frac{700}{1 + 1,4/3} = \frac{700}{1,47} = 477 \text{ МПа}.$$

Это ордината точки D , а ДДМ будет кривая AB_2D (рис. 1).

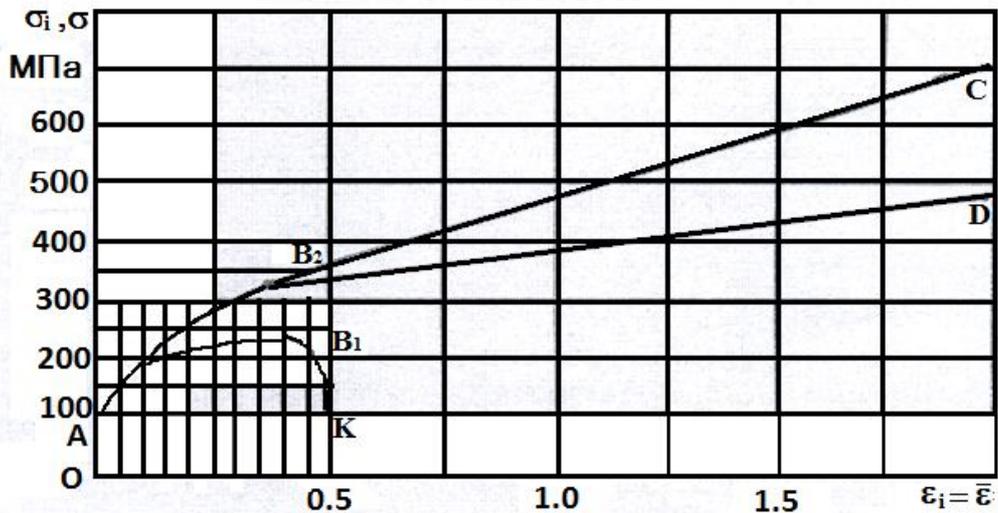


Рис. 1. Диаграмма деформирования меди AB₂D

Из сравнения графиков видно, что начиная с 40% деформации построение ДДМ без учета влияния трехосного напряженного состояния приводит к значительному увеличению напряжений.

В табл. 1 приведены численные данные напряжений $\sigma_x = \sigma_y$ и $\sigma_z = \sigma_x + \sigma_i$ в наименьшем сечении шейки растяженного плоского медного образца, а на рис.2 показаны их эпюры в зависимости от величины x , выполненные в среде MS EXCEL. На рис.2 напряжению σ_z соответствует кривая 1, а напряжению $\sigma_x = \sigma_y$ – кривая 2. Для расчетов использовались вышеприведенные экспериментальные данные и формулы (2).

Таблица 1. Значения напряжений $\sigma_x = \sigma_y$ и σ_z в наименьшем сечении образца

x	$\sigma_x = \sigma_y, \text{ МПа}$	x	$\sigma_z, \text{ МПа}$
-0,625	0,320332	-0,625	477,3203
-0,5	120,445	-0,5	597,445
-0,375	213,8753	-0,375	690,8753
-0,25	28,6113	-0,25	757,6113
-0,125	320,6528	-0,125	797,6528
0	334	0	811
0,125	320,6528	0,125	797,6528
0,25	280,6113	0,25	757,6113
0,375	213,8753	0,375	690,8753
0,5	120,445	0,5	597,445
0,625	0,320332	0,625	477,3203

Расчеты проводились по следующей последовательности: сначала на основании указанных данных определяется знаменатель формулы $y = \sigma_x = \sigma_y$ (2), который преобразуется к виду $(0,625)^2/0,7$, после чего, имея значение интенсивности напряжений 477МПа, а также половину толщины наименьшего сечения шейки 0,625, в среде MS EXCEL вводится следующая формула:

$$y = 334 * (0,391 - (A2^2)) / 0,391. \tag{4}$$

Ось абсцисс делим на 0,125 частей. При этом отрицательные значения оси абсцисс соответствуют левой половине образца, а положительные – правой.

