УДК 621.762
DOI: 10.20535/2521-1943.2020.88.198649

Вплив форми вихідної поруватої заготовки на еволюцію деформованого стану та енергосилові параметри процесу її штампування в напівзакритому штампі

Г. А. Баглюк ● С. Ф. Кирилюк

Інститут проблем матеріалознавства НАН України, м. Київ, Україна

Received: 28 January 2020 / Accepted: 24 February 2020

Анотація. *Приведені результати моделювання процесу гарячого штампування поруватих порошкових заготівок двох вихідних конфігурацій (циліндричної форми та у вигляді зрізаного конусу) в штампі з роз`ємною матрицею. Чисельна оцінка характеру впливу граничних умов схеми деформування на еволюцію напружено–деформованого стану поковки була проведена з використанням моделі модель жорстко-пластичного поруватого тіла. Вивчалась еволюція розподілу відносної щільності, деформованого стану по перерізу заготівки на різних стадіях деформування та загального зусилля деформування процесу. Показано принципово різний характер еволюції розподілу щільності та складових тензору деформації по об'єму поковки при деформуванні заготівок різної вихідної конфігурації, який проявляється в суттєво більш високому рівні інтенсивності деформацій в об'ємі для вихідних заготівок, які виконанні в вигляді зрізаного конусу у порівнянні з заготівками циліндричної форми. Максимальне значення зусилля штампування для вихідних заготівок обох конфігурацій практично співпадають, проте інтенсивність зростання зусилля деформування суттєво вище для заготівок циліндричної форми.*

Ключові слова: *штампування, поруватість, деформація, напружено-деформований стан, ущільнення, зусилля, ущільнення, поковка, облой.*

Вступ

Одним з найбільш ефективних процесів порошкової металургії, що забезпечують отримання щільних (практично безпористих) виробів (в тому числі – складної форми), є гаряча штамповка поруватих заготівок (ГШПЗ) [1–5]. Цей процес має багато спільного з класичними методами об'ємного штампування компактних металів, однак, наявність поруватості зумовлює відомі особливості пластичної течії матеріалів, обумовлені тим, що крім формозміни, характерного і для компактних матеріалів, процес супроводжується також незворотними об'ємними змінами [6–9].

При розробці технологічного процесу гарячого штампування поруватих заготовок в кожному конкретному випадку здійснюється визначення оптимальних форми, розмірів і поруватості заготівки під штампування, а також схеми деформації. Зазначені параметри не тільки визначають технологічність і техніко–економічну ефективність процесу, але і в значній мірі – якість поковки. При цьому найчастіше постає вибір між виготовленням вихідної заготівки близької за формою до поковки і її подальшого гарячого допресування до кінцевих розмірів і щільності, або виготовленням заготівки відносно простої геометрії і реалізації при штампуванні значних зсувних деформацій для отримання кінцевої форми поковки [7, 9, 10]. Хоч ступінь зсувної деформації порошкового тіла має значний ефект на поведінку матеріалу в умовах деформації, щільність, структуру і міцність матеріалу, в практиці порошкової металургії перший метод знайшов значно ширше застосування [1]. В значній мірі це обумовлено тим, що при використанні методів штампування, які забезпечують швидкий перехід від схеми одновісного стиску до схеми нерівномірного всебічного стиснення, зменшується ймовірність появи тріщини на бічній поверхні заготовок, що особливо важливо для поруватих матеріалів, що мають, як правило, істотно більш низьку пластичність у порівнянні з компактними сплавами аналогічного складу.

У той же час, застосування схем деформації з розвиненим осередком зсувних деформацій дозволяє отримувати матеріали з більш дисперсною структурою, підвищеними характеристиками міцності та

✉ Г. А. Баглюк
gbag@ukr.net

© The Author(s).
The article is distributed under the terms of the license CC BY 4.0.

пластичності внаслідок, зокрема, значного зростання кількості зон розриву оксидних плівок в контактних зонах між частинками і помітного посилення міжзеренного дифузійних процесів зі збільшенням ступеня зсувних деформацій [11–14].

