

УДК 621.669.15: 621.762

ОПТИМІЗАЦІЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОШАРОВИХ ПОРУВАТИХ ПРОНИКНИХ МАТЕРІАЛІВ

О. Ю. ПОВСТЯНОЙ, В. Д. РУДЬ, Н. Ю. ІМБІРОВИЧ, Т. Н. ГАЛЬЧУК,
Т. І. ЧЕТВЕРЖУК, М. В. СМАЛЬ, А. В. ДЗЮБІНСЬКИЙ

Луцький національний технічний університет

Розроблено математичну модель отримання багатошарових фільтрувальних поруватих проникних матеріалів (ППМ) зі змінною пористістю методом сухого радіально-ізостатичного пресування порошку ШХ15 з пороутворювачем. Обчислено розподіл густини за радіусом пустотілого ППМ, отриманого методом радіально-ізостатичного пресування. Завдяки теоретичним розрахункам проаналізовано фактори, які сприяють неоднорідності розподілу пористості у ППМ. Встановлено та підтверджено комп'ютерним моделюванням, що за пресування ППМ циліндричної форми розподіл пористості нерівномірний. Виявлено, що зі збільшенням радіуса пористість зростає.

Ключові слова: поруватий матеріал, радіально-ізостатичне пресування, математичне моделювання, відходи промислового виробництва.

Вступ. У світовій металургії, зокрема порошкової, завдяки новим розробленим технологічним процесам отримують матеріали з кращими або зовсім новими властивостями. До таких виробів належать поруваті проникні матеріали (ППМ), які використовують як фільтри для очищення рідини та газів практично у всіх галузях промисловості [1–3].

Вибір оптимальних параметрів для створення поруватих проникних матеріалів є складним, важливим та відповідальним завданням. Поряд з традиційними методами досліджень на сьогодні все ширше застосовують методи комп'ютерного моделювання. Це стало можливим завдяки істотному прогресу в розумінні основних особливостей поведінки порошкових матеріалів під час їх ущільнення, спікання та експлуатації.

Сьогодні труднощі пресування пористих середовищ долають застосуванням комп'ютерного моделювання, яке дає змогу оптимізувати технологію отримання пористих проникних матеріалів [4–6].

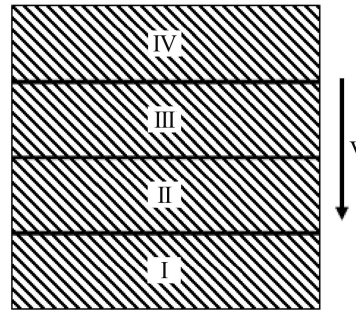
Мета роботи – встановити залежність між режимами отримання поруватих проникних матеріалів та їх експлуатаційними характеристиками, побудувати математичну модель процесу, а також визначити оптимальні параметри технологічного процесу виготовлення багатошарових градієнтних ППМ.

Методика досліджень та використані матеріали. Як вихідні матеріали для теоретичних та експериментальних досліджень вибрали порошок сталі ШХ15 (відходи промислового виробництва) [7]. А фактори оптимізації – товщина шару, кількість шарів та пороутворювача (ПУ) у шарі. Змінюючи їх, можна отримати практично будь-яке потрібне поророзподілення за товщиною фільтрувального матеріалу. Для оптимального поророзподілення поруватість ППМ повинна збільшуватися від шару до шару у напрямку до фільтрувального потоку [8, 9].

Схематично структуру фільтрувального ППМ подано на рис. 1.

Рис. 1. Схема пористої структури багат шарового ППМ:
 I – шар 0, II – шар N2, III – шар N1,
 IV – шар N, V – фільтрувальний потік.

Fig. 1. Scheme of the porous structure of the multilayer porous penetrating material (PPM): I – layer 0, II – layer N2, III – layer N1, IV – layer N, V – filtering stream.



Згідно з експериментальними дослідженнями впливу кількості ПУ на формування порошку ШХ15 [10], “Шар 0” повинен містити $\geq 5\%$ пороутворювача. Крім того, для забезпечення заданого очищення “Шар 0” повинен мати товщину, яка забезпечує регулярну структуру ППМ. “Шар N” та “шар N1” мають максимальну пористість та розмір пор і поглинають багато частинок забруднювача великого розміру. “Шар 0” та “шар N2” служать для тонкого очищення, тому мають мінімальні розміри пор та низьку пористість. Їх у кожному шарі можна регулювати, змінюючи вміст ПУ у шихті шару. Висота шару задається частинками порошку.

Параметри експериментальних зразків: K_{μ} – коефіцієнт проникності, m^2 ; Q – об’ємна витрата рідини, l/min ; G – брудоемність, %; σ_{bend} – границя міцності на згин, МПа; E_1 та R – параметри ефективності; E – узагальнений параметр ефективності.

Оптимальні значення експлуатаційних характеристик, які визначають пористу структуру фільтрувальних ППМ

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|----------------|------------|---------|--------|-------|----------------------|------|
| Товщина шару, mm | n_1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 |
| | n_2 | 6 | 4 | 3 | 6 | 3 | 6 | 4 |
| | n_3 | 6 | 4 | 4 | 6 | 4 | 6 | 4 |
| | n_4 | 6 | 4 | 4 | 6 | 5 | 6 | 4 |
| | n_5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 4 | 6 | 6 |
| Кількість пороутворювача у шарі, % | x_6 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 10 | 17 |
| | | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 15 | 25 |
| | | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 20 | 33 |
| | | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 25 | 42 |
| | | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 30 | 50 |
| Експлуатаційні параметри | | K_{μ}, m^2 | $Q, l/min$ | $G, \%$ | E_1 | R | σ_{bend}, MPa | E |
| Значення експлуатаційних максимумів | | 34,66 | 27,54 | 13,68 | 0,2961 | 43,24 | 67,12 | 3,14 |
| | | 30,68 | 33,71 | 18,36 | 0,2771 | 71,91 | 62,99 | 3,40 |
| | | 30,06 | 28,89 | 18,66 | 0,2742 | 71,15 | 59,12 | 3,50 |
| | | 34,66 | 27,54 | 13,68 | 0,2961 | 43,24 | 67,12 | 3,14 |
| | | 29,10 | 28,56 | 16,68 | 0,2697 | 75,87 | 63,26 | 2,98 |
| | | 31,29 | 23,80 | 9,23 | 0,2805 | 23,22 | 76,06 | 2,58 |
| | | 30,55 | 29,38 | 18,58 | 0,2765 | 70,64 | 60,45 | 3,58 |

Як математичну модель отримання фільтрувальних багатошарових градієнтних ППМ з порошку ШХ15 та пороутворювача, взято регресивне рівняння у вигляді поліному 2-го порядку від факторів X_1, \dots, X_5 , доповненому лінійним членом X_6 та його взаємодією зі всіма членами поліному від п'яти факторів. У загальному вигляді вибрано поліномну регресивну модель, яку можна записати так:

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^6 B_i X_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 B_{ij6} X_i X_j X_6, \quad i \leq j. \quad (1)$$

Коефіцієнти рівняння обчислювали за алгоритмом покрокової регресії методом виключення [11]. Розраховували за допомогою програми STATISTICA 10.

На основі отриманих регресивних залежностей основних параметрів, які характеризують експлуатаційні показники фільтрів, розв'язана задача пошуку оптимальних значень факторів, які керують формуванням їх структури.

На першому етапі задачу розв'язували так:

$$F_k(n_1, n_2, \dots, n_5, x_6) \rightarrow \max; \quad 0 \leq n_i \leq 5; \quad -1 \leq x_6 \leq 1. \quad (2)$$

Тут F_k – регресійні залежності, які описують залежність експлуатаційних параметрів від $n_1, n_2, \dots, n_5, x_6$, де n_1, n_2, \dots, n_5 – цілі значення кількості частинок у відповідному шарі.

У математичному змісті задача належить до класу задач нелінійної цілочислової оптимізації. Отримані результати подані у таблиці.

Результати досліджень. Двошаровий фільтрувальний ППМ $\varnothing 40 \times 220$ mm, отриманий за технологією поетапного пресування методом сухого радіально-ізостатичного пресування із порошку ШХ15 та пороутворювача, зображений на рис. 2.

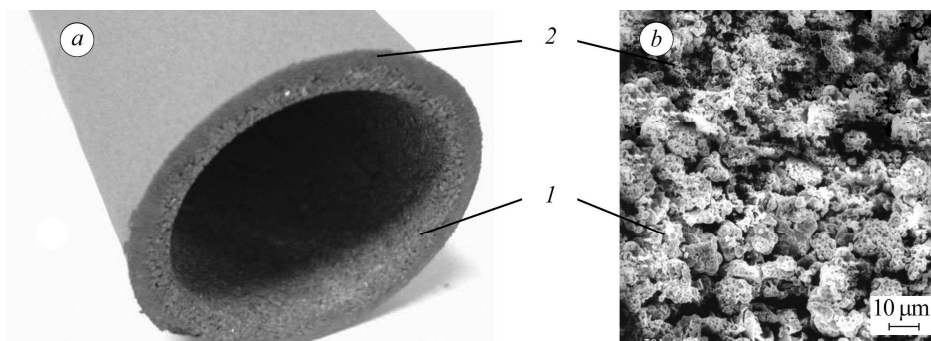


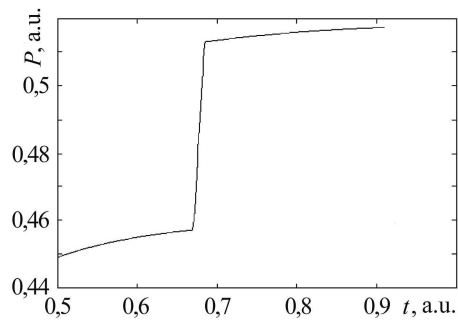
Рис. 2. Двошаровий фільтрувальний ППМ $\varnothing 40 \times 220$ mm (a) та його структура (b):
1 – перший шар ($-0,2 + 0,16$) mm; 2 – другий шар ($-0,16 + 0,1$) mm.

Fig. 2. Two-layer filtering PPM $\varnothing 40 \times 220$ mm (a) and its structure (b):
1 – first layer ($-0.2 + 0.16$) mm; 2 – second layer ($-0.16 + 0.1$) mm.

Моделювали пористу структуру двошарового ППМ з порошку сталі ШХ15 за допомогою прикладних програм MatLab. Розробили програмне забезпечення на мові програмування C++ [12, 13], що і дало змогу змодельовати радіально-ізостатичне пресування зі заданою пористістю ППМ. Оскільки ППМ має форму витягнутого кругового циліндра (рис. 2), то моделювали за діаметра оправки 40 mm та діаметра армованої еластичної оболонки 80 mm. Розподіл пористості, визначений за результатами розрахунків, показаний на рис. 3.

Рис. 3. Розподіл пористості (P) за певний період часу t за моделювання радіально-ізостатичного пресування двошарового ППМ.

Fig. 3. Dependence of porosity P in a certain period of time t in the simulation of radial-isostatic pressing of two-layer PPM.



За ущільнення одношарового фільтра розподіл пористості нерівномірний (рис. 4a). Зі збільшенням радіуса пористість зростає. З підвищенням ступеня деформації різниця між пористістю матеріалу у внутрішній і зовнішній поверхнях фільтра зменшується.

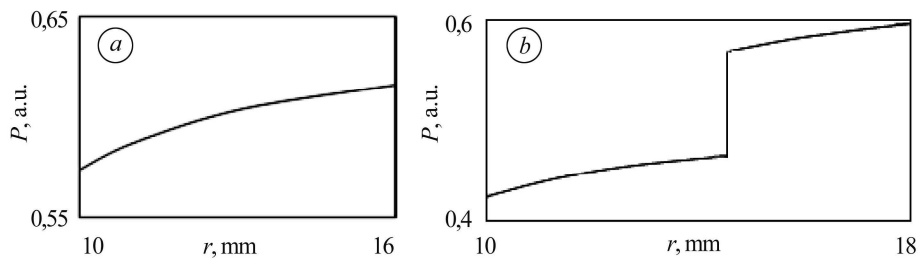


Рис. 4. Розподіл пористості P за радіусом r в одношаровому (a) та двошаровому (b) ППМ.

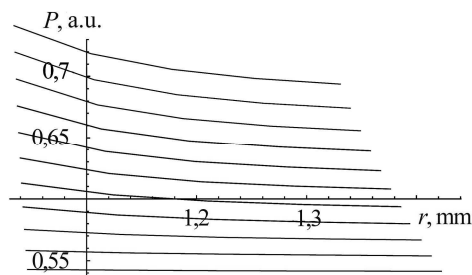
Fig. 4. Distribution of porosity P by radius r in single-layer (a) and double-layer (b) PPM.

Ущільнення другого (зовнішнього) шару відбувається так само, як і першого шару. При цьому щільніший внутрішній шар деформується несуттєво та виконує роль оправки. Подальше збільшення навантаження призводить до того, що настає момент, коли зовнішній шар ущільнився і обидва шари деформуються одночасно.

Моделювання підтвердило нерівномірність розподілу пористості і якісно відповідає розрахунковим результатам (рис. 5).

Рис. 5. Розподіл пористості P за радіусом r у багатошаровому (N -шарів) ППМ у різний момент часу ущільнення.

Fig. 5. Porosity distribution P over radius r in multilayer (N -layers) PPM at different time of compaction.



ВИСНОВКИ

Методом математичного планування розроблено математичну модель отримання багатошарових фільтрувальних ППМ зі змінною пористістю за допомогою пошарового формування металічного порошку з пороутворювачем, що дало змогу визначити оптимальну структуру фільтрувального матеріалу та режими для отримання матеріалів зі заданими експлуатаційними характеристиками. За теоретичними та експериментальними результатами встановлені функціональні залежності експлуатаційних характеристик ППМ, які отримані методом пошарового

пресування, від кількості шарів порошку з пороутворювачем, а також від кількості пороутворювача у кожному шарі та їх товщини, розмірів частинок забруднювача та його концентрації. Розроблений метод математичного моделювання дав змогу не тільки визначити розподіл пористості та інші характеристики порошкового проникного матеріалу, але й встановити оптимальний взаємозв'язок між технологічним режимом його отримання і експлуатаційними характеристиками.

SUMMARY. A mathematical model of the process of obtaining multilayer filtering PPM with variable porosity by dry radial-isostatic pressing of SHX15 powder with a pore former was developed. The density distribution along the radius of hollow PPM, obtained by radial-isostatic pressing was analyzed and calculated. In the theoretical calculations the result was obtained, which allowed us to analyze the factors that contribute to the heterogeneity of the porosity distribution in the PPM. It was established and confirmed by computer simulations that the distribution of the porosity value was uneven when pressing a cylindrical PPM. It was found that the porosity increased with the increase of the radius.

Keywords: porous material, radial-isostatic pressing, mathematical modeling, industrial waste.

1. Реут О. П., Богинский Л. С., Петюшик Е. Е. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов. – Минск: Высшая школа, 1998. – 258 с.
2. Технології, структура, властивості пористих проникних матеріалів / В. Д. Рудь, О. Ю. Повстяной, О. В. Заболотний, Л. С. Богінський. – Луцьк: Вежа, 2016. – 200 с.
3. Pilinevich L. Effect of Vibration Parameters on a Formation Process and Properties of porous Powder Materials // Proceeding of the 1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition Granada, Spain. – 1998. – 5. – P. 231–234.
4. Some features of flow and particle transport in porous structures / M. Aydin, G. Balik, A. F. Miguel, A. H. Reis // J. Mech. Engng. – 2005. – № 51. – P. 495–500.
5. Large-scale blow spinning of heat-resistant nanofibrous air filters / Z. Li, J. Song, Y. Long et al. // Nano Res. – 2020. – № 2. – P. 45–54.
6. Chern M. and Vaziri N. Effect of porous media on hydraulic jump characteristics by using smooth particle hydrodynamics method // Int. J. Civ. Eng. – 2020. – № 18. – P. 367–379.
7. Патент України № 63558 А МПК 7 В22F9/04. Спосіб отримання металевого порошку з шламових відходів підшипникового виробництва / В. Д. Рудь, Т. Н. Гальчук, О. Ю. Повстяной. – Опубл. 15.01.2004; Бюл. № 1.
8. Виготовлення поруватих матеріалів із використанням енергозберігальної технології / О. Ю. Повстяной, В. Д. Рудь, Л. М. Самчук, Н. Т. Зубовецька // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – 51, № 6. – С. 87–92.
(Production of porous materials with the use of energy-saving technologies / O. Yu. Povstyanoi, V. D. Rud', L. M. Samchuk, N. T. Zubovets'ka // Materials Science. – 2016. – 51, № 6. – P. 847–853.)
9. Витязь П. А., Капцевич В. М., Кусин Р. А. Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления: монография. – Минск: НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.
10. Повстяной О. Ю. Удосконалення технології виготовлення пористих порошкових матеріалів з використанням відходів промислового виробництва: Дис. канд. техн. наук. – Луцьк, 2007. – 169 с.
11. Настенко С. А., Павлов С. А. Багатокритеріальний алгоритм покрової регресії // Кібернетика та обчислювальна техніка. – 2015. – № 179. – С. 45–56.
12. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68842. Комп'ютерна програма "Моделювання пресування багатшарових фільтрів (Фільтр N)" / О. Ю. Повстяной, А. В. Кузьмов. – 29.11.2016 р.
13. Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties / O. Povstyanoi, O. Zabolotnyi, V. Rud, A. Kuzmov, N. Herasymchuk // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham: Springer, 2020. – P. 456–465. doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_46.

Одержано 14.01.2020