

Сивак Р. І.
Поліщук Л. К.
Бочковой Д. О.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЙ ПОРИСТОСТІ ПРИ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ ПОРОШКОВИХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА

Потреба промисловості в отриманні виробів з необхідними експлуатаційними характеристиками привела до появи і розвитку нових технологічних процесів обробки тиском попередньо спечених пористих матеріалів. При дослідженні процесів пластичної деформації пористих тіл велике значення надається визначенню функцій пористості. В статті представлена методика описання механічних характеристик пористих тіл єдиними функціями. 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. При цьому експериментальні дані отримували в дослідах на осесиметричну осадку циліндричних зразків без тертя на торцях. Грунтуючись на проведених теоретичних дослідженнях отримано функції пористості для матеріалів на основі заліза. Для досліджень застосовували зразки на основі заліза п'яти різних початкових пористостей. В результаті обробки експериментальних даних отримані остаточні вирази для функцій пористості матеріалу заготовки на основі залізного порошку. Також в статті представлена методика розрахунку накопиченої деформації матеріалу основи. Побудовано криві течії для порошкових матеріалів на основі заліза.

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

Для оцінки пластичності пористих тіл необхідно розробити критерії руйнування, які враховують вплив фізико-механічних властивостей заготовок на їх деформовність [1, 2]. Для розв'язку технологічних задач обробки тиском пористих тіл найбільш широко використовуються модельні уявлення основані на континуальному підході [3]. В цьому випадку локально-неоднорідне середовище розглядається як безперервне, стан якого може бути описаний за допомогою силових і кінематичних параметрів, що підкорюються законам суцільного середовища. При математичному моделюванні процесу незворотного формозмінення пористого тіла необхідною умовою є формування реологічних властивостей пористих матеріалів. В наш час отримали поширення теорії, основані на завданні поверхонь пластичності різного виду і використанні асоційованого з ними закону течії. Такий підхід дозволяє врахувати вплив зміцнення, викликаного величиною формо- і об'ємозмінення, а також виду напруженого стану. В той же час розвиток процесів пластичної деформації пористих матеріалів ставить задачу врахування історії деформування, яка чинить значний вплив на реологічні властивості в реальних процесах обробки тиском.

Метою роботи є розробка нових, більш досконалих методів прогнозування експлуатаційних характеристик виробів для розвитку нових технологічних процесів, які потребують обробки тиском попередньо спресованих і спечених порошкових матеріалів.

Розвитку математичних методів теорії пластичності пористих тіл суттєво сприяли роботи Р. Гріна [4], в яких запропонована гіпотеза про існування поверхні пластичності пористого тіла в вигляді:

$$3I_2(D_\sigma) + \alpha I_1^2(T_\sigma) - \beta k^2 = 0, \quad (1)$$

де k – границя текучості матеріалу основи, α, β – функції пористості, $I_2(D_\sigma)$ – другий інваріант девіатора напружень, $I_1(T_\sigma)$ – перший інваріант тензора напружень.

Умова пластичності, запропонована Г. Куном [5], дещо відрізняється і має вигляд:

$$3I_2(D_\sigma) - (1 - 2\nu)I_1(T_\sigma) + \varphi^2 k^2 = 0, \quad (2)$$

де ν – коефіцієнт поперечної деформації, φ – функція пористості.

Аналіз відомих експериментальних і теоретичних результатів показує, що умови пластичності (1) і (2) якісно добре описують механізм пластичного деформування пористих матеріалів.

В роботах [6, 7] при формулюванні визначальних рівнянь використовується підхід, пов'язаний із встановленням властивостей дисипативної функції. Умова пластичності матеріалу, що ущільнюється зазвичай записується у вигляді [8]:

$$\frac{p^2}{f_2(\theta)} + \frac{\tau^2}{f_1(\theta)} = (1-\theta)k^2, \quad (3)$$

де $k = \sqrt{\frac{3}{2}}\sigma_T$, σ_T – границя текучості твердої фази при одноосному розтягу;

$f_1(\theta), f_2(\theta)$ – функції пористості.

Умови пластичності (1), (2), (3) симетричні відносно площини $p = 0$. Однак ця вимога не є обов'язковою. В роботі [9] експериментально встановлено, що умова пластичності пористих тіл при об'ємному напруженому стані має вигляд:

$$\frac{(p-p^*)^2}{f_2(\theta)} + \frac{\tau^2}{f_1(\theta)} = (1-\theta)k^2, \quad (4)$$

де p^* – функція внутрішніх напружень і пористості.