Цей чинник сприяв більш широкому використанню схем відкритого або напівзакритого штампування пористих заготовок в роз'ємних матрицях, широко застосовуваних в процесах обробки тиском компактних сталей і сплавів [15].

Так, однією з поширених схем штампування компактних матеріалів є штампування заготовок в штампах з роз'ємними матрицями, що характеризується наявністю компенсаційної щілини між напівматрицями, в яку витісняється надлишок матеріалу заготовки (облой) [15, 16]. Однак, така схема не знайшла широкого застосування в порошкової металургії внаслідок необхідності ускладнення конструкції штампового оснащення для її реалізації, відсутність обґрунтованих рекомендацій щодо вибору форми, розмірів і місця розташування компенсаційних щілин, а також оптимальної форми вихідної заготівки під штампування. Проте, ряд теоретичних [17] та експериментальних робіт [18, 19] підтвердили можливість успішного застосування таких схем штампування для отримання поковок з поруватих порошкових заготівок.

Метою роботи є вивчення еволюції деформованого стану поруватих заготівок, енергосилових параметрів процесу і розподілу поруватості по об'єму заготівки на всіх етапах деформування при штампуванні в напівзакритому штампі з роз'ємними матрицями з використанням вихідних заготівок під штампування різної конфігурації.

Методика проведення досліджень

Раніше в [20] була запропонована конструкція штампу для напівзакритого штампування в роз'ємних матрицях, розрахункова схема якого приведена на рис. 1.

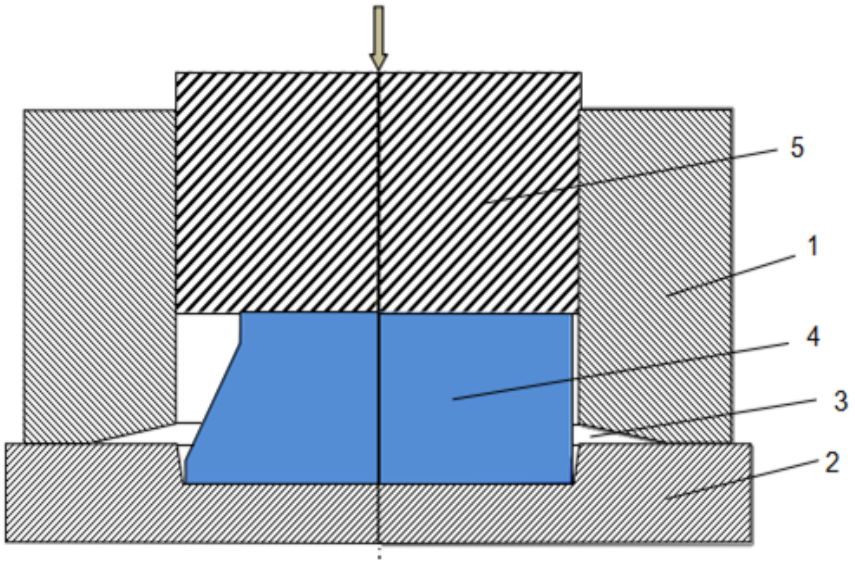


Рис. 1. Розрахункова схема штампу з роз'ємними матрицями для штампування заготівок циліндричної форми (праворуч) та зрізаного конусу (ліворуч)

Конструкція штампу включає в себе верхню 1 та нижню 2 півматриці, які притискаються одна до іншої в процесі штампування пружними елементами (на малюнку не показані). У верхній півматриці 1 виконана облойна канавка 3 з поперечним перерізом конічної форми, що забезпечує витікання надлишку матеріалу поковки на кінцевій стадії деформування. Деформування вихідної поруватої заготівки 4 здійснюється пуансоном 5.

Чисельна оцінка характеру впливу граничних умов схеми деформування на еволюцію напружено–деформованого стану поковки була проведена з використанням програмного комплексу DEFORM 2D/3D.

