

## УТОЧНЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ФУНКЦІЙ ПОРИСТОСТІ ПРИ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ МАТЕРІАЛІВ

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

*Фізико-механічні властивості порошкових матеріалів значно залежать від особливостей і величини початкової пористості. В статті представлена методика описання механічних характеристик пористих тіл єдиними функціями, що відображають закономірності зміни пористості під час пластичного формозмінення. Дана методика базується на основних положеннях механіки пластичної деформації пористих тіл і дозволяє отримувати достовірні функції пористості для даного матеріалу, шляхом уточнення теоретичних функцій експериментальними дослідженнями. Ґрунтуючись на проведених теоретичних та експериментальних дослідженнях отримано функції пористості для матеріалів на основі міді, представлена методика розрахунку накопиченої деформації матеріалу основи та побудовано криві течії.*

**Ключові слова:** пористе тіло, формозмінення, функція пористості, обробка тиском, холодна пластична деформація, крива течії, напруження, деформації.

Аналіз відомих експериментальних і теоретичних результатів показує, що умови пластичності засновані на гіпотезі про існування поверхні пластичності пористого тіла, які враховують вплив першого та другого інваріанта тензора напружень і другого інваріанта девіатора напружень, досить добре описують механізм пластичного деформування пористих матеріалів, якщо виходити з припущення, що треті інваріанти не чинять впливу на поведінку пористого тіла. Але з врахуванням ізотропії та підходу пов'язаного із завданням властивостей дисипативної функції [1, 2] була отримана умова пластичності матеріалу, що ущільнюється

$$\frac{p^2}{f_2(\theta)} + \frac{\tau^2}{f_1(\theta)} = (1 - \theta)k^2, \quad (1)$$

де  $k = \sqrt{\frac{3}{2}}\sigma_T$ ,  $\sigma_T$  - границя текучості твердої фази при одноосному розтягу,  $f_1(\theta)$ ,  $f_2(\theta)$  - функції пористості,  $p = \frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij}$  - середнє напруження.

Якщо  $p=0$ , то при об'ємному напруженому стані асоційований з умовою пластичності пористих тіл закон течії [3] приводить до того, що при пластичній деформації пористого тіла має місце зміна об'єму при відсутності сферичної компоненти тензора напружень.

Сучасні спеціалізовані програмні системи не завжди достовірно описують процеси і явища, які мають місце при пластичній деформації пористих тіл. Підвищення точності розрахунків в таких складних процесах потребує створення низки альтернативних постановок і наближених методів розв'язку, що дозволить розширити клас таких задач. Створення і розвиток нових технологічних процесів обробки тиском порошкових матеріалів потребують методики прогнозування необхідних експлуатаційних характеристик виробів. Якщо для дослідження формоутворення порошкових матеріалів використовувати рівняння пластичності пористого тіла, які встановлюють співвідношення між середнім напруженням, інтенсивністю девіатора напружень і функціями пористості запропоновані [3], то теоретичні залежності отримані із основних рівнянь теорії течії пористого тіла потребують уточнення функцій пористості через коефіцієнти, які визначаються експериментально і є різними для кожного пористого матеріалу.

Для визначення функцій пористості матеріалу на основі міді проводили досліди на осадку з мінімальним тертям на торцях для трьох вихідних значень пористості ( $\theta_0=0.246$ ,  $\theta_0=0.194$ ,  $\theta_0=0.0775$ ) [4, 5].

При осадці вимірювались висота зразка  $h$ , діаметр  $d$  та зусилля  $P$ . Напруження  $\sigma$ , деформація  $e_\varphi$ , пористість  $\theta$  розраховувались по формулах

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2}; e_r = e_\varphi = \ln \frac{d}{d_0}; \theta = 1 - \frac{V_0}{V}(1 - \theta_0) = 1 - \frac{d_0^2 h_0}{d^2 h} (1 - \theta_0). \quad (2)$$