Якщо $p=0$, то асоційований з даною умовою пластичності закон течії приводить до того, що швидкість об'ємної деформації:

$$e = -\frac{f_1(\theta)}{f_2(\theta)} \frac{\gamma}{\tau} p^*. \quad (5)$$

З (5) випливає, що при пластичній деформації пористого тіла має місце зміна об'єму при відсутності сферичної компоненти тензора напружень.

В роботах [10, 11] для дослідження екструзії порошкових матеріалів через осесиметричні матриці запропонована модель нелінійного в'язко-пружного середовища, що дозволило сформулювати та розв'язати крайову задачу.

Основні рівняння теорії течії пористого тіла мають вид [3]:

$$\tau_0^2 = \frac{p^2}{f_2(\theta)(1-\theta)} + \frac{\tau^2}{f_1(\theta)(1-\theta)}, \quad (6)$$

$$pf_1(\theta)\gamma = \tau f_2(\theta)e, \quad (7)$$

$$\gamma_0^2 = \frac{f_2(\theta)e^2}{(1-\theta)} + \frac{f_1(\theta)\gamma^2}{(1-\theta)}, \quad (8)$$

де $p = \frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij}$ – середнє напруження, σ_{ij} – компоненти тензора напружень, τ_0 – інтенсивність девіатора напружень в матеріалі основи, γ_0 – інтенсивність девіатора швидкостей деформацій в матеріалі основи, e_{ij} – компоненти тензора швидкостей деформацій, $e = \delta_{ij}e_{ij}$ – швидкість відносної зміни об'єму, $f_1(\theta), f_2(\theta)$ – функції пористості, θ – пористість.

Накопичена деформація матеріалу основи:

$$\Gamma_0 = \int_0^t \gamma_0 d\tau. \quad (9)$$

Інтенсивність девіатора напружень:

$$\tau = \sqrt{(\sigma_{ij} - p\delta_{ij})(\sigma_{ij} - p\delta_{ij})}. \quad (10)$$

Інтенсивність девіатора швидкостей деформацій:

$$\gamma = \sqrt{\left(e_{ij} - \frac{1}{3}e\delta_{ij}\right)\left(e_{ij} - \frac{1}{3}e\delta_{ij}\right)} = \sqrt{\frac{2}{3}}\varepsilon_u. \quad (11)$$

В роботі [12] із теоретичних посилань отримані наступні вирази для функцій пористості:

$$f_{10}(\theta) = (1-\theta)^2, \quad (12)$$

$$f_{20}(\theta) = \frac{2}{3} \frac{(1-\theta)^3}{\theta}. \quad (13)$$

Теоретичні залежності (12), (13) для функцій пористості будемо уточнювати за [13] через коефіцієнти m і n , які визначаються експериментально і різні для кожного пористого матеріалу [14]:

$$f_1(\theta) = (f_{10}(\theta))^{n+1} = (1-\theta)^{2n+2}. \quad (14)$$

Введемо функцію:

$$\alpha(\theta) = \frac{1}{6} \frac{f_1(\theta)}{f_2(\theta)}. \quad (15)$$

Будемо шукати функцію $\alpha(\theta)$ в вигляді:

$$\alpha(\theta) = \alpha_0^m(\theta) = \left(\frac{\theta}{4(1-\theta)}\right)^m. \quad (16)$$

Експериментальні значення m і n будемо шукати в дослідах на осесиметричну осадку циліндричних зразків без тертя на торцях. Оскільки деформація осесиметрична, то $e_\varphi = e_r$.

Швидкість зміни об'єму:

$$e = e_z + 2e_\varphi, \quad (17)$$

а інтенсивність девіатора швидкостей деформацій:

$$\gamma = \sqrt{\left(e_z - \frac{e_z + 2e_\varphi}{3}\right)^2 + 2\left(e_\varphi - \frac{e_z + 2e_\varphi}{3}\right)^2} = \sqrt{\frac{2}{3}}(e_\varphi - e_z). \quad (18)$$