В якості реологічної моделі середовища що деформується була прийнята модель жорстко–пластичного поруватого тіла, матеріал якого підпорядковується умові пластичності виду [21, 22]:

$$f\left(\sigma_{i,j}\right) = \sigma_i^2 + 6.2\left(1-\rho\right)^{1.028}\rho^2 = \rho^5\sigma_s^2 \tag{1}$$

де ρ – відносна густина поруватого матеріалу; σ_s – межа плинності твердої фази матеріалу при заданих температурно–швидкісних умовах деформування; σ_i – інтенсивність напружень в поруватому тілі та p – гідростатичний тиск напружень відповідно, які визначаються як:

$$p = \left(\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\phi\right)/3; \quad \sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_z - \sigma_r\right)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_\phi\right)^2 + \left(\sigma_r - \sigma_\phi\right)^2 + 6\tau_{rz}^2} \tag{2}$$

В результаті моделювання визначали розподіл по осьовому перерізу заготовки відносної щільності ρ та інтенсивності деформацій ε_i:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\phi)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\phi)^2 + \frac{3}{2}\gamma_{rz}^2} \tag{3}$$

а також характер зміни загального зусилля деформування $P_{шт.}$ (кН) в процесі штампування при використанні вихідних заготівок двох різних конфігурацій.

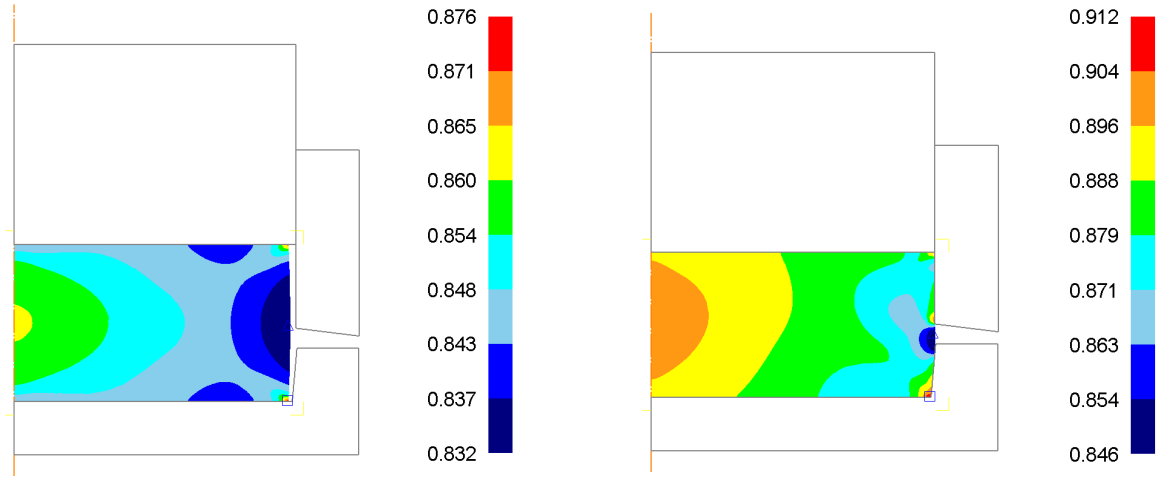
В якості вихідних заготівок приймались пресовки з вихідною поруватістю 20 % циліндричної форми і виконаної у формі усіченого конусу, які були спресовані з порошку алюмінієвого сплаву Al–2024 (Д16). Діаметр порожнини матриці становить 45 мм. Температура нагріву заготівок під штампування – 400 °С, температура матриці – 20 °С. Коефіцієнт тертя між заготівкою і інструментом приймали рівним 0,35.

Беручи до уваги симетричність заготівки, що деформується, відносно осей координат, моделювання проводили для половини її поздовжнього перерізу.

