

## Моделювання ущільнення порошкових фільтруючих елементів під час радіально-ізостатичного пресування

О. Ю. Повстяной<sup>1</sup>, А. О. Михайлов<sup>2</sup>, В. Д. Рудь<sup>1</sup>, О. В. Михайлов<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет  
43018, Україна, Луцьк, вул. Львівська, 75

<sup>2</sup>Національний інститут харчових технологій  
01033, Україна, Київ, вул. Володимирська, 68

<sup>3</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України  
03142, Київ, вул. Кржижановського, 3

\*E-mail: olmi2012@bigmir.net

*Методом комп'ютерного моделювання досліджено процес радіально-ізостатичного пресування фільтруючих елементів з порошку сталі ШХ15. Розглянуто закономірності ущільнення виробів двох типів: пустотілих циліндрів, в тому числі багат шарових, і фільтрів складної форми у вигляді колби. Встановлено, що після пресування фільтруючих елементів циліндричної форми розподіл пористості нерівномірний. Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Під час виготовлення фільтрів складної форми у вигляді колби розподіл пористості залежить від схеми ущільнення: радіальним пресуванням більш інтенсивно ущільнюється матеріал стінки, а осьовим — матеріал дна фільтра. Застосування схеми формування, за якої порошок спочатку ущільнюють в радіальному, а потім в осьовому напрямку, дозволяє отримати більш рівномірний розподіл пористості.*

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

### Вступ

Одним із важливих напрямків порошкової металургії є створення пористих проникних матеріалів (ППМ), працездатність та область застосування яких визначається наявністю взаємозв'язаної структури пор. Ці матеріали широко використовуються в різних галузях сучасної промисловості [1—3], зокрема як фільтри, що забезпечують очищення рідин і газів.

Перспективним методом отримання фільтруючих елементів є радіально-ізостатичне пресування порошків [4—6]. Метод дозволяє виготовляти довгомірні вироби простої та складної форм (рис. 1) з рівномірним розподілом пористості. Ущільнення порошку відбувається під впливом еластичного елемента, що дозволяє ефективно механізувати та автоматизувати процес, підвищити культуру виробництва, зменшити енерговитрати тощо. Малі об'єми проміжних середовищ дозволяють зменшити металоємність, габарити і вартість обладнання порівняно з іншими видами пресування.

Методом радіально-ізостатичного пресування отримують також багат шарові фільтри, пористість шарів яких відрізняється. Завдяки наявності змінної пористості має місце більш рівномірний розподіл забруднювача по об'єму у порівнянні з одношаровими фільтруючими елементами, що дозволяє збільшити ресурс роботи фільтра. Ефективність очищення також підвищується [7, 8].

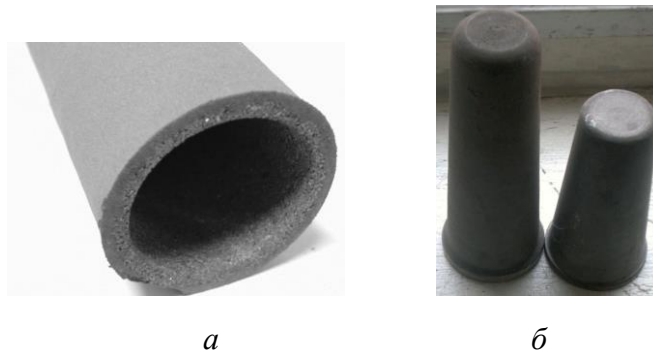


Рис. 1. Пористі порошкові фільтри циліндричної форми (а) та у вигляді колби (б).

Під час пресування багатошарових фільтрів навантаження знімається після ущільнення кожного шару. У порожнину між отриманим шаром і еластичним елементом, що прийняв первісну форму, засипається новий порошок, далі процес пресування триває. Для розширення асортименту фільтруючих пористих порошкових виробів, економії сировини та витрат на виробництво суцільний еластичний вкладиш можна виготовляти у вигляді набору вкладишів один в одному. Це дає змогу керувати товщиною шарів і отримувати вироби з більш широким діапазоном розмірів, а також дозволяє покращити технологічність та культуру пресування.

Технологічні параметри процесу пресування визначають розміри, форму і розподіл властивостей за об'ємом виробів, що, в свою чергу, впливає на експлуатаційні властивості фільтрів. Вибір оптимальних параметрів технологічного 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 суттєвому прогресу в розумінні основних особливостей поведінки порошкових матеріалів в процесі їх ущільнення, створення відповідних математичних моделей. Розвиток засобів обчислювальної техніки та чисельних методів дозволив проводити комп'ютерне моделювання складних технологічних процесів.

Комп'ютерне моделювання поведінки фільтруючих елементів, що ущільнюються, під час ізостатичного пресування, встановлення закономірностей зміни форми елемента та розподілу пористості за його об'ємом є актуальною проблемою.

#### **Методика моделювання**

У даній роботі об'єм тіла, що деформується, розглядається як суцільне, безперервне середовище. Для опису поведінки цього середовища використовуються співвідношення теорії пластичності пористого тіла [9] та метод скінченних елементів [10].

#### **Мета роботи та результати моделювання**

Методом комп'ютерного моделювання досліджено процес радіально-ізостатичного пресування фільтруючих елементів. Розглянуто закономірності ущільнення виробів двох типів: пустотілих циліндрів, в тому числі багатошарових, та фільтрів складної форми у вигляді колби.

Матеріал фільтруючих елементів — сталь ШХ15, матеріал еластичного елемента — поліуретан. У зв'язку з симетрією розглядали половину осового перерізу фільтра, що ущільнюється.

### *Пресування фільтруючих елементів, що мають циліндричну форму*

Схема пресування фільтра, що має форму пустотілого циліндра, наведена на рис. 2. Переміщення внутрішньої поверхні порошку в напрямку зменшення радіуса обмежено жорсткою оправкою. Зовнішня поверхня виробу переміщається в радіальному напрямку під впливом еластичного елемента. Під час моделювання вважали, що ця поверхня рухається з постійною швидкістю. На торцях циліндра переміщення в осовому напрямку вважали рівним нулю. Величина початкової пористості засипаного порошку була 0,8. Діаметр оправки дорівнював 20 мм.

Початковий зовнішній діаметр одношарового фільтруючого елемента (та внутрішній діаметр еластичного елемента) дорівнював 40 мм.

Розглядалося також ущільнення дво- і тришарових фільтрів. Для моделювання ущільнення двошарових порошкових фільтрів величина внутрішнього діаметра еластичного елемента дорівнювала також 40 мм. Внутрішній діаметр еластичного елемента під час пресування тришарового фільтра змінювався і підбирався для кожного шару окремо.

Результати моделювання по розподілу пористості по перерізу фільтруючих елементів наведені на рис. 3.

У процесі ущільнення одношарового фільтра розподіл пористості нерівномірний (рис. 3, а). Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Отриманий результат відповідає даним, наведеним в роботах [6, 11, 12]. По мірі збільшення ступеня деформації різниця між величинами пористості матеріалу у внутрішньої і зовнішньої поверхонь фільтра зменшується.

На рис. 3, б представлено розподіл пористості в двошаровому фільтрі. Ущільнення другого (зовнішнього) шару відбувається так само, як і першого. У цьому разі більш щільний внутрішній шар деформується незначно та виконує роль оправки. Подальше збільшення навантаження призводить до того, що настає момент, коли зовнішній шар ущільнився і обидва шари продовжують деформуватися одночасно.

Ущільнення шарів тришарового фільтра відбувається аналогічно (рис. 3, в). Товщиною і пористістю шарів можна управляти, змінюючи початкову пористість засипаного порошку, внутрішній діаметр еластичного елемента, а також тиск пресування.

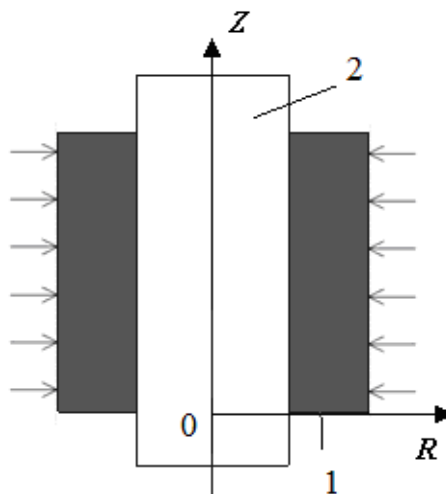


Рис. 2. Схема ущільнення фільтруючого елемента циліндричної форми: 1 — порошок, що ущільнюється; 2 — оправка.

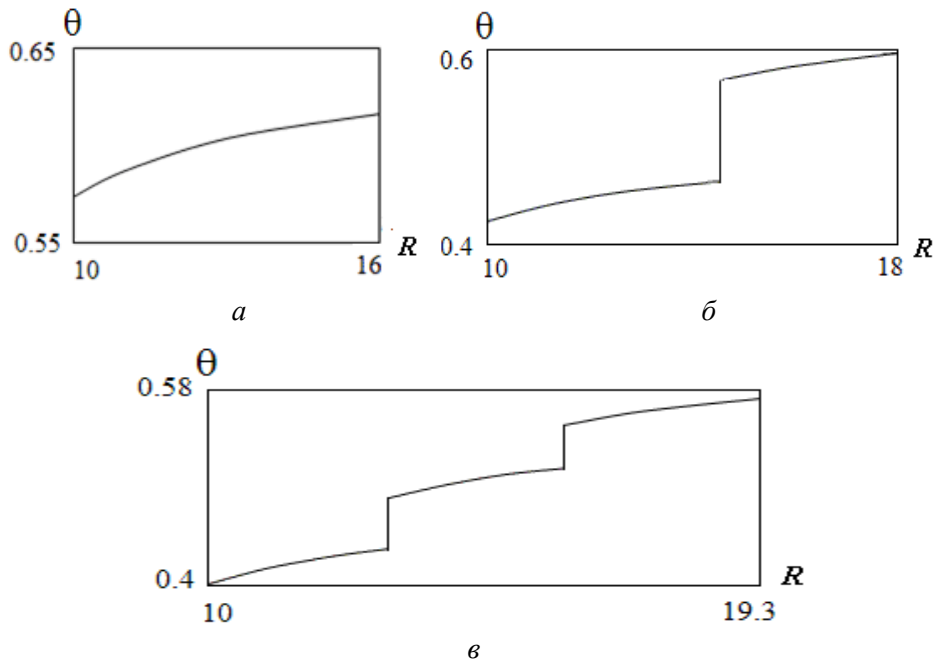


Рис. 3. Розподіл пористості  $\theta$  по радіусу (мм) в одно-, дво- та тришаровому ( $a$ — $в$  відповідно) фільтруючих елементах.

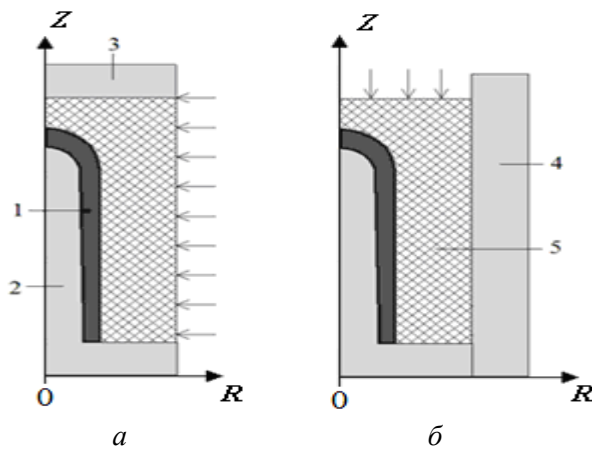


Рис. 4. Схеми радіального ( $a$ ) та осьового ( $б$ ) ущільнення фільтруючого елемента складної форми у вигляді колби: 1 — порошок, що ущільнюється; 2 — оправка; 3 — кришка; 4 — стінка; 5 — еластичний елемент.

### ***Пресування фільтруючих елементів складної форми у вигляді колби***

Розглядалися дві схеми ущільнення: радіальне та осьове (рис. 4). Початкова пористість фільтруючого елемента дорівнювала 0,7. Ущільнення відбувалося на оправку під впливом еластичного середовища. Вважали, що оправка нерухома. Також вважали, що в процесі радіального ущільнення нерухомою є кришка, а в процесі осьового — стінка (на рис. 4 — 3 та 4 відповідно).

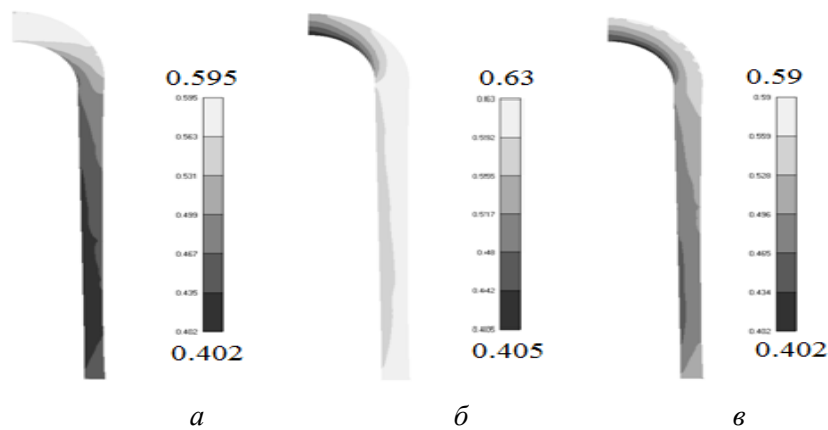


Рис. 5. Розподіл пористості після радіального (*а*), осьового (*б*) та радіально-осьового (*в*) ущільнення.

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

Результати моделювання по розподілу пористості по перерізу фільтруючих елементів у вигляді колби наведені на рис. 5. У початковий момент радіального навантаження відбувається ущільнення стінки фільтруючого елемента (рис. 5, *а*). Розподіл пористості по радіусу стінки фільтра нерівномірний. Зі збільшенням радіуса пористість зростає. З подальшим пресуванням відбувається зростання відносної щільності стінки і поширення процесу ущільнення на дно фільтруючого елемента. Проте, як видно на рисунку, у кінці процесу пресування пористість в області дна фільтра значно вище, ніж в області стінки. Характер зміни пористості по радіусу стінки залишається таким самим, як на початку пресування. Розподіл пористості по висоті стінки нерівномірний: у нижній і верхній частинах пористість вище.

На рис. 5, *б* представлено розподіл пористості в процесі осьового навантаження. Найбільш інтенсивно порошок ущільнюється в області дна фільтра. Розподіл пористості по радіусу дна нерівномірний. Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Ущільнення порошку в області стінки відбувається в меншому ступені. Біля внутрішньої поверхні стінки пористість нижче, а біля зовнішньої — вище.

Таким чином, як після радіального, так і після осьового ущільнення порошку розподіл пористості нерівномірний. У першому випадку менш інтенсивно ущільнюється дно, а в другому — стінка фільтра. У зв'язку з цим була розглянута схема ущільнення, згідно з якою порошок спочатку ущільнювали в радіальному, а потім в осьовому напрямках. Результати моделювання за цією схемою представлені на рис. 5, *в*. На першому етапі більш інтенсивно ущільнюється стінка, а на другому — дно фільтруючого елемента. Тому величина пористості розподілена більш рівномірно.

### Висновки

Після радіально-ізостатичного пресування порошкового фільтруючого елемента циліндричної форми розподіл пористості нерівномірний. Зі збільшенням радіуса величина пористості зростає.

Після пресування порошкового фільтра у вигляді колби розподіл пористості за об'ємом виробу нерівномірний і залежить від схеми ущільнення.

Застосування радіального навантаження сприяє більш інтенсивному ущільненню матеріалу в області стінки фільтра. Дно фільтра ущільнюється меншою мірою.

У разі схеми осевого навантаження спостерігається більш інтенсивне ущільнення дна фільтра. Стінка фільтра у цьому випадку також ущільнюється, але менш інтенсивно.

Використання схеми, за якої порошок спочатку ущільнюється в радіальному, а потім в осевому напрямках, дозволяє отримати більш рівномірний розподіл пористості.

Зі збільшенням радіуса величина пористості стінки і дна фільтра зростає.

### Список літератури

1. Белов С.В., Витязь П.А., Шелег В.К. *Пористые проникаемые материалы*: (Справ.). Москва, 1987. 332 с.
2. Белов С.В. *Пористые металлы в машиностроении*. Москва, 1981. 247 с.
3. Витязь П.А., Капцевич В.М., Шелег В.К. *Пористые порошковые материалы и изделия из них*. Минск, 1987. 161 с.
4. Рудь В.Д., Повстяной О.Ю., Заболотный О.В., Богінський Л.С. *Технології, структура, властивості пористих проникних матеріалів*: (Монографія). Луцьк, 2016. 200 с.
5. Заболотный О.В., Повстяной О.Ю., Рудь В.Д. Развитие процессов изостатического пресования уплотняющих порошковых средовищ. *Наукові нотатки*. Луцьк: ЛДТУ. 2001. □ Вип. 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. Мазюк В.В., Пилиневич Л.П., Рак А.Л. Влияние фактора формы частиц исходных порошков на регулярность пористой структуры ППМ. *Порошковая металлургия*. Минск: ИММС НАНБ. 1997. Вып. 20. С. 46—48.
8. Федорченко И.М., Францевич И.Н., Радомысльский И.Д., Ковальченко М.С., Кислый П.С., Косолапова Т.Я., Май В.К., Щербань Н.И. *Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения*: (Справ.). К., 1985. 624 с.
9. Штерн М.Б., Михайлов О.В. Модифицированные модели деформирования порошковых материалов на основе пластичных и труднодеформируемых порошков. *Вісник національного технічного ун-ту України "Київський політехнічний інститут"*. Серія: Машинобудування. 2011. № 62. С. 13—19.
10. Зенкевич О. *Метод конечных элементов в технике*. Москва, 1975. 541 с.
11. Povstyanou Oleksandr, Zabolotnyi Oleg, Rud Victor. Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. *Adv. Design, Simulation Manufacturing, DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. P. 456–465. Springer, Cham (2019): doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\_46.
12. Повстяной О.Ю., Рудь В.Д. Визначення розподілу густини пористого проникного циліндра за радіусом при радіально-ізостатичному пресуванні. *Наукові нотатки*. 2016. Вип. 54. С. 246—252.

### References

1. Belov S.V., Vityaz' P.A., Sheleg V.K. *Poristyie pronitsayemyye materialy*: (Sprav.). [Porous Permeable Materials (a handbook)]. Moscow, 1987. 332 p. [in Russian].
2. Belov S.V. *Poristyie metally v mashinostroyenii* [Porous metals in mechanical engineering]. Moscow, 1981. 247 p. [in Russian].
3. Vityaz' P.A., Kaptsevich V.M., Sheleg V.K. *Poristyie poroshkovyye materialy i izdeliya iz nikh* [Porous powder materials and products from them]. Minsk, 1987. 161 p. [in Russian].
4. Rud V.D., Povstianoi O.Iu., Zabolotnyi O.V., Bohinskyi L.S. *Tekhnolohii, struktura, vlastyivosti porystykh pronyknykh materialiv*: (Monohrafiia) [Technologies, structure, properties of porous permeable materials: (Monograph)]. Lutsk, 2016. 200 p. [in Ukrainian].

5. Zabolotnyi O.V., Povstianoi O.Iu., Rud V.D. Rozvytok protsesiv izostatychnoho presuvannia ushchilniuvalnykh poroshkovykh seredovyshch [Development of processes of isostatic pressing of compacted powder media]. *Naukovi notatky*. Lutsk: LDTU. 2001. Issue 9. P. 152—156 [in Ukrainian].
6. Povstianoi O.Iu. *Udoskonalennia tekhnologii vyhotovlennia porystykh poroshkovykh materialiv z vykorystanniam vidkhodiv promyslovoho vyrobnytstva: dys. ... kand. tekhn. nauk [Improving the technology of manufacturing porous powder materials using industrial waste]*. Lutsk, 2007. 170 p. [in Ukrainian].
7. Mazyuk V.V., Pilinevich L.P., Rak A.L. Vliyaniye faktora formy chastits iskhodnykh poroshkov na regulyarnost' poristoy struktury PPM [Influence of the particle shape factor of the initial powders on the regularity of the porous structure of PPM (permeable powder materials)]. *Poroshkovaya metallurgiya*. Mn.: IMMS NANB. 1997. Issue 20. P. 46—48 [in Russian].
8. Fedorchenko I.M., Frantsevich I.N., Radomyseľskiy I.D. *Poroshkovaya metallurgiya: (Sprav.). Materialy, tekhnologiya, svoystva, oblasti primeneniya [Powder metallurgy. Materials, technology, properties, fields of application (a handbook)]*. Kyiv, 1985. 624 p. [in Russian].
9. Shtern M.B., Mikhailov O.V. Modifitsirovannyye modeli deformirovaniya poroshkovykh materialov na osnove plastichnykh i trudnodeformiruyemykh poroshkov [Modified models of deformation of powder materials based on plastic and hard-to-deform powders]. *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho in-tu Ukrainy "Kyivskyi politekhnichnyi instytut"*. Seriya: Mashynobuduvannia. 2011. № 62. P. 13—19 [in Russian].
10. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike [Finite element method in engineering science]*. M., 1975. 541 p. [in Russian].
11. Povstyanoy Oleksandr, Zabolotnyi Oleg, Rud Victor. Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. *Adv. Design, Simulation Manufacturing, DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. P. 456—465. Springer, Cham (2019): doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\_46.
12. Povstianoi O.Iu., Rud V.D. Vyznachennia rozpodilu hustyny porystoho pronyknoho tsylindra za radiusom pry radialno-izostatychnomu presuvanni [Determination of the density distribution of a porous permeable cylinder by radius during radial-isostatic pressing]. *Naukovi notatky*. 2016. Issue 54. P. 246—252 [in Ukrainian].

### **Modeling of the compaction of powder filter elements during radial isostatic pressing**

O. Y. Povstyanoy, A. O. Mikhailov, V. D. Rud, O. V. Mikhailov

*The method of computer simulation was used to study the process of radially isostatic pressing of filter elements made of steel powder BBS15. Powder compaction occurs under the influence of an elastic element made of polyurethane. The volume of the deformable body is considered as a continuous medium. To describe the behavior of this medium, the relations of the theory of plasticity of a porous body and the finite element method are used. The patterns of compaction of products of two types are considered (hollow cylinders, including multilayer ones, and filters of complex shape in the form of a bulb). When pressing multilayer filters, the load was removed after compaction of each layer. A new powder was placed in the cavity between the obtained layer and the elastic element, which took its original shape. Further, the pressing process was continued. The porosity distribution in the case of compaction of a single-layer cylindrical filter is uneven. The value of porosity increases with increasing radius. As the degree of deformation increases, the difference between the porosity of the material at the inner and outer surfaces of the filter decreases. The compaction of the outer layer of the two-layer filter occurs in the same way as the preliminary compaction of the first (inner) layer. The denser inner layer deforms slightly and acts as a mandrel. Further, the outer layer is compacted and both layers are deformed. The compaction of the layers of a three-layer filter is similar. The thickness and porosity of the layers can be controlled by changing the initial porosity of the powder, the inner diameter of the elastic element, as well as the pressing load. Two compaction schemes (radial and axial) were considered in the manufacture of complex-shaped filters in the form of a bulb. The distribution of porosity is uneven and depends on the compaction scheme. The material of the filter wall is compacted more intensively in the case of radial pressing. The porosity is higher at the outer surface of the filter wall and lower at its inner surface. The bottom material of the filter is compacted more intensively in the case of axial pressing. The use of the pressing scheme, in which the powder is first compacted in the radial and then in the axial direction, allows to get a more uniform distribution of porosity.*

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