Крім того, при осадці без тертя $\sigma_r = \sigma_\varphi = 0$, $\sigma_z = -\sigma$,

$$p = \frac{\sigma_r + \sigma_\varphi + \sigma_z}{3} = -\frac{\sigma}{3}, \quad (19)$$

$$\tau = \sqrt{(\sigma_z - p)^2 + 2(0 - p)^2} = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma. \quad (20)$$

Приведемо співвідношення (7) до вигляду:

$$\frac{\gamma}{e} = \frac{f_2(\theta)}{f_1(\theta)} \frac{\tau}{p} = \frac{1}{6\alpha(\theta)} \frac{\tau}{p}. \quad (21)$$

Підставимо в (21) співвідношення (19) і (20), тоді:

$$\frac{\gamma}{e} = \frac{1}{6\alpha(\theta)} \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}\sigma}{-\frac{\sigma}{3}} = -\frac{1}{\sqrt{6}\alpha(\theta)}. \quad (22)$$

Після підстановки в (22) виразів (17) і (18) отримаємо:

$$\frac{e_\varphi}{e_z} = -\frac{1-2\alpha}{2(1+\alpha)} = -\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \frac{\alpha}{1+\alpha}. \quad (23)$$

З (23) випливає, що:

$$e_\varphi = -e_z \frac{1-2\alpha}{2(1+\alpha)}. \quad (24)$$

Підставимо (24) в (17):

$$e = e_z - \frac{1-2\alpha}{2(1+\alpha)} e_z = \frac{3\alpha}{1+\alpha} e_z. \quad (25)$$

З іншої сторони швидкість об'ємної деформації дорівнює:

$$e = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}. \quad (26)$$

Враховуючи те, що:

$$\rho = \rho_0(1-\theta), \quad (27)$$

з (26) і (27) знаходимо

$$e = \frac{\theta}{1-\theta}, \quad (28)$$

де ρ – густина пористого тіла, ρ_0 – густина матеріалу основи.

З (25) і (28) з урахуванням (16) випливає, що

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{3(1-\theta)\alpha_0^m(\theta)de_z}{1+\alpha_0^m(\theta)dt}. \quad (29)$$

За параметр часу приймаємо $t = |e_z| = \ln(h_0/h)$, де h_0 і h – початкова і поточна висота зразка, що осаджується, тоді:

$$\frac{de_z}{dt} = -1. \quad (30)$$

Підставимо (30) в (29) і отримуємо диференційне рівняння:

$$\frac{dt}{d\theta} = -\frac{1+\alpha_0^m}{3(1-\theta)\alpha_0^m} \quad (31)$$

розв'язуючи яке, знаходимо:

$$t = -\int_0^{\theta} \frac{1 + \alpha_0^m(\theta_*)}{3(1 - \theta_*)\alpha_0^m(\theta_*)} d\theta_* \quad (32)$$

Розв'язок рівняння (32) дозволяє визначити значення параметра m , при якому розрахункові криві співпадають з експериментальними.

Виразимо інтенсивність швидкостей деформацій матеріалу основи γ_0 через швидкість об'ємної деформації e при осадці без тертя. Для цього приведемо вираз (8) до вигляду:

$$\gamma_0^2 = \frac{f_1(\theta)e^2}{1-\theta} \left(\frac{f_2(\theta)}{f_1(\theta)} - \frac{\gamma^2}{e^2} \right) \quad (33)$$

підставимо в (33) вираз (15) і (22) отримаємо:

$$\gamma_0^2 = \frac{f_1(\theta)e^2}{1-\theta} \left(\frac{1}{6\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} \right). \quad (34)$$

З урахуванням (25), (30), співвідношення (34) приводиться до вигляду:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{f_1(\theta)}{(1-\theta)(1+\alpha)}}. \quad (35)$$

Оскільки накопичена деформація матеріалу основи Γ_0 залежить від часу і пористості, то можна записати:

$$\frac{d\Gamma_0}{dt} = \frac{d\Gamma_0}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}. \quad (36)$$

Підставимо в (36) вираз (31) і (35), з урахуванням того, що $\tilde{\gamma}_0 = d\Gamma_0/dt$, $f_1(\theta) = f_{10}^{1+n}(\theta) = (1-\theta)^{2+2n}$, знаходимо:

$$\frac{d\Gamma_0}{d\theta} = -\frac{1}{\sqrt{6}} (1-\theta)^{n-0.5} \frac{\sqrt{1+\alpha_0^m}}{\alpha_0^m}. \quad (37)$$

Виразимо еквівалентну інтенсивність напружень в матеріалі основи τ_0 через напруження при осадці $\sigma = |\sigma_z| = P/A$, де P – зусилля осадки, A – площа поперечного перерізу зразка.

