

УДК 621.762

О. Ю. Повстяной<sup>1</sup>, А. О. Михайлов<sup>2</sup>, В. Д. Рудь<sup>1</sup>, О. В. Михайлов<sup>3</sup>  
Луцький національний технічний університет<sup>1</sup>,  
Національний інститут харчових технологій<sup>2</sup>,  
Інститут проблем матеріалознавства НАН України<sup>3</sup>

## МОДЕЛЮВАННЯ УЩІЛНЕННЯ ПОРОШКОВОГО ФІЛЬТРУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА СКЛАДНОЇ ФОРМИ ПРИ РАДІАЛЬНО-ІЗОСТАТИЧНОМУ ПРЕСУВАННІ

**О. Ю. Повстяной, А. О. Михайлов, В. Д. Рудь, О. В. Михайлов. Моделирование уплотнения порошкового фильтрующего элемента сложной формы при радиально-изостатическом прессовании.** Проведено моделювання процесу радіально-ізостатичного пресування фільтруючого елемента складної форми у вигляді колби, отриманого з порошку сталі ШХ15. Встановлено, що розподіл величин пористості і накопиченої пластичної деформації за об'ємом виробу нерівномірно і залежить від схеми ущільнення. При радіальному пресуванні більш інтенсивно ущільнюється матеріал стінки, а при осьовому пресуванні - матеріал дна фільтра. Застосування схеми пресування, при якій порошок спочатку ущільнюють в радіальному, а потім в осьовому напрямку, дозволяє отримати більш рівномірний розподіл властивостей. Зі збільшенням радіуса величина пористості стінки і дна фільтра зростає.

**Ключові слова:** радіально-ізостатичне пресування, пористий проникливий матеріал, фільтр, розподіл щільності, пористість

**А. Ю. Повстяной, А. О. Михайлов, В. Д. Рудь, О. В. Михайлов. Моделирование уплотнения порошкового фильтрующего элемента сложной формы при радиально-изостатическом прессовании.** Проведено моделювання процесу радіально-ізостатичного пресування фільтруючого елемента складної форми в формі колби, отриманого з порошка сталі ШХ15. Установлено, що розподіл величин пористості і накопленої пластичної деформації по об'єму изделия нерівномірно і залежить від схеми ущільнення. При радіальному пресуванні більш інтенсивно ущільнюється матеріал стінки, а при осьовому пресуванні - матеріал дна фільтра. Застосування схеми пресування, при якій порошок спочатку ущільнюють в радіальному, а потім в осьовому напрямку, дозволяє отримати більш рівномірний розподіл властивостей. С збільшенням радіуса величина пористості стінки і дна фільтра зростає.

**Ключевые слова:** радиально-изостатическое прессование, пористый проницаемый материал, фильтр, распределение плотности, пористость

The simulation of the process of radial isostatic pressing of a complex-shaped filtering element in the form of a flask obtained from powder of BBS15 steel was carried out. It is established that the distribution of porosity and accumulated plastic deformation over the product volume is uneven and depends on the compaction scheme. The wall material is compacted more intensively by radial pressing, and the bottom of the filter material is compacted more intensively by axial pressing. The use of a pressing scheme in which the powder is first compacted in the radial and then in the axial direction allows to obtain more even distribution of properties. As the radius increases, the porosity of the wall and the bottom of the filter increases.

**Keywords:** radial isostatic pressing, porous permeable material, filter, density distribution, porosity

**Вступ.** Порошкова металургія кожним новим розробленим технологічним процесом демонструє переваги, які дозволяють отримувати матеріали з кращими або зовсім новими властивостями, виготовляти вироби найбільш економічно вигідним способом. До таких виробів відносять пористі проникні матеріали (ППМ).

Пористі проникні матеріали широко застосовуються в різних галузях сучасної промисловості [1-3]. Зокрема, вони використовуються в якості фільтрів, що забезпечують очищення рідин і газів.

Перспективним методом отримання фільтруючих елементів є радіально-ізостатичне пресування порошків [4-6]. Форма одержуваних фільтруючих елементів може бути як простою, так і складною (рис.1).