Результати моделювання та їх обговорення

Як показали результати моделювання, при використанні найпростішої схеми одновісного ущільнення (рис. 2, *а, г*) початковий етап процесу відбувається в умовах вільного осаджування і супроводжується переважно ущільненням заготівки без помітної радіальної деформації (рис. 2, *а*). При цьому, до моменту дотику бічних поверхонь заготівки з внутрішньою стінкою матриці центральна частина заготівки внаслідок існування підпору з боку бічних периферійних ділянок ущільнюється дещо більшою мірою в порівнянні з периферійними ділянками (рис. 2, *б*). Після торкання заготівкою бічних стінок матриці в результаті дії сил тертя, що перешкоджають деформації заготовки в осьовому напрямку, в нижній периферійної області поковки формується зона зниженої щільності в порівнянні з основним об'ємом поковки (рис. 2, *в*). Скільки–небудь помітне видавлювання матеріалу поковки в облойной канавку починається лише при досягненні відносної щільності поковки близько 97 % (рис. 2, *в*) і після повного її ущільнення до 100 % по об’єму поковки формується невеликий облой (рис. 2, *г*).

При використанні заготовки у вигляді усіченого конусу характер еволюції розподілу щільності по об’єму поковки істотно відрізняється. На початковій стадії деформування у верхній зоні заготовки (в області меншого діаметра усіченого конуса) формується зона підвищеної щільності (рис. 2, *д*), яка збільшується в міру осаджування останньої (рис. 2, *е*, *ж*). Максимальна різниця в значеннях щільності в різних зонах поковках на проміжних стадіях деформації досягає 10 % (рис. 2, *ж*), однак після заповнення матеріалом заготовки порожнини матриці і переходу до схеми всебічного нерівномірного стиснення відмінність в щільності по об’єму нівелюється і після завершення кінцевої стадії процесу весь об’єм поковки набуває практично безпористого стану (рис. 2, *з*).