Перетворимо (6) з урахуванням (15), (19) і (17), в результаті еквівалентна інтенсивність напружень матеріалу основи при осадці без тертя визначається співвідношенням:

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{1+\alpha}}{\sqrt{f_1(\theta)(1-\theta)}} \sigma = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{1+\alpha_0^m(\theta)}}{(1-\theta)^{n+1.5}} \sigma. \quad (38)$$

Значення параметра n можна визначити з (38) методом ітерацій, виходячи з умови, що при цьому залежність $\tau_0 = f(\Gamma_0)$ повинна бути єдиною для будь-якої початкової пористості.

Використовуючи отримані вище співвідношення для визначення функцій пористості необхідно провести досліді по осесиметричній осадці циліндричних зразків із порошкового матеріалу на основі заліза з малим тертям на торцях [15-20] і різними початковими пористостями.

Експериментальне значення щільності визначали за формулою $\rho = (G_c / (G_n - G_j)) \rho_j$, де ρ_j – щільність води при температурі заміру.

Експериментальне значення пористості знаходили із співвідношення $\theta = 1 - (\rho / \rho_0)$, де $\rho_0 = 7.85 \text{ г/см}^3$ - щільність заліза, яке є матеріалом основи пористого тіла.

За результатами осадки визначали наступні параметри.

Напруження стиску:

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2}. \quad (39)$$

Деформації:

$$e_z = -\ln \frac{h_0}{h}; \quad e_r = e_\varphi = \ln \frac{d}{d_0} \quad (40)$$

Зміна пористості визначалась за зміною середнього розрахункового об'єму:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h.$$

Із умови зберігання маси $\rho V = \rho_0 V_0$; $\rho(1-\theta)V = \rho_0(1-\theta_0)V_0$ знаходимо:

$$\theta = 1 - \frac{V_0}{V} (1 - \theta) = 1 - \frac{d_0^2 h_0}{d^2 h} (1 - \theta_0), \quad (41)$$

де $\rho_0 = 7.85 \text{ г/см}^3$ густина матеріалу основи.

Графіки залежностей $e_\varphi(t)$, $\sigma_z(t)$, $\theta(t)$ отримані за рівняннями (39), (40), (41) приведені на рис. 1–2. Тут $t = \ln(h_0/h) = -e_z$ - параметр часу.

Параметр m визначали чисельно шляхом розв'язку рівняння (31) для різних початкових пористостей θ . Аналізуючи залежність $t(\theta)$ при різних m знайшли в результаті таке $m = 0.86$, при якому експериментальна крива виявилась близькою до розрахункової при початковій пористості $\theta_0 = 0.208$. Наступні розрахунки показали, що при $m = 0.86$ розрахункові криві $\theta(t)$ співпали з експериментальними і для решти початкових пористостей.

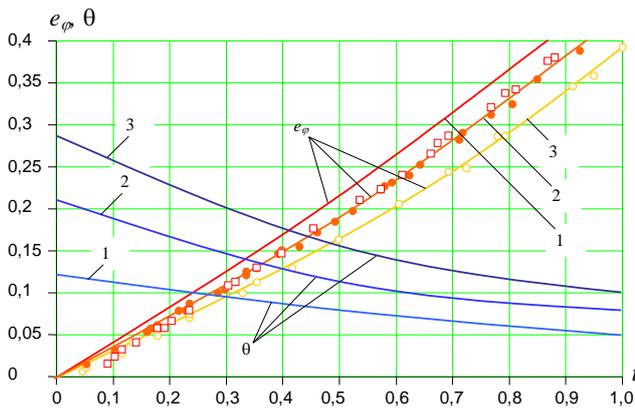


Рис. 1. Залежність деформації e_φ та пористості θ від ступеня осадки (залізо):
 1 – $\theta_0 = 0,126$; 2 – $\theta_0 = 0,208$; 3 – $\theta_0 = 0,283$