Определим измененные значения пористости материала при различных степенях деформации образца и распределения пористости в различных точках наименьшего поперечного сечения шейки образца во время образования шейки. Для этого используем следующую формулу определения текущей пористости материала v ДТППМ [1]:

$$\nu = 1 - (1 - \nu_0) \exp\left(-\frac{9\nu_0^m \sigma_0 \varepsilon_{eq}}{(1 - \nu_0)^{3n} \sigma_{eq}}\right),$$

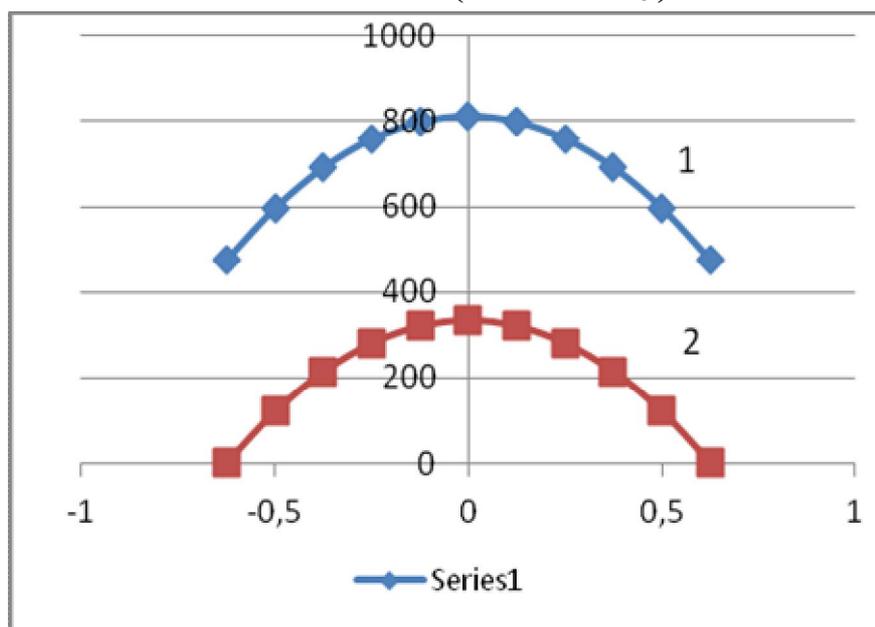


Рис. 2. Распределение напряжений $\sigma_x = \sigma_y$ и σ_z в наименьшем сечении образца

где $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – среднее напряжение; σ_{eq} – эквивалентное напряжение; ε_{eq} – эквивалентная деформация; m и n – параметры пористости.

Значения увеличения пористости материала (табл. 2) до образования шейки и во время разрушения образца в разных точках шейки определялись для $m = 1, n = 0,25, \nu_0 = 0,01$.

Формула, введенная в среде MS EXCEL, имеет следующий вид:

$$\nu = 1 - (1 - C2) * EXP(-9 * СТЕПЕНЬ (C2; A2) * F2 * E2) / (СТЕПЕНЬ (1 - C2; 3 * B2) * D2)$$

Первые две графы табл. 2 соответствуют однородной деформации образца, а другие – разным точкам поперечного сечения образца во время разрушения. На основании последних данных построен график распределения простоты в наименьшем поперечном сечении шейки (рис. 3).

Таблица 2. Данные определения пористости материала, при $m = 1, n = 0,25, \nu_0 = 0,01$

N ^o	ε_{eq}	σ_{eq} , МПа	σ_0 , МПа	ν
1	0,1	190	63,33	0,012987954
2	0,4	230	76,67	0,021897815
3	1,96	477	159,32	0,067060071
4	1,96	477	279,00	0,107749502
5	1,96	477	373,00	0,138459869
6	1,96	477	440,00	0,159701818
7	1,96	477	480,00	0,172133068
8	1,96	477	493,00	0,176133494

