

УДК 621.762

## АНАЛІЗ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ГУСТИНИ ПОРИСТОГО ПРОНИКЛИВОГО МАТЕРІАЛУ ЗА РАДІУСОМ ПРИ РАДІАЛЬНО-ІЗОСТАТИЧНОМУ ПРЕСУВАННІ

*Повстяной О.Ю., Штерн М.Б.*

*Луцький національний технічний університет*

*Проведено аналіз і розрахунок розподілу густини за радіусом пористого проникливого пустотілого циліндру, який отриманий методом радіально-ізостатичного пресування. Через певні аналітичні розрахунки визначено фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густини при даному виді пресування для пористих проникливих матеріалів.*

*Авторами статті доведено, що для отримання оптимального поророзподілення по січенню пористого проникливого матеріалу, яке забезпечує максимальне значення експлуатаційних характеристик, необхідно використовувати таку схему пресування, яка дозволяє зв'язати структурні характеристики даного матеріалу з їх основними режимами роботи.*

*Проведено статистичну обробку отриманих у процесі вимірювання характеристик пористих матеріалів, а також відображено графічні залежності для візуалізації процесу аналізу структури.*

*Показано, що для практичного створення потрібної пористої структури матеріалу, яка буде відповідати оптимальному поєднанню експлуатаційних характеристик, необхідно встановити взаємозв'язок між технологічним режимами отримання і оптимальним перерозподілення за радіусом.*

**Ключові слова:** пористий проникливий матеріал, радіально-ізостатичне пресування, розподіл густини, пористість, поле напружень, девіатор напружень.

**Вступ.** Сучасний стан розвитку порошкової металургії характеризується процесом неперервного збагачення її новими ідеями отримання пористих проникливих матеріалів (ППМ) [1, 2]. Однак, рішення цих задач методами порошкової металургії обмежені, з однієї сторони, технологічними можливостями відомих прийомів та методів отримання фільтруючих матеріалів [3, 4], а з другої, залежностями ряду властивостей від параметрів виготовлення [5, 6]. Крім того, на практиці при створенні ППМ зі заданим комплексом експлуатаційних характеристик виникають труднощі, які пов'язані з обмеженими властивостями традиційних технологій виготовлення.

Тому для отримання оптимального поророзподілення по січенню ППМ, яке б забезпечило максимальне значення експлуатаційних характеристик, необхідно використовувати таку схему пресування, яка дозволила би зв'язати структурні характеристики ППМ з основними режимами роботи їх та спрогнозувати оптимальне поророзподілення ППМ.

Отже, для практичного створення потрібної пористої структури ППМ, яка буде відповідати оптимальному поєднанню експлуатаційних характеристик, необхідно встановити взаємозв'язок між технологічним режимами отримання і оптимальним поророзподілення за радіусом ППМ.

**Актуальність дослідження.** Метод радіально-ізостатичного пресування полягає в тому, що на відміну від більш поширеного осьового пресування в жорстких матрицях, зусилля до порошку прикладається у радіальному напрямку. Однією із переваг даного методу вважають рівномірність розподілу густини по об'єму пресовки. Дійсно, затрати на протидію зовнішньому тертю у випадку радіального пресування, з цієї точки зору, виявилися на порядок менші. Ця обставина і стала першопричиною при виборі методу отримання довгих циліндричних пустотілих виробів.

Саме цим керувалися Борок Б. А. та Мейерсон В. Д. у своїх роботах [7, 8], де описувався даний метод. Згодом, їх послідовники та прибічники почали шукати теоретичне виправдання однорідності розподілу густини. Щоправда, вже на початку 80-х років думки дослідників дещо розійшлися, хоча більшість схилилась на користь того, що густина має розподілятися рівномірно по радіусу.

Певним виправданням цього факту були публікації Штерна М. Б. та Мартинової І. Ф., де даний результат покладался в основу обчислень, спрямованих на визначення робочого тиску за умов радіального обтиснення [9, 10]. У той же час, більш послідовний підхід, який запропонував Михайлов О. В., ґрунтувався на застосуванні методу скінчених елементів не підтверджував рівномірного розподілу густини по радіусу [11]. Даний результат було отримано обчислювальним шляхом, різниця у поглядах певний час зберігалась.