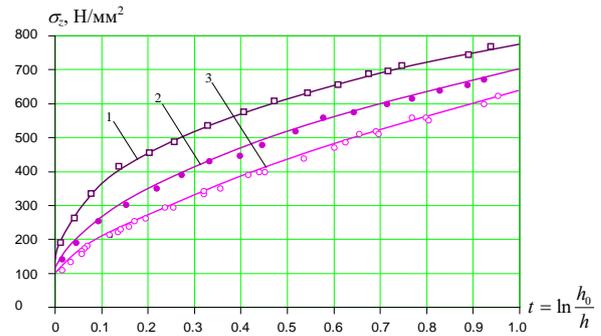


Рис. 2. Осьове напруження при осадці зразків з різною початковою пористістю θ_0 (залізо) ($t \geq 0,01$):

1 – $\theta_0 = 0,126$; $\sigma_z = -3 + 79,93 t^{0,314}$;
 2 – $\theta_0 = 0,208$; $\sigma_z = 7,5 + 62,58 t^{0,510}$;
 3 – $\theta_0 = 0,284$; $\sigma_z = 7 + 54,11 t^{0,571}$

Інтегрування системи диференціальних рівнянь (31), (37), а також обчислення відповідних значень τ_0 по (38) при довільній початковій пористості і параметрі n проводилось також з використанням чисельних методів. При цьому в якості вихідних даних вводився коефіцієнт $m = 0.86$, а також криві $\sigma_z(t)$ (рис. 2). При цьому криві $\sigma_z(t)$ апроксимували степеневою залежністю:

$$\sigma_z(t) = a_0 + a_1 t^{a_2} \tag{42}$$

Коефіцієнти апроксимації в (42) визначали методом найменших квадратів. В результаті встановлено, що прийнята залежність є достатньо прийнятним наближенням для опису експериментальної залежності $\sigma_z(t)$. При розв’язку системи рівнянь (31), (37) і обчислення (38) одночасно застосовували дані для двох початкових пористостей θ_0 . Отримані неявні залежності $\tau_0 = f(\Gamma_0)$ апроксимували степеневими функціями

$$\tau_0 = b_0 + b_1 \Gamma_0^{b_2} \tag{43}$$

за допомогою методу найменших квадратів. Криві (43) для обох початкових пористостей виводились при різних значеннях параметра n , починаючи з $n = 0$. При $n = 0.75$ криві $\tau_0 = f(\Gamma_0)$ співпали для обох початкових пористостей.

Застосування отриманого значення $n = 0.75$ в програмі для інших початкових пористостей підтвердило єдиність кривої $\tau_0 = f(\Gamma_0)$.

Таким чином, в результаті обробки експериментальних даних отримані значення m та n , які входять в функції пористості пористої заготовки на основі залізного порошку.

Остаточно для функцій пористості отримуємо наступні вирази:

$$f_1(\theta) = f_{10}^{1+n}(\theta) = ((1-\theta)^2)^{1+1.75} = (1-\theta)^{3.5}, \tag{44}$$

$$f_2(\theta) = \frac{1}{6\alpha(\theta)} f_1(\theta) = \frac{1}{6\alpha_0^m(\theta)} f_2(\theta) = 0.546 \frac{(1-\theta)^{4.36}}{\theta^{0.86}} \tag{45}$$

Для кривої течії, при $\Gamma_0 \geq 0.01$ отримано вираз:

$$\tau_0 = -15 + 83.73 \Gamma_0^{0.186} \tag{46}$$

Залежності (44–46) застосовуються для розрахунків напружень при пластичних деформаціях пористих заготовок в процесах обробки тиском. Функції $f_1(\theta)$, $f_2(\theta)$ та $\alpha(\theta)$ приведені на рис. 3, крива течії $\tau_0(\Gamma_0)$ – на рис. 4.