Технологічні параметри процесу пресування визначають розміри, форму, а також розподіл властивостей за об'ємом виробів, що, в свою чергу, впливає на експлуатаційні властивості фільтрів.

Вибір оптимальних параметрів процесу пресування є складним завданням. Тому поряд з традиційними методами досліджень, в даний час все більш широко застосовується метод попереднього комп'ютерного моделювання. Це стало можливим завдяки істотному прогресу в розумінні основних особливостей поведінки порошкових матеріалів в процесі їх ущільнення, створення відповідних математичних моделей.

Як свідчить вітчизняний та світовий досвід останніх десятиріч, успіх розв'язання проблем, що при цьому виникають, вимірюється якістю та ступенем прогнозування процесів та явищ, які супроводжують ці технології. Підвищити ефективність традиційних технологій, а також ввести безвідходне виробництво виробів широкого цільового призначення, зберігати енергію, скорочувати трудові затрати та контролювати параметри структури порошкових проникних матеріалів у процесі їх виготовлення можливо за допомогою прогнозування з використанням сучасних засобів моделювання.

Важливе місце також займають модельні експерименти прогнозування залежностей властивостей пористих матеріалів від технологічних параметрів отримання виробів з використанням аналітичних, числових та числово-аналітичних.

Розробка та виробництво нових пористих проникних матеріалів є важливим завданням, яке значно виграє від використання засобів автоматизованого інжинірингу. Зі збільшення обчислювальної потужності, багатовимірне комп'ютерне моделювання стає все потужнішим та актуальнішим.

Найбільш поширеним методом моделювання деформаційної обробки порошкових пористих матеріалів є метод скінченних елементів.

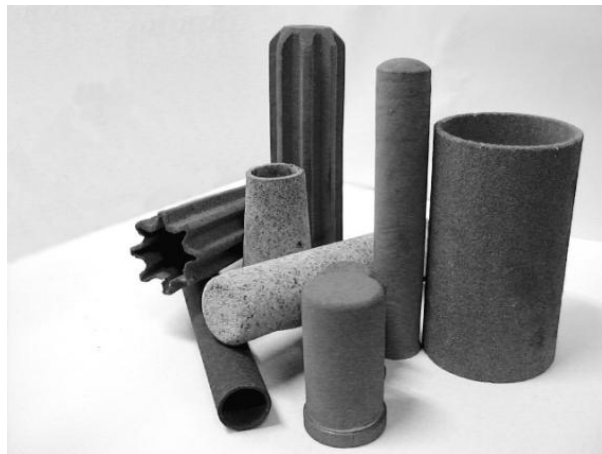


Рис.1. Пористі порошкові фільтри простої і складної форми

Комп'ютерне моделювання поведінки фільтруючих елементів, що ущільнюються, при радіально-ізостатичному пресуванні, встановлення закономірностей зміни форми елемента, розподілу пористості та інших параметрів, що визначають експлуатаційні властивості, є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний момент є ряд публікацій, в яких проведені експериментальні [6, 7] і теоретичні дослідження [8] за визначенням розподілу пористості в фільтрах, форма яких являє собою порожнистий циліндр. У той же час, закономірності ущільнення порошкових фільтруючих елементів складної форми не досліджені.

Аналіз літературних даних [9, 10], показує, що перспективними методами отримання ППМ, є методи, які направлені на створення ППМ з анізотропною структурою, у яких розміри та кількість пор змінюються в напрямку фільтрації. У таких ППМ тонкість фільтрації буде визначатися шаром з мінімальним розміром пор, проникливістю є інтегральна величина, яка визначається пористою структурою всього матеріалу, а забруднювач у процесі фільтрування розподіляється по всьому об'єму фільтруючого елемента, що дозволяє збільшити ресурс роботи фільтру.

Фільтруючі ППМ у вигляді тіл обертання (труби, диски, колби тощо) отримують все більше розповсюдження у різних галузях техніки, так як вони володіють високою технологічністю конструкції. Основні вимоги, які висуваються до геометрії таких виробів, є забезпечення точності зовнішніх та внутрішніх розмірів.