Відповідні графіки показані на рис. 1-3 Для визначення коефіцієнтів  $m$  та  $n$  і отримання кривої течії  $\tau_0=f(\Gamma_0)$  проводили чисельні інтегрування диференціальних рівнянь

$$t = -\int_0^\theta \frac{1 + \alpha_0^m(\theta_*)}{3(1 - \theta_*)\alpha_0^m(\theta_*)} d\theta_*; \frac{d\Gamma_0}{d\theta} = -\frac{1}{\sqrt{6}}(1 - \theta)^{n-0.5} \frac{\sqrt{1 + \alpha_0^m}}{\alpha_0^m}; \tau_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{1 + \alpha}}{\sqrt{f_1(\theta)(1 - \theta)}} \sigma = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{1 + \alpha_0^m(\theta)}}{(1 - \theta)^{n+1.5}} \sigma \quad (3)$$

Остаточно для функцій пористості отримані наступні вирази

$$f_1(\theta) = \varphi_{10}^{1+n}(\theta) = ((1 - \theta)^2)^{1+1.35} = (1 - \theta)^{4.7}$$

$$f_2(\theta) = \frac{1}{6\alpha_0^m} f_1(\theta) = \frac{(1 - \theta)^{4.7}}{b \left( \frac{\theta}{4(1 - \theta)} \right)^{0.97}} = 0.64 \frac{(1 - \theta)^{5.67}}{\theta^{0.97}}, \quad (4)$$

Отримана в результаті інтегрування (3) крива течії  $\tau_0=f(\Gamma_0)$  може бути апроксимована степеневою залежністю:

$$\tau_0 = 11 + 51.36 \Gamma_0^{0.902} \quad (\Gamma_0 \geq 0.01) \quad (5)$$

Залежність  $\tau_0=f(\Gamma_0)$  та її лінійна і степенева апроксимації приведені на рис. 4.

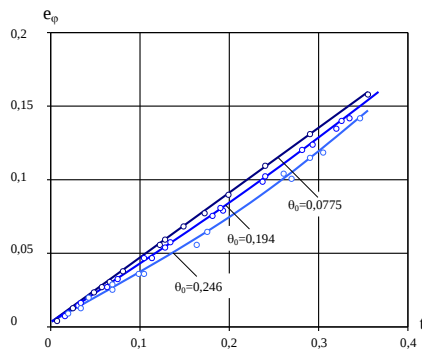


Рис. 1. Залежність деформації  $e_\varphi$  від ступеню осадки  $t$  (мідь)

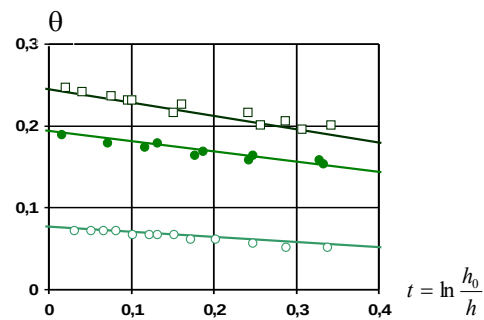


Рис. 2. Зміна пористості при осадці (мідь)

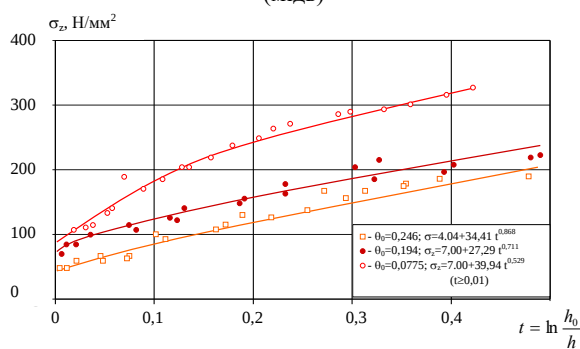


Рис. 3. Осьові напруження в пористих мідних зразках при осадці

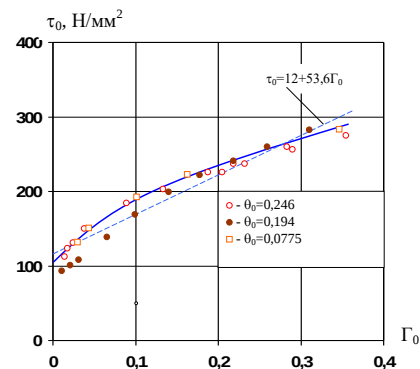


Рис. 4. Крива течії матеріалу основи (мідь)