а *б*

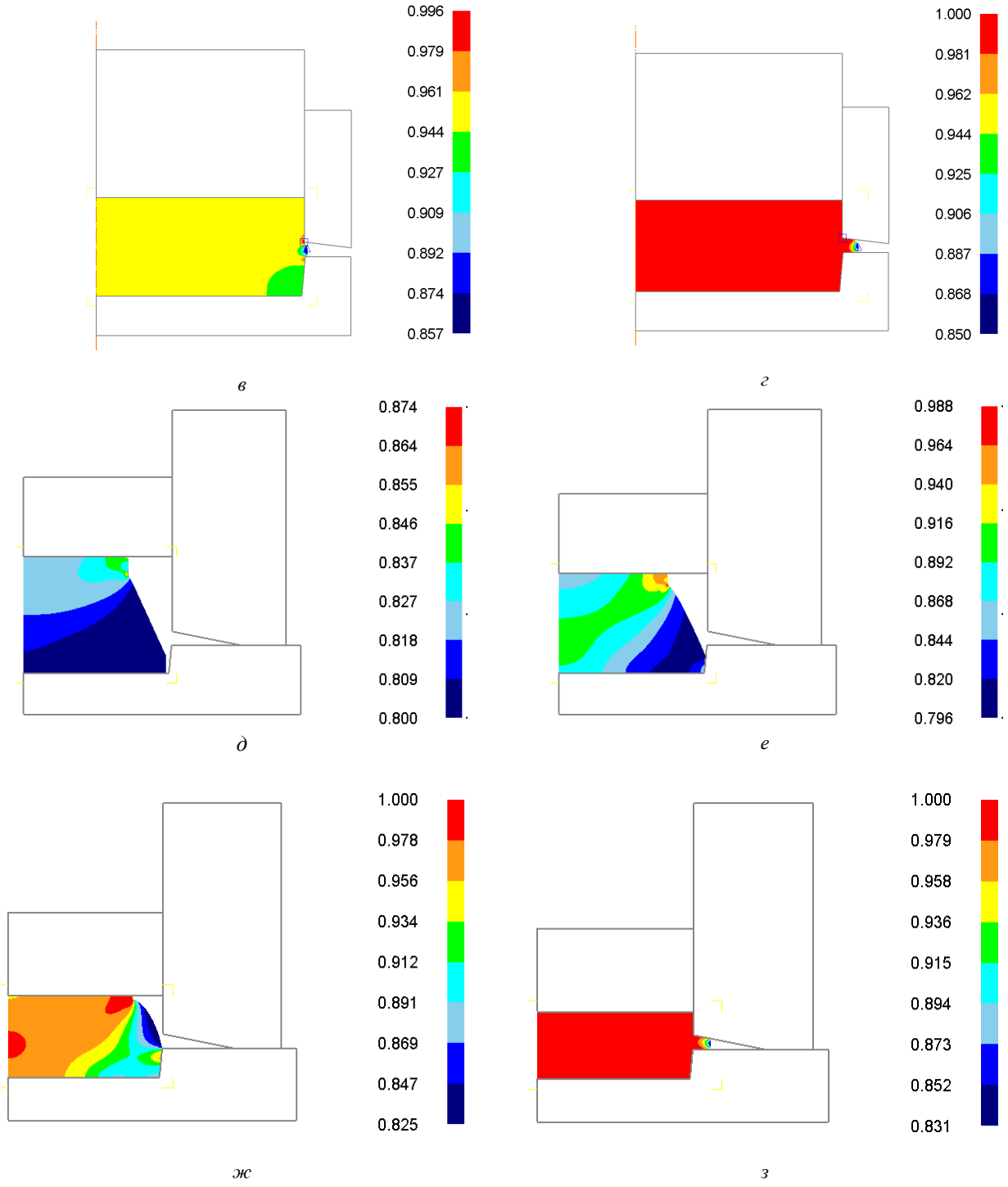


Рис. 2. Розподіл відносної щільності по перерізу поковки на різних стадіях її деформування для вихідних заготівок циліндричної (*а–г*) та конічної (*д–з*) форми

Зазначені закономірності формування полів розподілу щільності на різних стадіях деформування для заготовок різної вихідної форми обумовлені відповідним характером зміни полів складових тензора деформації.

Як можна бачити з рис. 3, *а*, *б*, максимальна ступінь осьової деформації ε_z для поковок штампованих з циліндричних заготовок реалізується в їх центральній частині та в області, що граничить з облойною канавкою і становить – (0,38–0,52), тоді як в решті об'єму поковки значення ε_z не перевищує значень – (0,23–0,38).

У разі використання конусоподібної вихідної заготовки (рис. 3, *в*, *г*) внаслідок її більшої початкової висоти накопичені значення осьової деформації по об'єму поковки помітно вищі і досягають на кінцевій стадії процесу значень – (0,57–0,48) (рис. 3, *г*).

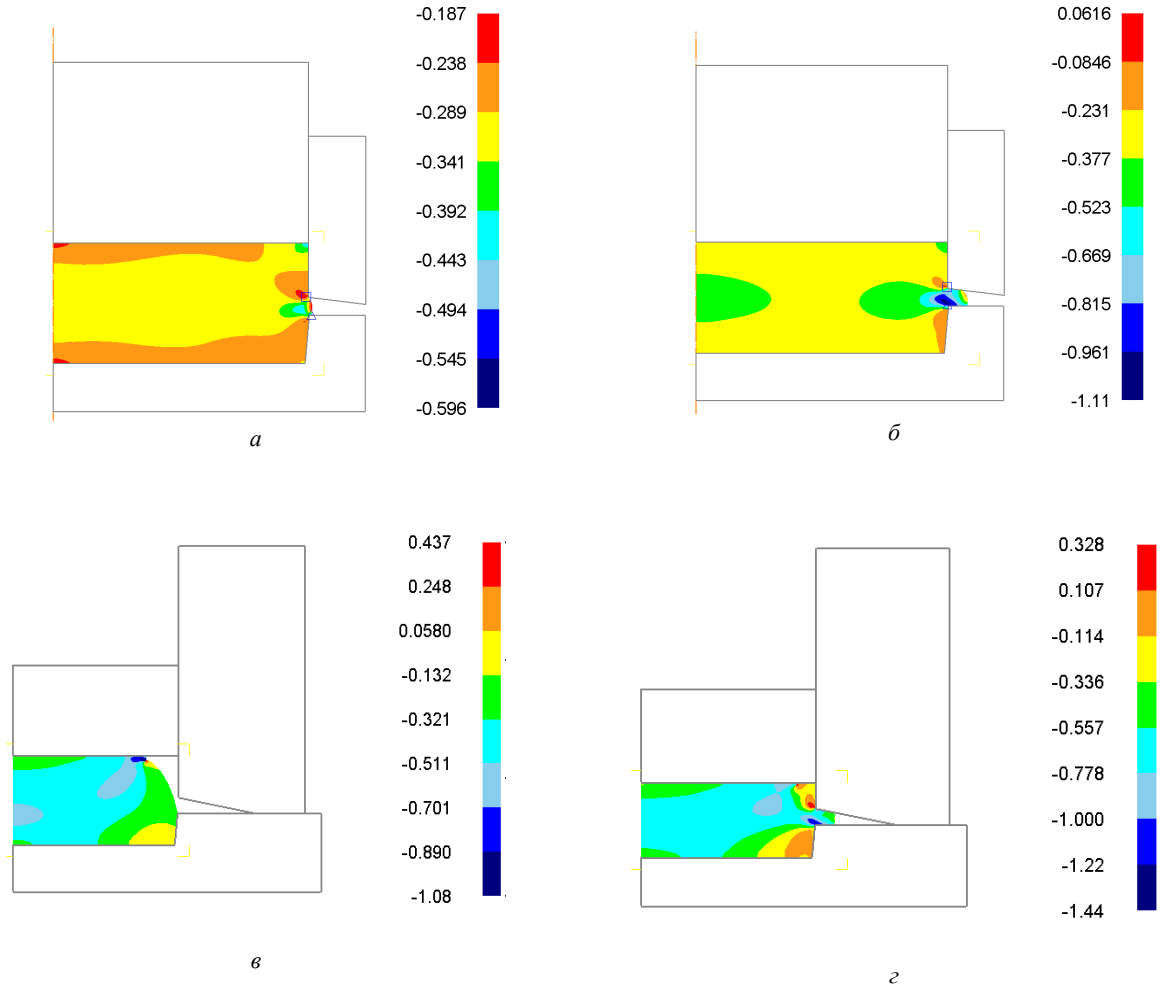


Рис. 3. Розподіл осьової деформації ε_z по перерізу поковки на різних стадіях її деформування для вихідних заготівок циліндричної (*а*, *б*) та конічної (*в*, *г*) форми

Аналогічна закономірність яка виражена в більших абсолютних значеннях величин деформацій для заготовок конічної форми в порівнянні з циліндричними, спостерігається і для радіальних деформацій (рис. 4). Однак, звертає на себе увагу, що на відміну від осьової деформації, значення якої мають від'ємну величину, радіальні деформації характеризуються позитивними значеннями їх величин на всіх етапах деформації. Це вказує на розпушують характер їх дії (на відміну від ущільнюючого – для осьових деформацій).

Особливий інтерес викликає оцінка розподілу по перерізу величин інтенсивності деформацій ε_i, що визначають ступінь пропрацювання матеріалу основи поковки і, відповідно, справляє істотний вплив на структуру і властивості матеріалу одержуваного в результаті штампування виробу.

Як випливає з рис. 5, при використанні циліндричної вихідної заготовки як на проміжному етапі (рис. 5, *а*), так і на кінцевій стадії деформації (рис. 5, *б*) розподіл інтенсивності деформацій відносно рівномірний по всьому перерізі заготівки. Як і слід було очікувати, області поковки з найбільшими значеннями інтенсивності деформацій розташовані в зоні, наближеній до облойной канавки, де величина інтенсивності деформацій знаходиться в межах 0,40–0,57, і в вузькій зоні самої щілини, де величина ε_i досягає значень 0,74–0,91 (рис. 5, *б*). У переважному об'ємі поковки величина інтенсивності деформацій ε_i складає 0,23–0,40.