**Постановка задачі.** Саме тому на підставі вищенаведеного, а також особливої уваги, якої набуває дане питання у зв'язку із вибором технології пресування. Тому **метою даної роботи** є проведення спеціального дослідження спрямованого на вирішення питання про розподіл густини за радіусом при радіально-ізостатичному пресуванні.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні **задачі**:

- дати опис геометричній моделі процесу пресування ППМ та розрахувати напруження та швидкості деформацій при цьому;
- визначити поле густини пустотілого ППМ;
- перевірити адекватність математичної моделі та точності теоретичних розрахунків за допомогою експериментальних досліджень.

**Результати дослідження.** Для досягнення даної мети використано континуальну теорію пластичності пористого тіла у модифікації, запропонованої у роботах [12, 13]. При цьому буде отриманий результат, який матиме відносно простий аналітичний вигляд, що дозволить аналізувати фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густини.

Геометричну модель ППМ у вигляді пустотілого циліндру представлено на рис. 1

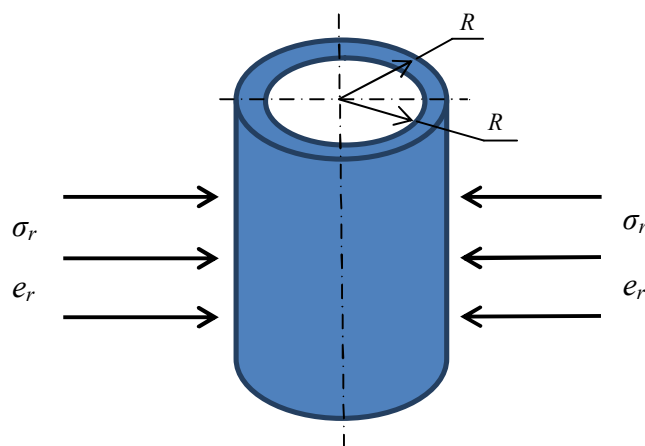


Рисунок 1 – Геометрична модель прикладання напружень на ППМ у вигляді пустотілого циліндру

Припускаємо, що циліндр на рис. 1 перебуває під дією радіального обтиснення, яке прикладене на його зовнішній поверхні  $r=R_2$ . Його внутрішня поверхня також циліндрична з радіусом  $r=R_1$  є нерухомою. Завдяки опору, який чинить металевий порошок радіальному переміщенню, у ньому виникають напруження  $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\varphi$ . Дотичні напруження не є визначальними та в подальшому ігноруються.

У свою чергу, радіальна дія, що визначається швидкістю  $v_r$  обумовлює існування швидкостей деформацій  $e_r = \frac{\partial v_r}{\partial r}$ , а також  $e_\varphi = \frac{v_r}{r}$ . Ці компоненти разом із компонентою осьової деформації  $e_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}$  задовольняють рівняння збереження маси (рівняння нерозривності):

$$e = e_z + e_r + e_\varphi, \quad (1)$$

де  $e$  – швидкість зміни об'єму, яка пов'язана зі швидкостями зміни пористості та густини виразим:

$$e = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{1-\theta} \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (2)$$

Згідно із відомими технологіями радіального обтиснення, висота на змінюється, тому далі вважатимемо, що  $e_z = 0$

Далі також будуть використані перші два інваріанти тензорів напружень і швидкостей деформацій, які подаються у вигляді:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\varphi); \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(e_r - e_\varphi)^2 + (e_z - e_\varphi)^2 + (e_r - e_z)^2}; \quad (4)$$

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_z - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}. \quad (5)$$

Далі використаємо модель пластичності пористого тіла, яке вільне від впливу третіх інваріантів або параметрів Лоде-Надаї. Тому компоненти девіаторів напружень і швидкостей деформацій подібні. Це виражається наступною тензорною рівністю:

$$\frac{\sigma_z - \sigma_r}{\sigma_z - \sigma_r} = \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{e_r - e_\varphi} = \frac{\sigma_\varphi - \sigma_z}{e_\varphi - e_z}. \quad (6)$$

Зокрема, її наслідком є рівність:

$$\frac{\sigma_z - \sigma_r}{e_z - e_r} = \frac{\sigma_\varphi - \sigma_z}{e_\varphi - e_z}. \quad (7)$$

Слід підкреслити, що процес деформування, який має місце при радіально-ізостатичному пресуванні, відповідає плоскій течії. Тому, незважаючи на відсутність осової компоненти швидкості, осова компонента тензора напружень відмінна від нуля та легко визначається з рівняння (7):

$$\sigma_z = \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{e_r - e_\varphi} e_z + \frac{e_r \sigma_\varphi - e_\varphi \sigma_r}{e_r - e_\varphi}, \quad (8)$$