Показані на графіку точки відповідають розрахункам по (3) для зразків різної вихідної пористості при  $m=0.97$ ,  $n=1.35$ .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Shtern, M. B., Mikhailov, O. V., Mikhailov, A. O. Generalized Continuum Model of Plasticity of Powder and Porous Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis*, 2021, 60(1-2), pp. 20–34.
2. Skorokhod, V. V., Shtern, M. B. Rheological Model of Sintering and Viscous Flow of Porous Materials with 2D Defects. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis*, 2019, 58(7-8), pp. 399–405.
3. Kuzmov, A. V., Shtern, M. B., Kirkova, O. G. The Effect of Additional Shear Strains Induced by Die Rotation on the Radial Pressing of Metal Powder Billets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis*, 2020, 59(3-4), pp. 127–133.

4. Sivak, R., Kulykivskiy, V., Savchenko, V., Minenko, S., & Borovskyi V. Determination of porosity functions in the pressure treatment of iron-based powder materials in agricultural engineering. *Scientific Horizons*, 2023, 26(3), 124-134.
5. Sivack I. O. The evaluation of Deformability of the Porous Bodeis. *The Bulletin of Politehnic Institute of Jassi*, 1996, XLII(XLVI), N3 – 4, p. 607 - 611.
6. Polishchuk L., Bilyy O., and Kharchenko Y. Life time assessment of clamp-forming machine boom durability. *Diagnostyka*, 2015, 16, № 4, p. 71–76.
7. Zvirko O., Tsyrunyk O., and Polishchuk L. Assessment of hydrogen assisted degradation of stacker conveyor boom steel. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*, 2023, Part F1379, p. 200–207.

**Сивак Роман Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, [sivak\\_r\\_i@ukr.net](mailto:sivak_r_i@ukr.net).**

**Поліщук Леонід Клавдійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, [leo.polishchuk@gmail.com](mailto:leo.polishchuk@gmail.com).**

**Gao Xianan, аспірантка, кафедра галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця**

## REFINEMENT OF THEORETICAL POROSITY FUNCTIONS DURING PLASTIC DEFORMATION OF MATERIALS

### Abstract

*The physical and mechanical properties of powder materials significantly depend on the features and value of the initial porosity. The article presents a method for describing the mechanical characteristics of porous bodies by single functions that reflect the regularities of porosity changes during plastic deformation. This method is based on the basic principles of the mechanics of plastic deformation of porous bodies and allows obtaining reliable porosity functions for a given material by refining theoretical functions by experimental studies. Based on the theoretical and experimental studies, porosity functions for copper-based materials were obtained, a method for calculating the accumulated deformation of the base material was presented, and flow curves were constructed.*

**Key words:** porous body, deformation, porosity function, pressure treatment, cold plastic deformation, flow curve, stresses, deformations.

**Roman Sivak, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, [sivak\\_r\\_i@ukr.net](mailto:sivak_r_i@ukr.net).**

**Leonid Polishchuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, [leo.polishchuk@gmail.com](mailto:leo.polishchuk@gmail.com).**

**Gao Xianan, PhD student, Department of Industrial Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia**

## УТОЧНЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ФУНКЦІЙ ПОРИСТОСТІ ПРИ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ МАТЕРІАЛІВ

### Анотація

*Фізико-механічні властивості порошкових матеріалів значно залежать від особливостей і величини початкової пористості. В статті представлена методика описання механічних характеристик пористих тіл єдиними функціями, що відображають закономірності зміни пористості під час пластичного формозмінення. Дана методика базується на основних положеннях механіки пластичної деформації пористих тіл і дозволяє отримувати достовірні функції пористості для даного матеріалу, шляхом уточнення теоретичних функцій експериментальними дослідженнями. Ґрунтуючись на проведених теоретичних та експериментальних дослідженнях отримано функції пористості для матеріалів на основі міді, представлена методика розрахунку накопиченої деформації матеріалу основи та побудовано криві течії.*

**Ключові слова:** пористе тіло, формозмінення, функція пористості, обробка тиском, холодна пластична деформація, крива течії, напруження, деформації.

**Сивак Роман Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, [sivak\\_r\\_i@ukr.net](mailto:sivak_r_i@ukr.net).**

**Поліщук Леонід Клавдійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, [leo.polishchuk@gmail.com](mailto:leo.polishchuk@gmail.com).**

**Gao Xianan, аспірантка, кафедра галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця**