

## **Моделювання процесів виготовлення тонкостінних втулок з поруватих заготовок з використанням прямого видавлювання та радіального ущільнення**

А. О. Михайлов<sup>1</sup>, Є. В. Штефан<sup>2</sup>, О. В. Михайлов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України  
Україна, 03142, Київ, вул. Омеляна Пріцака, 3

\*E-mail: ol2016@i.ua

<sup>2</sup>Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”  
Україна, 03056, Київ, пр-т Берестейський, 37

*Методом комп'ютерного моделювання досліджено технологічні операції отримання тонкостінних порошкових втулок — пряме видавлювання та радіальне ущільнення. Використовували метод моделювання, що ґрунтується на континуальному підході, реологічної моделі пластичного деформування поруватого тіла та методі скінченних елементів. Визначено розподілення залишкової поруватості та накопичення пластичної деформації по об'єму матеріалу заготовки залежно від схеми деформування. Досліджено вплив протитиску при прямому видавлюванні. Визначено раціональну форму заготовки при радіальному ущільненні.*

**Ключові слова:** теорія пластичності, порошкові матеріали, комп'ютерне моделювання, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, розподіл поруватості.

### **Вступ**

Одним із прогресивних методів отримання нових матеріалів з високими фізико-механічними та технологічними властивостями є порошкова металургія. Порошкова металургія має ряд переваг, які дозволяють їй витіснити більш дорогі способи обробки металів: лиття, ковку та штампування, а також механічну обробку. Методи порошкової металургії постійно розвиваються, відбувається удосконалення традиційних схем та технологій одержання виробів.

Все більшого поширення набувають процеси деформування порошків та спечених пористих матеріалів. Наявність початкової поруватості вихідних заготовок дозволяє знизити необхідні навантаження, а також дає можливість деформувати матеріал у замкнутих об'ємах.

Широке застосування в обладнанні підприємств енергетичної, поліграфічної, харчової та інших галузей промисловості знаходять вироби типу тонкостінних втулок, товщина яких мала порівняно з діаметром. Їх отримання можливе методами прямого видавлювання та радіального ущільнення.

Метод прямого видавлювання дозволяє отримувати точні за розмірами та з високою чистотою поверхні вироби. Однак цей технологічний процес вимагає застосування більш високих зусиль деформування, що призводить до меншої стійкості інструменту [1].

Радіальне ущільнення [2] відноситься до методів локального деформування. Осередок деформації менший за частину заготовки, що

деформується, і постійно переміщується відносно її поверхні. Метод потребує менших зусиль і дозволяє використовувати менш потужне обладнання, але характеризується низькою продуктивністю.

Представляє інтерес порівняння кінетики деформованого стану заготовок для двох зазначених технологічних схем.

Ефективне застосування технологічних операцій виготовлення тонкостінних втулок неможливе без дослідження закономірностей поведінки матеріалу, що деформується. Встановлення цих закономірностей експериментальними методами є трудомістким та дорогим процесом. У той же час все ширше використовується метод попереднього комп'ютерного моделювання. Це стало можливим в останні десятиліття завдяки суттєвому прогресу в розумінні основних особливостей поведінки порошкових матеріалів у процесі їх ущільнення.

Методом комп'ютерного моделювання були досліджені закономірності ущільнення і зміни форми пористих заготовок при технологічних операціях прямого видавлювання та радіального ущільнення.

### Методика моделювання та постановка задачі

Використовували метод моделювання, що ґрунтується на континуальному підході, реологічної моделі пластичного деформування поруватого тіла [3] та методі скінченних елементів [4].

Рівняння контура поверхні навантаження в  $p$ — $\tau$  площині (рис. 1) має вигляд

$$F = \frac{(p - p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\phi} - \tau_s^2 = 0,$$

де  $p$  — величина гідростатичного тиску;  $p_0$  — значення гідростатичної компоненти напруженого стану, за якої об'єм поруватого матеріалу не змінюється;  $\tau$  — інтенсивність дотичних напружень;  $\psi$  і  $\phi$  — матеріальні функції, залежні від поруватості;  $\tau_s$  — границя текучості матеріалу порошку або твердої фази поруватого тіла.

Прийнята реологічна модель матеріалу дозволяє описувати деформування як порошкових, так і поруватих заготовок. Вона враховує різний опір цих матеріалів при розтягуванні та стисканні.

Моделювання процесу деформування виконували поетапно методом послідовних навантажень [5]. На кожному кроці навантаження визначали напруження, причому вважали, що матеріал є пружним. Потім обчислювали пластичний потенціал і залежно від його величини проводили коригування напружень і матеріальних параметрів моделі (у разі пластичної течії).

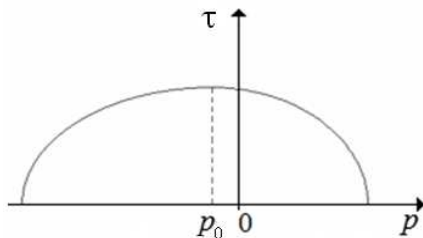


Рис. 1. Вигляд контуру поверхні навантаження в  $p$ — $\tau$  площині.

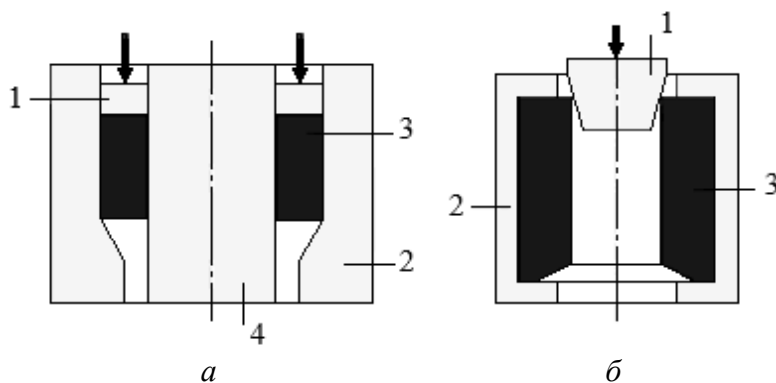


Рис. 2. Розрахункові схеми прямого видавлювання (а) та радіального ущільнення (б): 1 — пуансон; 2 — матриця; 3 — заготовка; 4 — оправка.

Схема процесу прямого видавлювання наведена на рис. 2, а. Деформування заготовки здійснюється в результаті дії пуансона, що рухається з постійною швидкістю. У результаті відбувається течія матеріалу заготовки в отвір, що звужується, між матрицею і оправкою. Початкова поруватість заготовки була 0,1. Зовнішній діаметр заготовки — 140 мм, внутрішній — 100 мм. Висота заготовки була 45,5 мм. Внутрішній діаметр матриці, що відповідає зовнішньому діаметру отриманої втулки, дорівнював 120 мм, зовнішній діаметр оправки був 100 мм.

Ущільнення поруватої заготовки можливо за рахунок її деформування по внутрішній поверхні. Наявність поруватості дозволяє проводити таке ущільнення в замкнутому об'ємі. Схема радіального ущільнення наведена на рис. 2, б. Заготовка розташована в матриці. Переміщення матеріалу в радіальному напрямку та його ущільнення відбуваються в результаті дії пуансона, що має конічну форму та переміщується у вертикальному напрямку з постійною швидкістю.

## Результати обчислювального моделювання

### *Пряме видавлювання*

На рис. 3 наведено результати обчислювальних експериментів, що показують зміну форми виробу, а також зміну розподілу поруватості та накопиченої пластичної деформації в процесі прямого видавлювання. Найбільше ущільнення матеріалу поруватої заготовки відбувається в області переходу конічної поверхні матриці у циліндричну поверхню меншого діаметра.

Верхня частина заготовки і область, що розташована біля вільної від навантажень поверхні матеріалу, ущільнюються менш інтенсивно. Аналогічно змінюється розподіл накопиченої пластичної деформації матеріалу твердої фази виробу. Найбільша величина накопиченої деформації спостерігається в області контакту заготовки з поверхнею матриці. В області поверхні виробу, вільній від навантажень, величина накопиченої деформації нижче.

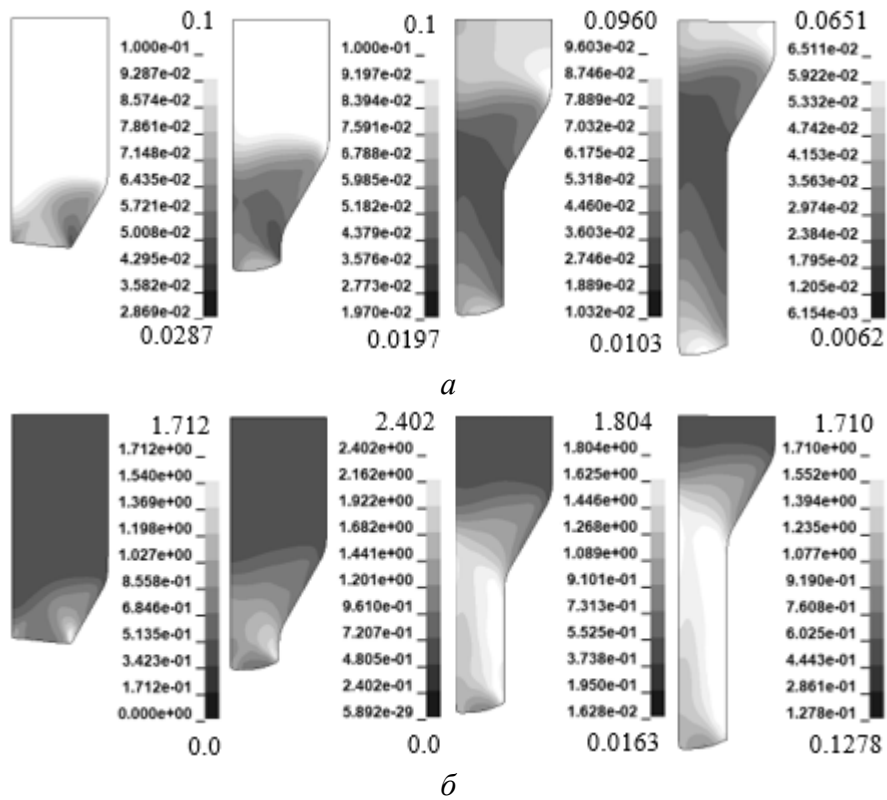


Рис. 3. Еволюція полів показників якості виробів: *а* — розподіл поруватості; *б* — розподіл величини накопиченої пластичної деформації.

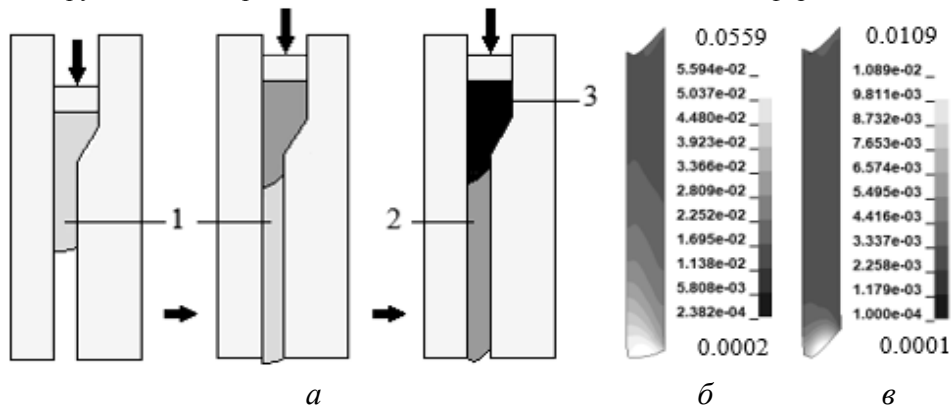


Рис. 4. Послідовність операцій прямого видавлювання (*а*) та розподіл поруватості у першій (*б*) та другій (*в*) заготовках.

Залишкова поруватість і накопичена деформація в готовому виробі розподілені нерівномірно. В області у торця заготовки, вільного від впливу навантажень, величина поруватості максимальна (5,59%), а накопичена деформація мінімальна. Зменшити величину залишкової поруватості в цій області можна за рахунок застосування протитиску. На рис. 4, *а* показана послідовність операцій прямого видавлювання. Спочатку видавлюється перша заготовка. Потім друга, яка остаточно видавлює першу. Третя

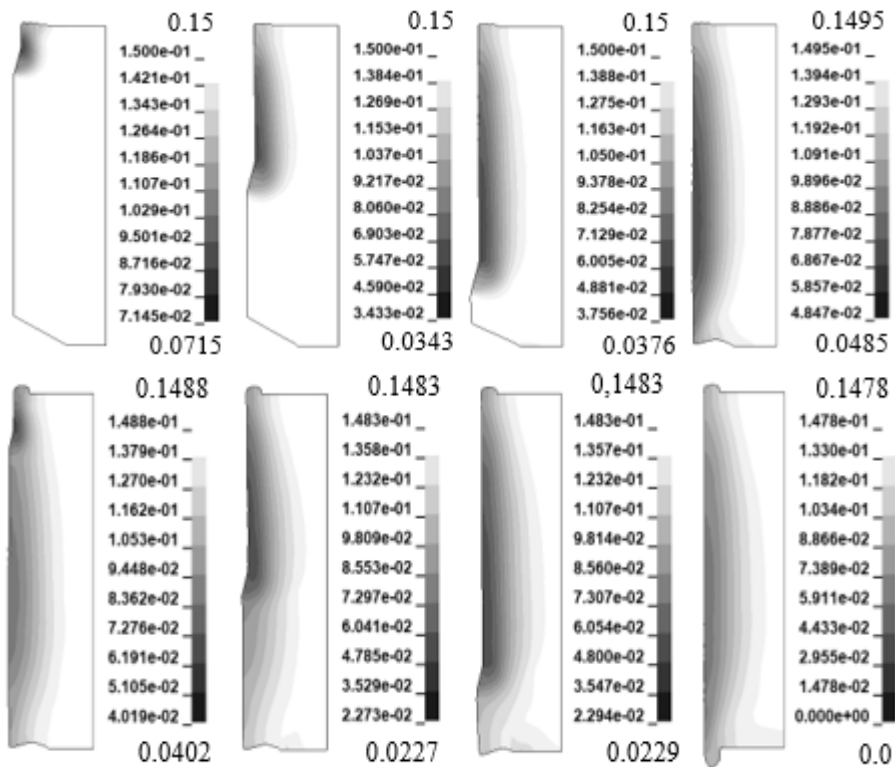
заготовка остаточно видавлює другу. Перша заготовка створює протитиск для другої.

Розподіл поруватості (рис. 4, *a, б*) та величини накопиченої пластичної деформації твердої фази в першій та другій заготовках свідчить, що вплив протитиску приводить до більш рівномірного розподілу цих параметрів, зменшенню поруватості та збільшенню накопиченої деформації.

### Радіальне ущільнення

На рис. 5, 6 наведено результати моделювання процесу радіального ущільнення за внутрішнім діаметром. Ущільнення матеріалу відбувається локально (рис. 5). Спочатку ущільнюється верхня частина заготовки. Далі, відповідно до зміщення пуансона, зона ущільнення переміщується вниз. У кінці першого проходу весь матеріал в області внутрішньої поверхні заготовки ущільнився. Максимальне ущільнення матеріалу відбулося в центрі, а в меншій мірі — у торців заготовки.

Зі збільшенням радіуса поруватість зростає і приймає максимальне значення у зовнішній поверхні заготовки. За рахунок течії матеріалу в вертикальному напрямку в нижній частині заготовки, у її внутрішній поверхні, утворюється задирок.



*б*

Рис. 5. Еволюція полів поруватості при радіальному ущільненні: *a* — перший прохід; *б* — другий прохід.

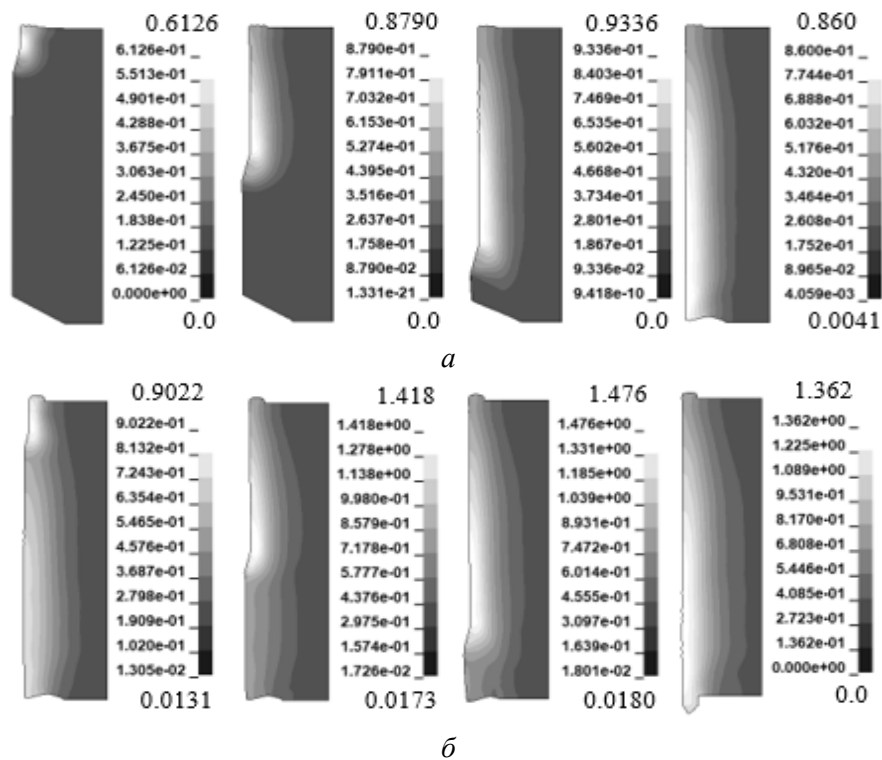


Рис. 6. Еволюція полів накопиченої пластичної деформації при радіальному ущільненні: *a* — перший прохід; *б* — другий.

Діаметр пуансона після першого проходу збільшували. Під час другого проходу область ущільненого матеріалу збільшується і поширюється у напрямку до зовнішньої поверхні заготовки.

Однак у зовнішній поверхні заготовки, у її торцях, матеріал заготовки ущільнюється незначно. Величина задирку в нижній частині виробу збільшилася. Частково його утворення компенсувала початкова форма заготовки за рахунок наявності виїмки в нижній її частині. Невеликий задирок утворився і в області верхнього торця виробу.

Еволюція величини накопиченої пластичної деформації аналогічна зміні величини відносної щільності (рис. 6). Максимальна накопичена деформація — у внутрішній поверхні заготовки, а мінімальна — у її зовнішній поверхні.

### Висновки

Проведено порівняння кінетики деформованого стану поруватих заготовок при виготовленні тонкостінних втулок за двома технологічними схемами — прямим видавлюванням та радіальним ущільненням.

При прямому видавлюванні величина поруватості в області у торця заготовки, вільного від впливу навантажень, максимальна, а накопичена деформація мінімальна. Вплив протитиску приводить до більш рівномірного розподілу цих параметрів, зменшення поруватості та збільшення накопиченої деформації твердої фази.

При радіальному ущільненні тонкостінних втулок деформація матеріалу відбувається локально. Зі збільшенням радіуса поруватість по перерізу виробу зростає. Збільшення кількості проходів за рахунок збільшення діаметра формуючого інструменту дозволяє зменшити нерівномірність розподілу залишкової поруватості та її величину. Проте нерівномірність розподілу поруватості по радіусу залишається. У процесі радіального ущільнення на торцях виробу утворюється задирок, зменшити який можна, змінивши початкову форму заготовки.

Процес прямого видавлювання дозволяє отримати більш рівномірний розподіл залишкової поруватості та накопиченої пластичної деформації матеріалу виробів. Однак цей технологічний процес вимагає застосування більш високих зусиль (літературні дані), що призводить до меншої стійкості інструменту. Метод локального радіального ущільнення дозволяє використовувати менш потужне обладнання. Однак розподіл залишкової поруватості виробу нерівномірний.

### Список літератури

1. Овчинников А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. Москва: Машиностроение, 1983. 200 с.
2. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента при деформирующем протягивании. Киев: Наук. думка, 1981. 288 с.
3. Штерн М.Б., Михайлов О.В., Михайлов А.О. Узагальнена континуальна модель пластичності порошкових та пористих матеріалів. *Порошкова металургія*. 2021. № 1/2. С. 27—44. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00211-7>
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. Москва: Мир, 1975. 541 с.
5. Shtefan E., Pashchenko B., Blagenko S., Yastreba S. Constitutive equation for numerical simulation of elastic—viscous — plastic disperse materials deformation process. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. Issue 1. P. 356—363. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_37)

### References

1. Ovchinnikov, A. G. (1983). *Fundamentals of the theory of stamping by extrusion on presses*. Moscow: Mashinostroenie, 200 p. [in Russian].
2. Rozenberg, O. A. (1981). *Mechanics of tool interaction during deforming broaching*. Kyiv: Nauk. dumka, 288 p. [in Russian].
3. Shtern, M. B., Mikhailov, O. V., Mikhailov, A. O. (2021). Generalized continuum model of plasticity of powder and porous materials. *Poroshkova metalurgiya*, No. 1/2, pp. 27—44 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00211-7>
4. Zenkevich, O. (1975). *Finite element method in engineering: Translation from English*. Moscow: Mir, 541 p. [in Russian].
5. Shtefan, E., Pashchenko, B., Blagenko, S., Yastreba, S. (2019). Constitutive Equation for Numerical Simulation of Elastic—Viscous — Plastic Disperse Materials Deformation Process. In: Ivanov, V., et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham., is. 1, pp. 356—363. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_37)

## Modeling of manufacturing processes of thin-walled bushings from porous blanks using direct extrusion and radial compaction

A. Mikhailov<sup>1</sup>, Ye. Shtefan<sup>2</sup>, O. Mikhailov<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv

\*E-mail: ol2016@i.ua

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

*The deformation process of powder materials thin-walled bushings manufacture was investigated by computer modeling. Two shape formation bushings schemes were considered (direct extrusion and radial compaction). A continuum approach was used to create a modeling method. The method is based on rheological models of porous body plastic deformation and the finite element method. The accepted material rheological model allows describing the deformation of both powder and porous blanks. It takes into account the different resistance of these materials in tension and compression. Modeling of the deformation process was carried out in stages, using the method of successive loads. The elastic stresses were determined, the plastic potential was calculated and, if it was necessary, the stresses and material parameters of the model were corrected at each load step. The porosity value is reach maximum in blank end area, that is free from the loads, and the accumulated deformation is reach minimum in direct extrusion. The effect of back pressure leads to a more uniform distribution of these parameters, a decrease in porosity and an increase in the accumulated deformation of the solid phase. During radial compaction of thin-walled bushings, deformation of the material occurs locally. Porosity in the product section increases with increasing radius. Increasing the number of technological transitions with a gradual increase in the forming tool diameter reduces the uneven distribution of residual porosity and its value. However, the unevenness of the porosity distribution over the radius remains. In the process of radial compaction, a burr is formed on the ends of the product. The burr can be reduced by changing the initial shape of the blank. The process of direct extrusion allows obtaining more uniform distribution of residual porosity and accumulated plastic deformation of product material. However, this technological process requires the higher loads application, which leads to less stability of the tool. The radial compaction method (which characterized by local deformation) requires not high loads and allows not powerful equipment using. However, the distribution of residual porosity over the radius of the bushing is uneven.*

**Keywords:** *plasticity theory, powder materials, computer modeling, finite element method, stress-strain state, porosity distribution.*