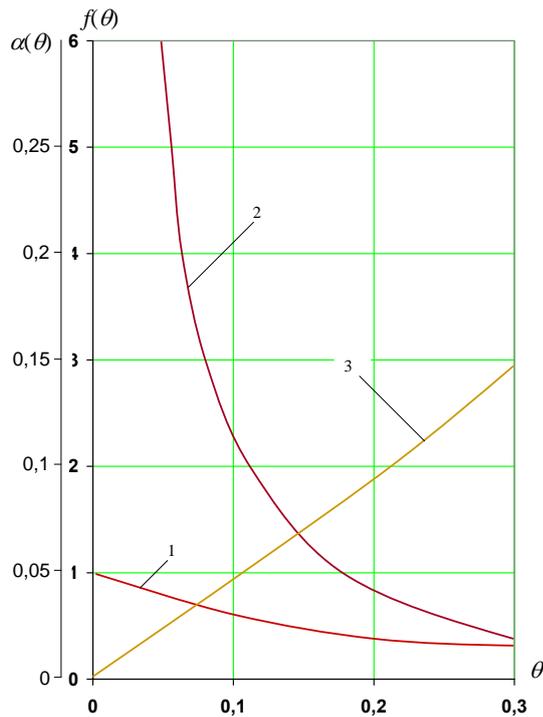


Рис. 3. Функції пористості $f_1(\theta)$, $f_2(\theta)$, $\alpha(\theta)$ для пористого тіла на основі заліза:

$$1 - f_1(\theta) = (1 - \theta)^{3,5};$$

$$2 - f_2(\theta) = 0,546 \frac{(1 - \theta)^{4,36}}{\theta^{0,86}};$$

$$3 - \alpha(\theta) = \frac{1}{6} \frac{f_1(\theta)}{f_2(\theta)} = \left[\frac{\theta}{4(1 - \theta)} \right]^{0,86}$$

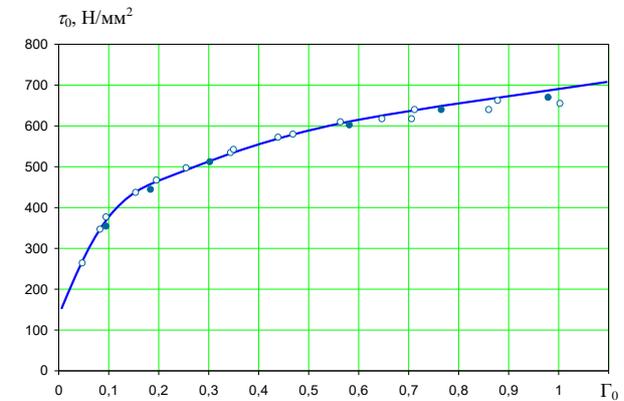


Рис. 4. Крива течії матеріалу основи пористого тіла на основі заліза

$$\tau_0 = -15 + 83,73 \Gamma_0^{0,186}; (\Gamma_0 \geq 0,01):$$

○ – $\theta = 0,286$; ● – $\theta = 0,208$

ВИСНОВКИ

Використовуючи основні положення механіки пластичної деформації пористих тіл розроблено методику описання механічних характеристик пористих тіл єдиними функціями, характер яких визначається властивостями матеріалу, з якого виготовлена пориста заготовка, і не залежить від початкової пористості. Розглянутий підхід дозволяє отримувати достовірні функції пористості для даного матеріалу, шляхом уточнення теоретичних функцій експериментальними дослідженнями. Отримано функції пористості для матеріалів на основі заліза. Розроблено методику розрахунку накопиченої деформації матеріалу основи. Побудована крива течії для матеріалів на основі заліза, які незалежно від початкової пористості описують єдиною кривою залежність інтенсивності напружень від накопиченої деформації матеріалу основи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sivak, R. I., Polishchuk, L. K., & Xianan, G. (2025). Modeling of mechanical characteristics of copper-based powder materials under their plastic forming to control porosity. *Materials Science*, 1-9.
2. Edalati, K., Ahmed, A. Q., Akrami, S., Ameyama, K., Aptukov, V., Asfandiyarov, R. N., ... & Zhu, Y. T. (2024). Severe plastic deformation for producing superfunctional ultrafine-grained and heterostructured materials: an interdisciplinary review. *Journal of Alloys and Compounds*, 1002, 174667.
3. Shtern, M. B., Mikhailov, O. V., Mikhailov, A. O. Generalized Continuum Model of Plasticity of Powder and Porous Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis link is disabled*, 2021, 60(1-2), pp. 20–34.
4. R. G. Greene, "Theory of plasticity of porous bodies", *Mekhanika*, No. 4, 109–120 (1973).
5. Kuhn H. A., Downey C.L. Deformation characteristics and plasticity theory. *Powder Mech.* 1971. 1. P. 15-25.
6. Shtern, M. B., Kartuzov, E. V. Formation and Propagation of Shock Waves in Highly Porous Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis link is disabled*, 2016, 55(3-4), pp. 134–140.