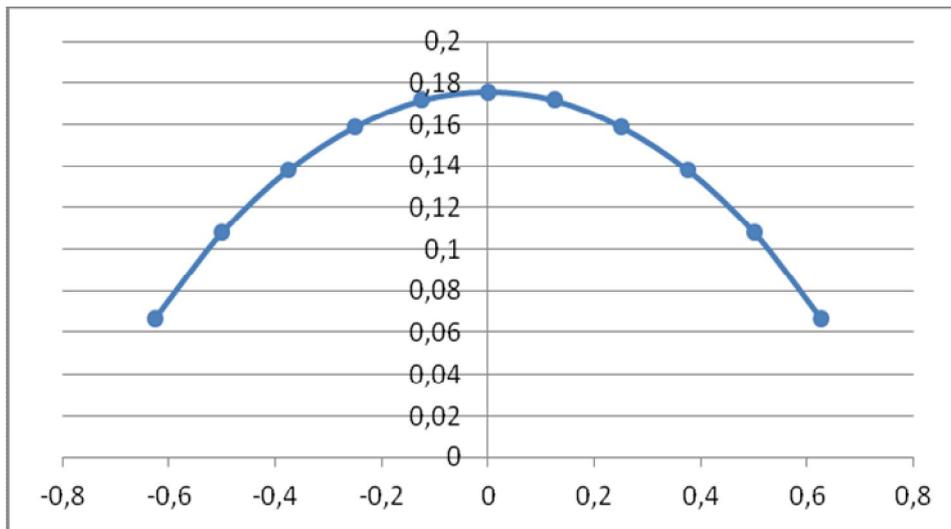


Рис. 3. Графік розподілу пористості в найменшому сеченні шийки при руйнуванні зразка

Аналіз отриманих даних показує, що небезпечна точка зразка знаходиться в центрі найменшого поперечного сечення шийки, де 1% початкової пористості досяг значення 17,6%. Для достовірності цих даних порівняємо їх з існуючими експериментальними даними [4]. На рис.4 приведено зображення продольного шліфа в проміжку шийки зразка з технічної чистої міді, на якому видно численні пори. При цьому їх виникнення пояснюється мікротріщинами навколо неметалічних частинок, що знаходяться в матеріалі. В час деформування зразка густина пор збільшується від зовнішньої поверхні до центру шийки, звідки і починається руйнування зразка.

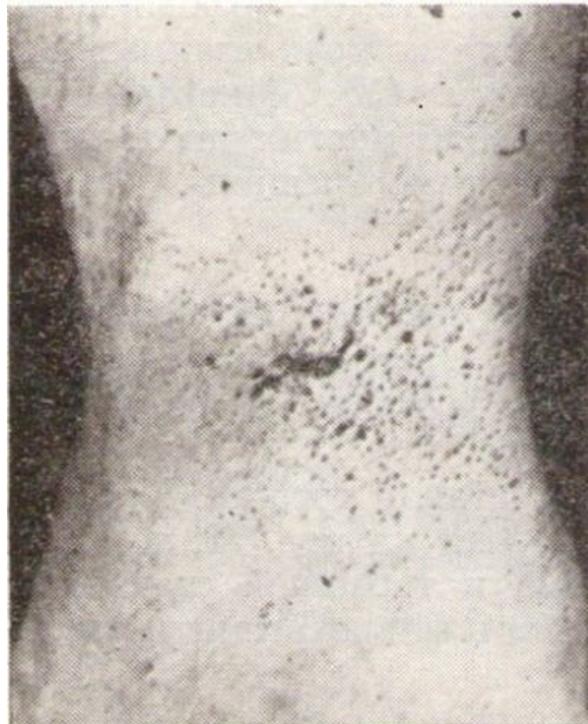


Рис. 4. Продольний шліф шийки розтягнутого мідного зразка [4]

Таким чином, розроблено інженерний метод визначення змін пористості матеріалу в зразку прямокутного сечення до і після утворення шийки. Розв'язанням чисельного прикладу визначено значення пористості при різних ступенях однорідної деформації зразка, а також побудовано графік розподілу пористості матеріалу в найменшому поперечному сеченні шийки зразка.

1. *Петросян Г.Л.* Пластическое деформирование порошковых материалов. – М.: Металлургия. – 1988. –153 с.
2. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести.- М.: Машиностроение. – 1975. –399 с.
3. *Петросян Г., Бабаян Э., Мусаелян С.* Метод исследования пластических свойств плоского образца, изготовленного из листа при осевом растяжении// Сборник материалов годичной научной конференции ГИУА. Том 1. – Ереван, 2001. – С. 187-188.
4. *Мастеров В.А., Берковский В.С.* Теория пластической деформации и обработка металлов давлением. – М.: Металлургия. –1976. – 352 с.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.