Широко використовувані такі ППМ характеризуються досить високою технологічністю виготовлення. Розміри і форма таких виробів визначаються габаритами пристроїв, складовою частиною яких вони є. Збільшення продуктивності цих пристроїв зі збереженням габаритів дозволяє значно підвищити ефективність їх використання.

**Мета роботи** - дослідження методом комп'ютерного моделювання впливу схеми радіально-ізостатичного пресування на закономірності ущільнення і формозміни фільтруючого елемента, що має складну форму у вигляді колби.

**Результати моделювання.** Моделювання виконано на основі континуального підходу. В якості визначальних співвідношень використовували співвідношення теорії пластичності пористого тіла [11]. Визначення форми заготовки, що ущільнюється, а також полів щільності, напруг і деформацій виконано на основі методу скінченних елементів [12].

Розглядалися дві схеми ущільнення: радіальне (рис.2, а) та осьове (рис.2, б). Матеріал порошку, що ущільнюється – порошок сталі ШХ15. Початкова пористість фільтруючого елемента дорівнювала

0,7. Ущільнення відбувалося на оправку під впливом еластичного середовища, матеріал якого - поліуретан.

У зв'язку з симетрією при моделюванні розглядали половину осьового перерізу. Вважали, що оправка нерухома. Також вважали, що при радіальному ущільненні нерухома кришка (3 на рис.2), а при осьовому ущільненні нерухома стінка (4 на рис.2).

Поверхня поліуретану, на яку здійснювалося силове навантаження, переміщалася з постійною швидкістю в радіальному (радіальне ущільнення), або в осьовому (осьове ущільнення) напрямку.

На рис.3 приведені результати по розподілу пористості (рис.3, а) та величини накопиченої пластичної деформації (рис.3, б).

У початковий момент відбувається ущільнення стінки фільтруючого елемента. Розподіл пористості по радіусу стінки фільтра нерівномірний. Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Отриманий результат відповідає даним, наведеним в роботах [5-7]. Розподіл величини накопиченої пластичної деформації також нерівномірний. Максимальна величина накопиченої деформації - у внутрішній поверхні стінки фільтра, мінімальна - у зовнішній поверхні.

При подальшому пресуванні відбувається збільшення відносної щільності стінки і поширення процесу ущільнення на дно фільтруючого елемента. Проте, як видно з рис.3, у кінці процесу пресування величина пористості в області дна фільтра значно вище, ніж в області стінки. Характер зміни пористості по радіусу стінки залишається таким же, як на початку пресування. Розподіл пористості по висоті стінки нерівномірний: у нижній і верхній частині (рис.3, а) пористість вище.

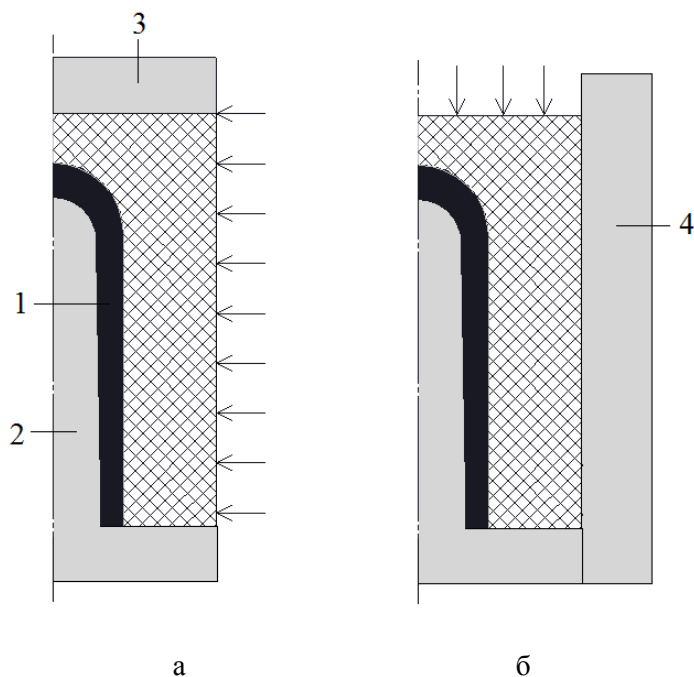


Рис. 2. Схеми радіального (а) та осьового (б) ущільнення:

1 - порошок, що ущільнюється, 2 - оправка, 3 - кришка, 4 - стінка

Величина накопиченої пластичної деформації розподілена за об'ємом фільтра аналогічно розподілу відносної щільності. В області дна фільтруючого елемента вона нижче.

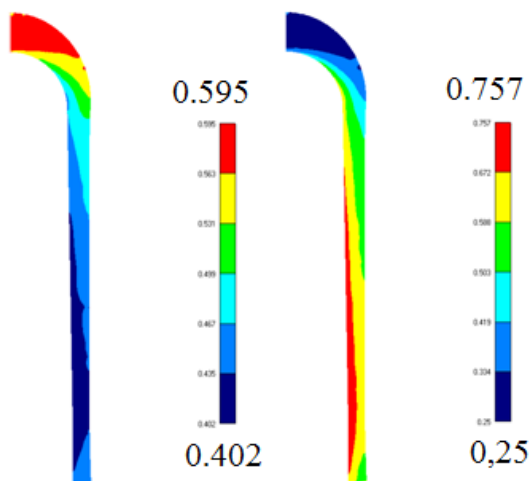
На рис.4 представлений розподіл пористості і накопиченої пластичної деформації при осьовому ущільненні. Найбільш інтенсивно порошок ущільнюється в області дна фільтра. Розподіл пористості по радіусу дна нерівномірний (рис.4, а). Зі збільшенням радіуса пористість зростає.

Ущільнення порошку в області стінки відбувається в меншому ступені. У внутрішній поверхні стінки пористість нижче, а у зовнішній - вище. Величина накопиченої пластичної деформації вище в області внутрішньої поверхні стінки.

Таким чином, як при радіальному, так і при осьовому ущільненні порошку розподіл величин пористості та накопиченої пластичної деформації нерівномірний. У першому випадку менш інтенсивно ущільнюється дно, а в другому - стінка фільтра.

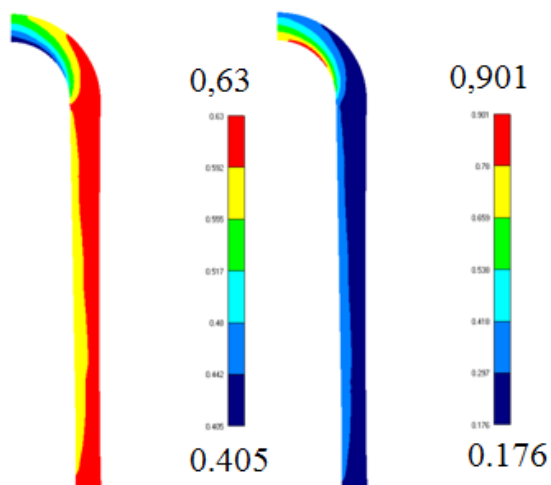
У зв'язку з цим була розглянута схема ущільнення, при якій порошок спочатку ущільнювали в радіальному, а потім в осьовому напрямку. Результати моделювання представлені на рис.5.

На першому етапі більш інтенсивно ущільнюється стінка, а на другому етапі - дно фільтруючого елемента. В результаті величини пористості та накопиченої пластичної деформації розподілені більш рівномірно.



а б

Рис. 3. Розподіл пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при радіальному ущільненні



а б

Рис. 4. Розподіл пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при осьовому ущільненні

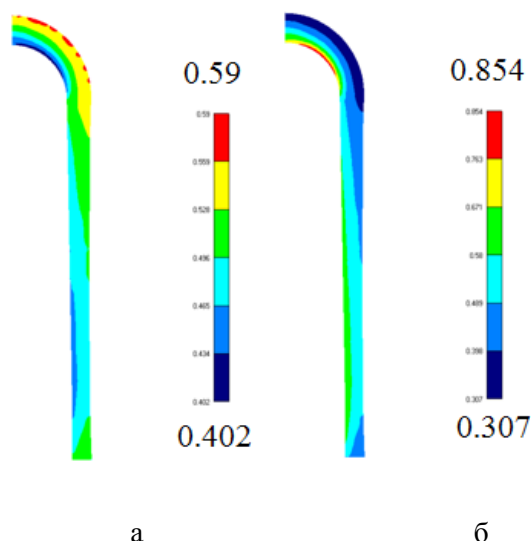


Рис. 5. Розподіл пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при радіальному та осьовому ущільненні

**Висновки.** При радіально-ізостатичному пресуванні порошкового фільтруючого елемента у вигляді колби розподіл величин пористості та накопиченої пластичної деформації за об'ємом виробу нерівномірний і залежить від схеми ущільнення.

При радіальному застосуванні навантаження відбувається більш інтенсивне ущільнення матеріалу в області стінки фільтра. Дно фільтра ущільнюється меншою мірою.

У разі застосування схеми осьового ущільнення спостерігається більш інтенсивне ущільнення дна фільтра. Стінка фільтра при цьому також ущільнюється, але менш інтенсивно.

Застосування схеми, при якій порошок спочатку ущільнюється в радіальному, а потім в осьовому напрямку, дозволяє отримати більш рівномірний розподіл пористості та накопиченої пластичної деформації.

Зі збільшенням радіуса величина пористості стінки і дна фільтра зростає, а величина накопиченої пластичної деформації зменшується.

#### Список бібліографічних посилань

1. Пористые проницаемые материалы: справочник / [ред. Белов С.В., Витязь П.А., Шелег В.К. и др.] / – М.: Металлургия, 1987. – 332 с.
2. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении [2-е изд., перераб. и доп.] / Белов С.В. / – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
3. Витязь П.А. Пористые порошковые материалы и изделия из них / Витязь П.А., Капцевич В.М., Шелег В.К. – Минск.: Вышэйшая школа, 1987. – 161 с.
4. Технології, структура, властивості пористих проникних матеріалів: / Монографія. / Рудь В. Д., Повстяной О. Ю., Заболотний О. В., Богінський Л. С. / Луцьк: РВВ ЛНТУ. – 2016. – 200с.
5. Заболотний О.В. Розвиток процесів ізостатичного пресування ущільнювальних порошкових середовищ / Заболотний О.В., Повстяной О.Ю., Рудь В.Д. // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2001. – Випуск 9. – С. 152-156
6. Повстяной О. Ю. Удосконалення технології виготовлення пористих порошкових матеріалів з використанням відходів промислового виробництва: дис. ... канд. техн. наук. – Луцьк, 2007. – 170 с.
7. Oleksandr Povstyanoy, Oleg Zabolotnyi, Victor Rud, Andriy Kuzmov, Halyna Herasymchuk: Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. In: Ivanov V. et al. (eds.) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 456-465. Springer, Cham (2019), doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\_46.
8. Повстяной О. Ю. Визначення розподілу густини пористого проникного циліндра за радіусом при радіально - ізостатичному пресуванні / О. Ю. Повстяной, В. Д. Рудь // Наукові нотатки. - 2016. - Вип. 54. - С. 246 – 252.
9. Мазюк В.В., Пилиневич Л.П., Рак А.Л. Влияние фактора формы частиц исходных порошков на регулярность пористой структуры ППМ // Порошковая металлургия. – Мн.: ИММС НАНБ, 1997. – Вып.20. – С. 46-48.
10. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник / [ ред. Федорченко И.М., Францевич И.Н., Радомысльский И.Д. и др.] – К.: Наук. думка, 1985. – 624 с.
11. Штерн М. Б. Модифицированные модели деформирования порошковых материалов на основе пластичных и труднодеформируемых порошков / О. В. Михайлов, М. Б. Штерн // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування. – 2011. – № 62. – С. 13–19.
12. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.