яке за допомогою умови  $e_z = 0$  набуває вигляду:

$$\sigma_z = \frac{e_r \sigma_\varphi - e_\varphi \sigma_r}{e_r - e_\varphi}. \quad (9)$$

Далі особливу роль відіграватимуть інтенсивності девіаторів швидкостей деформацій і напружень:

$$\gamma = \frac{\sqrt{e_r^2 + (e_r - e_\varphi)^2 + e_\varphi^2}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

$$\tau = \gamma \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{e_r - e_\varphi}. \quad (11)$$

Внаслідок сформульованих спрощень набувають конкретного вигляду та вирази для середнього тиску й інтенсивності девіатору напружень:

$$p = \frac{1}{3} \left( \frac{e_r(\sigma_r + 2\sigma_\varphi) - e_\varphi(2\sigma_r + \sigma_\varphi)}{e_r - e_\varphi} \right) \quad (12)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{e_r^2 + (e_r - e_\varphi)^2 + e_\varphi^2}}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{e_r - e_\varphi}. \quad (13)$$

Основна ідея побудови розв'язку полягає у застосуванні двох етапів. На першому з них виходимо з припущення, що поле густини є однорідним.

У дійсності вона не є однорідно розподіленою. От саме для того, щоб цю неоднорідність визначити, ми повертаємось до рівнянь, які описують поверхню навантаження [14].

Отже, почнемо із припущення, що густина розподілена однорідною. Із рівняння нерозривності (1) за умови, що  $e_z = 0$ , в цьому випадку випливає, що:

$$e_r = \frac{1}{2}e - \frac{b}{r^2}; \quad (14)$$

$$e_\varphi = \frac{1}{2}e + \frac{b}{r^2}; \quad (15)$$

$$v_r = \frac{1}{2}er + \frac{b}{r}. \quad (16)$$

Рівняння (19–21) містять швидкість зміни об'єму  $e$  та константу інтегрування  $b$ . Для того, щоб визначити цю константу використовуємо умову:

$$v_r = 0 \quad \text{якщо} \quad r = R_1 \quad (17)$$

$$0 = \frac{1}{2}eR_1 + \frac{b}{R_1}. \quad (18)$$

Задовольняючи цю умови, знаходимо:

$$b = -\frac{1}{2}eR_1^2. \quad (19)$$

Звідси виводимо ряд рівностей:

$$e_r = \frac{1}{2}e + \frac{\frac{1}{2}eR_1^2}{r^2}; \quad (20)$$

$$e_\varphi = \frac{1}{2}e - \frac{\frac{1}{2}eR_1^2}{r^2}; \quad (21)$$

$$e_r - e_\varphi = \frac{R_1^2}{r^2}e. \quad (22)$$

Тепер переходимо до визначення поля напружень. Із цією метою ми використовуємо рівняння (20–22):

$$\sigma_r - \sigma_\varphi = \frac{3(e_r - e_\varphi)\sigma_r}{2e_r - e_\varphi + 3e\chi} = \frac{3\frac{R_1^2}{r^2}\sigma_r}{\left(\frac{1}{2} + \frac{3R_1^2}{2r^2}\right) + 3\chi}, \quad (23)$$

а також рівняння квазістатки, яке часто називають рівнянням рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0. \quad (24)$$

Підставляючи (23) у (24), приходимо до простого звичайного диференціального рівняння:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{6R_1^2 \sigma_r}{3rR_1^2 + r^3(1 + 6\chi)} = 0. \quad (25)$$

Загальний розв'язок рівняння (25) можемо подати у вигляді, який включає невідому константу інтегрування  $C$ :

$$\sigma_r = \frac{r^2 + 3R_1^2 + 6r^2\chi}{r^2} C. \quad (26)$$

Для її знаходження використовуємо той факт, що за відсутності внутрішньої порожнини, напруження буде розподілене рівномірно та буде рівним радіальному тиску  $p_{rad}$ :

$$R_1 = 0: \sigma_r = (1 + 6\chi)C = p_{rad}.$$

За його допомогою знаходимо всі компоненти тензору напружень та інваріанти напруженого стану:

$$\sigma_r = \frac{r^2 + 3R_1^2 + 6r^2\chi}{r^2} \frac{p_{rad}}{(1 + 6\chi)}; \quad (27)$$

$$\sigma_\varphi = \sigma_r - \frac{3 \frac{R_1^2}{r^2}}{\left(\frac{1}{2} + \frac{3R_1^2}{2r^2}\right) + 3\chi} \sigma_r; \quad (28)$$

$$\sigma_r - \sigma_\varphi = \frac{3 \frac{R_1^2}{r^2}}{\left(\frac{1}{2} + \frac{3R_1^2}{2r^2}\right) + 3\chi} \sigma_r; \quad (29)$$

$$p = \frac{6\chi}{1 + 6\chi} p_{rad}; \quad (30)$$

$$\tau = -\frac{\sqrt{6 + \frac{18R_1^4}{r^4}}}{1 + 6\chi} p_{rad}; \quad (31)$$

$$\frac{p^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} = (1 - \theta)\sigma_m; \quad (32)$$

$$\varphi = 1; \quad (33)$$

$$\chi = \psi = \frac{a}{\theta}; \quad (34)$$

$$p = \frac{6\chi}{1 + 6\chi} p_{rad};$$

$$\tau = -\frac{\sqrt{6 + \frac{18R_1^4}{r^4}}}{1 + 6\chi} p_{rad}. \quad (35)$$

Значення  $p_{rad}$  знаходимо, розв'язуючи однорідну задачу про радіальне стиснення циліндра, який не містить порожнину. Розв'язок представлений послідовністю наступних рівнянь:

$$e_z = 0; \quad (36)$$

$$e = 2e_r; \quad (37)$$

$$\gamma = -\sqrt{\frac{2}{3}}e_r; \quad (38)$$

$$p = +\sqrt{1-\theta_0} \frac{2e_r\psi}{\sqrt{\left(-\sqrt{\frac{2}{3}}e_r\right)^2\varphi + (2e_r)^2\psi}}\sigma_m; \quad (39)$$

$$\tau = \sqrt{1-\theta_0} \frac{-\sqrt{\frac{2}{3}}e_r\varphi}{\sqrt{\left(-\sqrt{\frac{2}{3}}e_r\right)^2\varphi + (2e_r)^2\psi}}\sigma_m; \quad (40)$$

$$\sigma_r = p - \frac{\tau}{\sqrt{6}}. \quad (41)$$

Отже,

$$P_{rad} = \sigma_r = -\frac{\sqrt{1-\theta_0}\sigma_m\sqrt{\varphi+6\psi}}{\sqrt{6}}. \quad (42)$$

Підставляючи значення  $\varphi$  та  $\psi$  та пам'ятаючи, що пористість відповідає рівномірному її розподілу, отримаємо:

$$p_{rad} = -\sqrt{1-\theta_0}\sigma_m\sqrt{\frac{1}{6} + \frac{a}{\theta_0}}. \quad (43)$$

На підставі результатів, які отримані раніше, можна безпосередньо перейти до визначення поля густини. Тому скористуємось першим із визначальних співвідношень – рівнянням (5). Зауважимо, що раніше ми ним ще не користувались. Подамо його спершу у вигляді:

$$\frac{p^2}{a}\theta + \tau^2 = (1-\theta)\sigma_m. \quad (44)$$

Звертає на себе увагу той факт, що воно містить інваріанти тензора напружень, які є нелінійними функціями  $r$ . Саме це рівняння є лінійним відносно пористості  $\theta$ . Слід зауважити, що в даному випадку це значення пористості вже є наступним наближенням до істинного поля густини. Попереднім, або нульовим наближенням, було  $\theta = \theta_0$ .

Розв'язуючи це рівняння відносно  $\theta$ , отримаємо рівняння для уточненого поля густини:

$$\theta = \frac{a(\sigma_m^2 - \tau^2)}{p^2 + a\sigma_m^2}. \quad (45)$$

Після підстановки у нього отриманих значень для  $p$ ,  $\tau$ ,  $p_{rad}$ , маємо:

$$\theta = \frac{a \left( \sigma_m^2 - \left( -\frac{\sqrt{6 + \frac{18R_1^4}{r^4}}}{1 + 6\chi} p_{\text{rad}} \right)^2 \right)}{\left( \frac{6\chi}{1 + 6\chi} p_{\text{rad}} \right)^2 + a\sigma_m^2} \quad (46)$$

Для конкретних обчислень перш за все необхідно знайти величину  $\theta_0$ , яка є нульовим наближенням до пористості. Із цією метою використовуємо закон збереження маси:

$$\theta_0 = 1 - \frac{R_{2i}^2}{R_2^2} (1 - \theta_i). \quad (47)$$

Тут і надалі  $R_{2i}$  – це початковий радіус заготовки перед радіально-ізостатичним навантаженням,  $\theta_i$  – початкова пористість.