7. 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 link is disabled*, 2020, 59(3-4), pp. 127–133.
8. Skorokhod, V. V., Shtern, M. B. Rheological Model of Sintering and Viscous Flow of Porous Materials with 2D Defects. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis link is disabled*, 2019, 58(7-8), pp. 399–405.
9. Midukov, V. Z. Effect of internal stresses on the plasticity criterion of porous metals. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1991, 30(1), pp. 1–6.
10. Gogaev, K. A., Voropaev, V. S., Podrezov, Y. N., Koval, A. Y., Yevych, Y. I. Mechanical and fatigue properties of powder titanium strips, obtained by asymmetric rolling. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis link is disabled*, 2017, 56(1-2), pp. 69–77.
11. Prikhod'ko, I. Y., Dedic, M. A., Gogaev, K. A., Voropaev, V. S., Itsenko, A. I. Finite-Element Optimization of the Asymmetric Rolling Process for Titanium Powder. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis link is disabled*, 2016, 55(1-2), pp. 12–18.
12. Olevsky, E., Skorokhod, V. Deformation aspects of anisotropic-porous bodies sintering. *Journal De Physique*, 1993, 3(7 pt 1), pp. 739–742.
13. Петросян Г. Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. М. : Металлургия, 1988. 225 с.
14. Sivack I. O., Sakharov D. V., Babjuck T. I., Sivack R. I. The Determination of Prouosity Functions for Sintering Powder Materials. *Optimum Technologies, Technologic Systems and Materials in the Machines Building Field*. 1998, TSTM-4. P. 170-175.
15. Sivac I. O. The evaluation of Deformability of the Porous Bodeis. *The Bulletin of Politehnic Institute of Jassi*. 1996. XLII(XLVI), N 3-4. P. 607–611.
16. Veselovska, N., Sivak, R., Paladiychuk, Y., Bandura, V., Telyatnik, I., Bohatiuk, M., ... & Edl, M. (2024). Kinematic characteristics of deformed porous structures. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. Vol. 11 (1): D44–D53.
17. Edalati, K., Bachmaier, A., Beloshenko, V. A., Beygelzimer, Y., Blank, V. D., Botta, W. J., ... & Zhu, X. (2022). Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*, 10(4), 163-256.
18. Sivak, R., Kulykivskiy, V., Savchenko, V., Minenko, S., & Borovskiy, V. (2023). Determination of porosity functions in the pressure treatment of iron-based powder materials in agricultural engineering. *Scientific Horizons*. 26 (3): 124-134.
19. Son, S., Lee, J., Asghari-Rad, P., Kim, R. E., Park, H., Jang, J. I., ... & Kim, H. S. (2023). Hierarchically heterogeneous microstructure and mechanical behavior of the multi-materials prepared by powder severe plastic deformation. *Materials Research Letters*, 11(11), 915-924.
20. Ternero, F., Rosa, L. G., Urban, P., Montes, J. M., & Cuevas, F. G. (2021). Influence of the total porosity on the properties of sintered materials—a review. *Metals*, 11(5), 730.

REFERENCES

1. Sivak, R. I., Polishchuk, L. K., & Xianan, G. (2025). Modeling of mechanical characteristics of copper-based powder materials under their plastic forming to control porosity. *Materials Science*, 1-9.
2. Edalati, K., Ahmed, A. Q., Akrami, S., Ameyama, K., Aptukov, V., Asfandiyarov, R. N., ... & Zhu, Y. T. (2024). Severe plastic deformation for producing superfunctional ultrafine-grained and heterostructured materials: an interdisciplinary review. *Journal of Alloys and Compounds*, 1002, 174667.
3. Shtern, M. B., Mikhailov, O. V., Mikhailov, A. O. Generalized Continuum Model of Plasticity of Powder and Porous Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis link is disabled*, 2021, 60(1-2), pp. 20–34.
4. R. G. Greene, “Theory of plasticity of porous bodies”, *Mekhanika*, No. 4, 109–120 (1973).
5. Kuhn H. A., Downey C.L. Deformation characteristics and plasticity theory. *Powder Mech.* 1971. N1. P. 15-25.
6. Shtern, M. B., Kartuzov, E. V. Formation and Propagation of Shock Waves in Highly Porous Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis link is disabled*, 2016, 55(3-4), pp. 134–140.
7. 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 link is disabled*, 2020, 59(3-4), pp. 127–133.
8. Skorokhod, V. V., Shtern, M. B. Rheological Model of Sintering and Viscous Flow of Porous Materials with 2D Defects. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis link is disabled*, 2019, 58(7-8), pp. 399–405.
9. Midukov, V. Z. Effect of internal stresses on the plasticity criterion of porous metals. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1991, 30(1), pp. 1–6.
10. Gogaev, K. A., Voropaev, V. S., Podrezov, Y. N., Koval, A. Y., Yevych, Y. I. Mechanical and fatigue properties of powder titanium strips, obtained by asymmetric rolling. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis link is disabled*, 2017, 56(1-2), pp. 69–77.
11. Prikhod'ko, I. Y., Dedic, M. A., Gogaev, K. A., Voropaev, V. S., Itsenko, A. I. Finite-Element Optimization of the Asymmetric Rolling Process for Titanium Powder. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis link is disabled*, 2016, 55(1-2), pp. 12–18.
12. Olevsky, E., Skorokhod, V. Deformation aspects of anisotropic-porous bodies sintering. *Journal De Physique*, 1993, 3(7 pt 1), pp. 739–742.
13. Петросян Г. Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. М. : Металлургия, 1988. 225 с.

14. Sivack I. O., Sakharov D. V., Babjuck T. I., Sivack R. I. The Determination of Porosity Functions for Sintering Powder Materials. *Optimum Technologies, Technologic Systems and Materials in the Machines Building Field.* 1998, TSTM-4. P. 170-175.
15. Sivac 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.
16. Veselovska, N., Sivak, R., Paladiychuk, Y., Bandura, V., Telyatnik, I., Bohatiuk, M., ... & Edl, M. (2024). Kinematic characteristics of deformed porous structures. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine).* Vol. 11 (1): D44–D53.
17. Edalati, K., Bachmaier, A., Beloshenko, V. A., Beygelzimer, Y., Blank, V. D., Botta, W. J., ... & Zhu, X. (2022). Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*, 10(4), 163-256.
18. Sivak, R., Kulykivskyi, V., Savchenko, V., Mینenko, S., & Borovskyi, V. (2023). Determination of porosity functions in the pressure treatment of iron-based powder materials in agricultural engineering. *Scientific Horizons.* 26 (3): 124-134.
19. Son, S., Lee, J., Asghari-Rad, P., Kim, R. E., Park, H., Jang, J. I., ... & Kim, H. S. (2023). Hierarchically heterogeneous microstructure and mechanical behavior of the multi-materials prepared by powder severe plastic deformation. *Materials Research Letters*, 11(11), 915-924.
20. Ternero, F., Rosa, L. G., Urban, P., Montes, J. M., & Cuevas, F. G. (2021). Influence of the total porosity on the properties of sintered materials –a review. *Metals*, 11(5), 730.

Sivak R., Polishchuk L. Experimental-column method for determining porosity functions during plastic deformation of powder preparations based on iron.

The need of industry to obtain products with the required operational characteristics has led to the emergence and development of new technological processes for pressure treatment of pre-sintered porous materials. When studying the processes of plastic deformation of porous bodies, great importance is attached to the determination of porosity functions. The article presents a method for describing the mechanical characteristics of porous bodies by single functions. 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. At the same time, experimental data were obtained in experiments on axisymmetric settlement of cylindrical samples without friction at the ends. Based on the theoretical studies conducted, porosity functions for iron-based materials were obtained. Iron-based samples of five different initial porosities were used for the studies. As a result of processing the experimental data, final expressions for the porosity functions of the workpiece material based on iron powder were obtained. The article also presents a method for calculating the accumulated deformation of the base material. Flow curves for iron-based powder materials have been constructed.

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

Сивак Роман Іванович – д-р техн. наук, професор ВНТУ
Sivak Roman – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, VNTU
E-mail: sivak_r_i@ukr.net;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7459-2585>

Поліщук Леонід Клавдійович – д-р техн. наук, професор, зав. кафедри галузевого машинобудування ВНТУ, заслужений діяч науки і техніки України
Polishchuk Leonid – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Industrial Mechanical Engineering of VNTU, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine
E-mail: leo.polishchuk@gmail.com;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5916-2413>

Бочковой Дмитро Олександрович – аспірант, ДДМА
Bochkovoi Dmytro – Graduate student DSEA
E-mail: bochkovoi.dmytriy@gmail.com;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4596-7201>

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця
VNTU – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.