Параметр  $a$  доцільно визначити із експерименту на всебічне стиснення, апроксимуючи криву «тиск – пористість» у вигляді  $p = \frac{a}{\theta}$ . Параметр  $\sigma_m$  доцільно вважати рівним тиску, який відповідає зменшенню пористості на 25% від початкового значення (тобто, якщо вона була спочатку рівна 0,5, то  $\sigma_m$  рівне тому тиску, коли пористість дорівнюватиме 0,375).

Вигляд розрахункової залежності пористості наведений на рисунку 2. Як видно з розрахунків та проведення практичного дослідження пористість змінюється при зміні радіусу циліндричної заготовки ППМ (пустотілого циліндру), який виготовлений методом радіально-ізостатичного пресування.

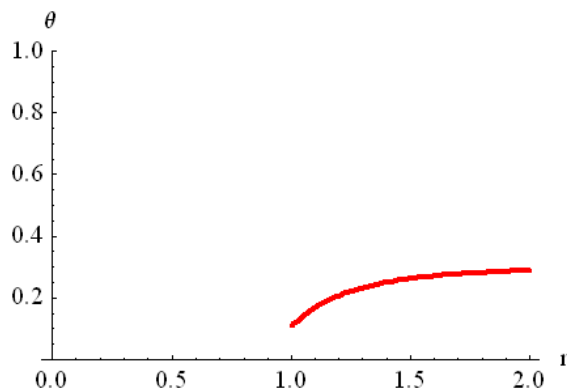


Рисунок 2 – Залежність пористості  $\theta$  від радіусу  $r$  (см) заготовки

Для перевірки адекватності математичної моделі та точності теоретичних розрахунків визначимо структурні характеристики металографічним методом за допомогою прикладної програми *Smart-eye*<sup>®</sup>, яка розроблена у Луцькому НТУ авторами під керівництвом наукового співробітника доц. Коменди Т. В. [15].

Для дослідження цілого зразка пористого проникливого матеріалу (пустотілого циліндра) ми розбили його на п'ять рівних частин по висоті з метою отримання структурного аналізу кожної частини, а потім і вцілому.

Для визначення структурного аналізу необхідно провести калібрування, тобто визначення правильного розміру частини мікрошліфа (рис. 3).

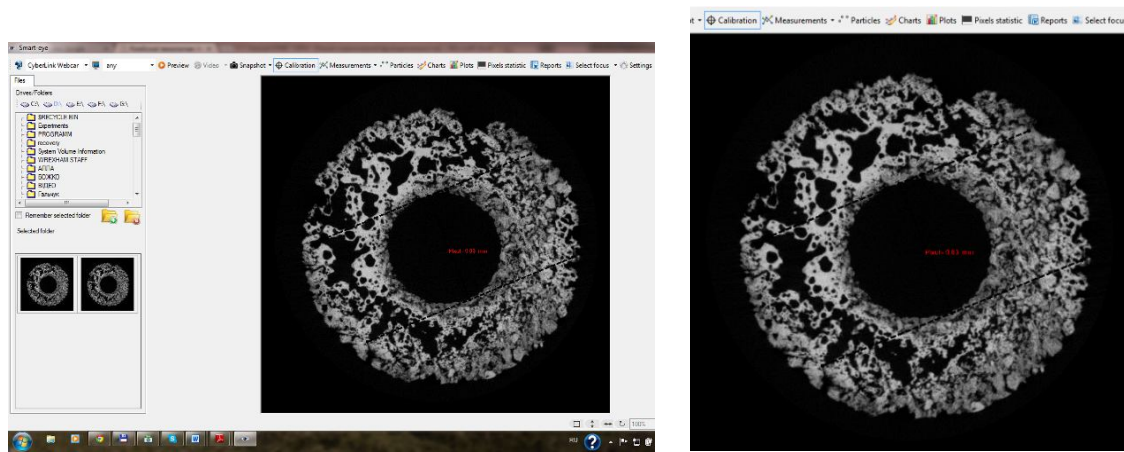


Рисунок 3 – Процес калібрування зразка та введення реальної розмірності за допомогою програми *Smart-eye*<sup>®</sup>

Програмне забезпечення *Smart-eye*<sup>®</sup> дозволяє здійснювати автоматичний розрахунок розподілу пористості за радіусом зразка та статистичну обробку даних перерізів ППМ (рис. 4).

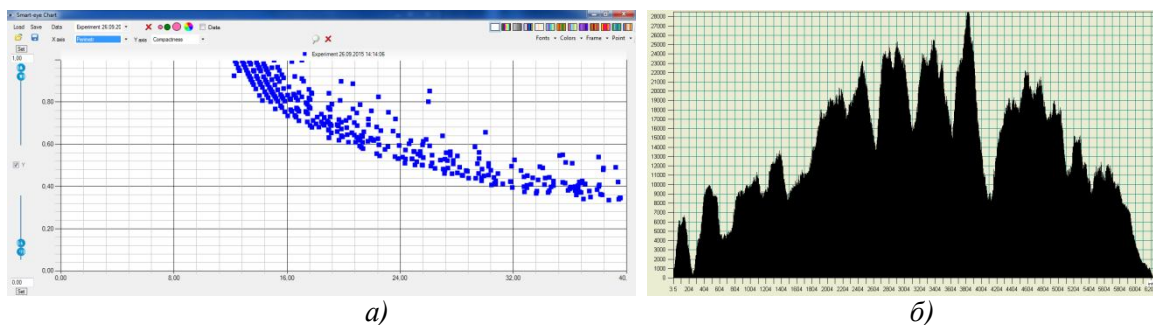


Рисунок 4 – Автоматичний розрахунок розподілу пористості  $\theta$  за радіусом  $r$  (мм) зразка (а) та статистична обробка даних (б) перерізів ППМ

Із графіку видно, що розподіл пористості за радіусом пустотілого циліндра ППМ нерівномірний, особливо це яскраво видно на відстаннях, що наближаються до зовнішнього діаметру заготовки (32.. 40 мм).

**Висновки.** Авторами даного наукового дослідження було проведено аналіз і розрахунок розподілу густини за радіусом пустотілого ППМ, який отриманий методом радіально-ізостатичного пресування. Під час проведення теоретичних розрахунків був отриманий результат, який має простий аналітичний вигляд і дозволяє аналізувати фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густину. Це і показано в ході проведення розрахунків і перевірки експериментально.

Проведено статистичну обробку отриманих у процесі вимірювання характеристик ППМ, а також відображено графічні залежності для візуалізації процесу аналізу структури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пористые проницаемые материалы : справочник / [Белов С. В., Витязь П. А., Шелег В. К. и др.]. – М. : Металлургия, 1987. – 332 с.
2. Шибряев Б. Ф. Пористые проницаемые порошковые материалы / Б. Ф. Шибряев. – М. : Металлургия, 1982. – 168 с.
3. Анащенко М. П. Пористые материалы из металлических порошков для очистки питьевой, технической и сточной воды / М. П. Анащенко, Л. П. Пилинович, В. В. Савич, А. Л. Рак // Новые ресурсосберегающие технологии и улучшения экологической обстановки в легкой промышленности и машиностроении : пез. докл. межд. конф. – Витебск, 1998. – С. 269-271.



4. Витязь П. А. Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин.– Мн. : НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.
5. Витязь П. А. Прогнозирование свойств спеченных пористых материалов с переменной по сечению пористостью бидисперсной глобулярной модели / П. А. Витязь, В. К. Шелег, В. М. Капцевич. – Мн. : Высшэйшая школа, 1980. – Вып. 4. – С. 68-72.
6. Федорченко И. М. Фильтрующие свойства высокопористых материалов, изготовленных из железного порошка с несферической формой частиц / И. М. Федорченко, Н. А. Филатова // Порошковая металлургия. – 1962. – № 3. – С. 49-54.
7. Борок Б. А. Порошковая металлургия : уч. для вузов. / Б. А. Борок, И. И. Ольхов – М. : Металлургиздат, 1948. – 144 с.
8. Борок Б. А. Гидростатическое прессование металлических порошков / Борок Б.А. // Порошковая металлургия : доклады 4-го Всесоюзного совещания по вопросам порошковой металлургии – М. : Металлургиздат, 1956. – С.187-203.
9. Штерн М. Б. Про залежність густина – тиск та розподілі густини при пресуванні порошків / М. Б. Штерн // Порошкова металургія. – 2014. – № 03/04. – С. 19-29.
11. Штерн М. Б. Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы прессования на распределение плотности / М. Б. Штерн, О. В. Михайлов // Порошковая металлургия. – 2002. – № 11/12. – С. 29-36.
12. Михайлов О. В. Моделювання ущільнення біпористих порошкових виробів, що мають похілі до напрямку пресування поверхні / О. В. Михайлов // Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві. – К. : ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України. – 2011. – № 13. – С. 90-95.
13. Штерн М. Б. Развитие теории пластичности пористых тел / М. Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 1992.– № 9. – С. 19-29.
14. Штерн М. Б. Определение ресурса пластичности порошковых материалов на основе модели пластического течения пористых тел. I. Критерий исчерпания ресурса пластичности / М. Б. Штерн, В. Д. Дудунов // Порошковая металлургия. – 1999. – № 11/12. – С. 31-40.
15. Кузьмов А. В. Влияние третьего инварианта на свойства и структуру определяющих соотношений порошковых материалов / А. В. Кузьмов, М. Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 2003. – № 7–8. – С. 1-10.
16. Металлографічний аналіз та обробка зображень мікроструктури сопел для піскоструменевої обробки, які виготовлені методами порошкової металургії / [О. Ю. Повстяной, В. А. Сичук, А. Макмиллан, В. Д. Рудь, О. В. Заболотний] // Порошкова металургія. – 2015. – № 3/4. – С. 136-143

**Повстяной А.Ю., Штерн М.Б. АНАЛИЗ И РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОРИСТОГО ПРОНИЦАЕМОГО МАТЕРИАЛА ПО РАДИУСУ ПРИ РАДИАЛЬНО-ИЗОСТАТИЧЕСКОМ ПРЕССОВАНИИ**

*Проведен анализ и расчет распределения плотности по радиусу пористого пористого пустотелого цилиндра, полученный методом радиально-изостатического прессования. Через определенные аналитические расчеты определены факторы, которые способствуют неоднородности распределения плотности при данном виде прессования для пористых пористых материалов.*

*Авторами статьи доказано, что для получения оптимального распределения по сечению пористого пористого пористого материала, который обеспечивает максимальное значение эксплуатационных характеристик, необходимо использовать такую схему прессования, которая позволяет связать структурные характеристики данного материала с основными режимами их работы.*

*Проведено статистическую обработку полученных в процессе измерения характеристик пористых материалов, что и отражено в графических зависимостях для визуализации процесса анализа структуры.*

*Показано, что для практического создания нужной пористой структуры материала, которая будет соответствовать оптимальным эксплуатационным характеристикам, необходимо*

*установить взаимосвязь между технологическим режимами получения и оптимальным порораспределением по радиусу.*

**Ключевые слова:** *пористый проницаемый материал, радиально-изостатическое прессование, распределение плотности, пористость, поле напряжений, девиатор напряжений.*

**Povstyanoy O.Yu., Shtern M.B. ANALYSIS AND CALCULATION OF THE DENSITY DISTRIBUTION OF POROUS PERMEABLE MATERIAL ON THE RADIUS OF THE RADIAL-ISOSTATIC PRESSING**

*The analysis and calculation of the density distribution along the radius of the porous permeable hollow cylinder obtained by radial-isostatic pressing. At certain analytical calculations of the factors that contribute to the heterogeneity of the density distribution in this type of compression of porous permeable materials.*

*The authors demonstrated that for optimal distribution by chopping penetrating the porous material that provides maximum performance value, you must use a scheme of pressing, which allows you to link structural characteristics of the material of the main modes of them.*

*A statistical analysis of the process of measuring the characteristics of porous materials and graphical displays for visualizing the dependency structure analysis process.*

*It is shown that for practical establishment of the desired porous structure of the material that will fit the optimal combination of performance, it is necessary to establish the relationship between technological regimes and obtain optimal pororozpodilennya radius.*

**Keywords:** *porous permeable material, radial-isostatic pressing, the density distribution, the porosity, the stress field, the stress deviator.*

© Повстяной О. Ю., Штерн М. Б.

Статтю прийнято  
до редакції 13.10.15