Для поковок, одержаних з конічних заготівок, величина і характер розподілу інтенсивності деформацій по перерізу істотно інші (рис. 5, *в*, *г*). Вже на проміжній стадії процесу деформування в утворюються зони підвищеної інтенсивності деформацій (ε_i = 0,41–0,56) які зароджуються у верхній частині зрізаного конусу і поширюються до центру перерізу, тоді як нижня периферійна частина заготівки є застійною зоною, в якій величина ε_i не перевищує значень (0,11–0,27) (рис. 5, *в*). Після закінчення деформування в периферійній зоні що розташована в верхній частині перерізу та яка граничить з компенсаційною щілиною, інтенсивність деформації досягає досить високих значень 0,79–1,05, тоді як інтенсивність деформацій в решті об'єму поковки становить 0,52–0,78 (рис. 5, *в*), що, тим не менше, значно перевищує величину ступеня накопичених деформацій для поковок, що отримані з заготівок циліндричної форми.

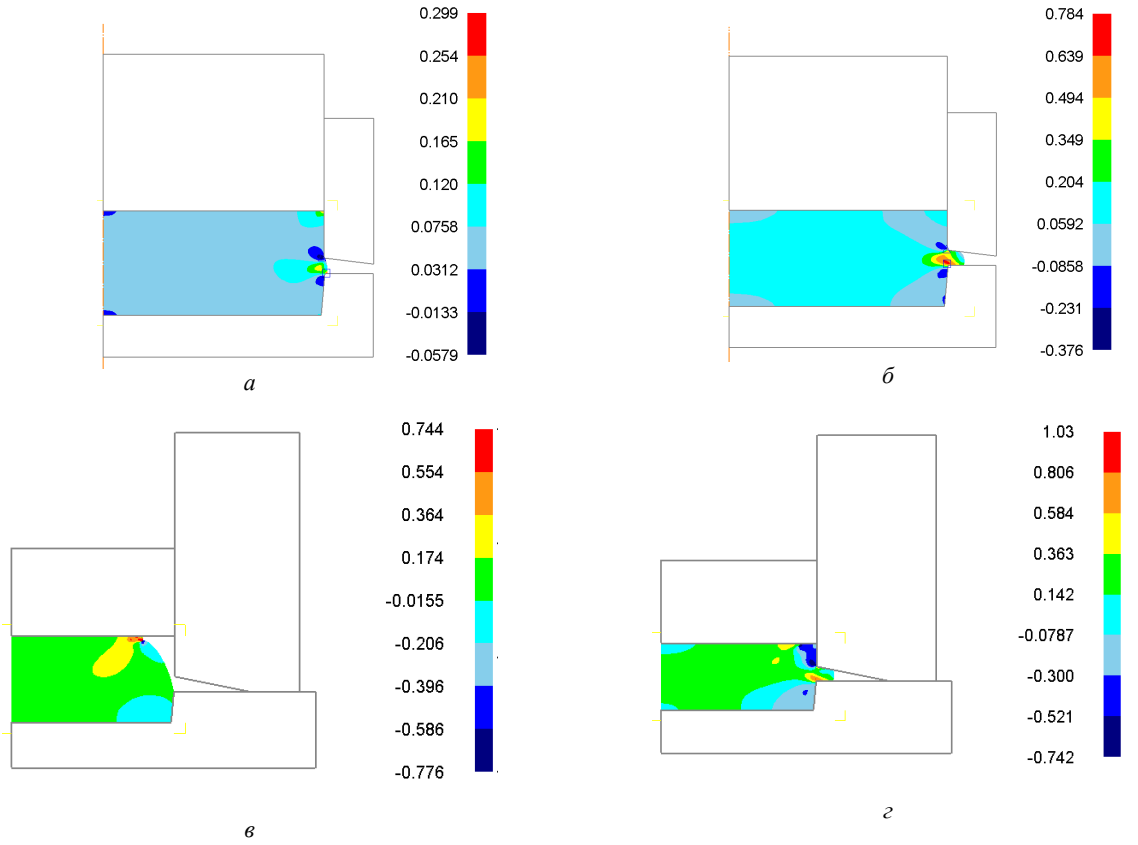


Рис. 4. Розподіл радіальної деформації ε_r по перерізу поковки на різних стадіях її деформування для вихідних заготівок циліндричної (*а*, *б*) та конічної (*в*, *г*) форми

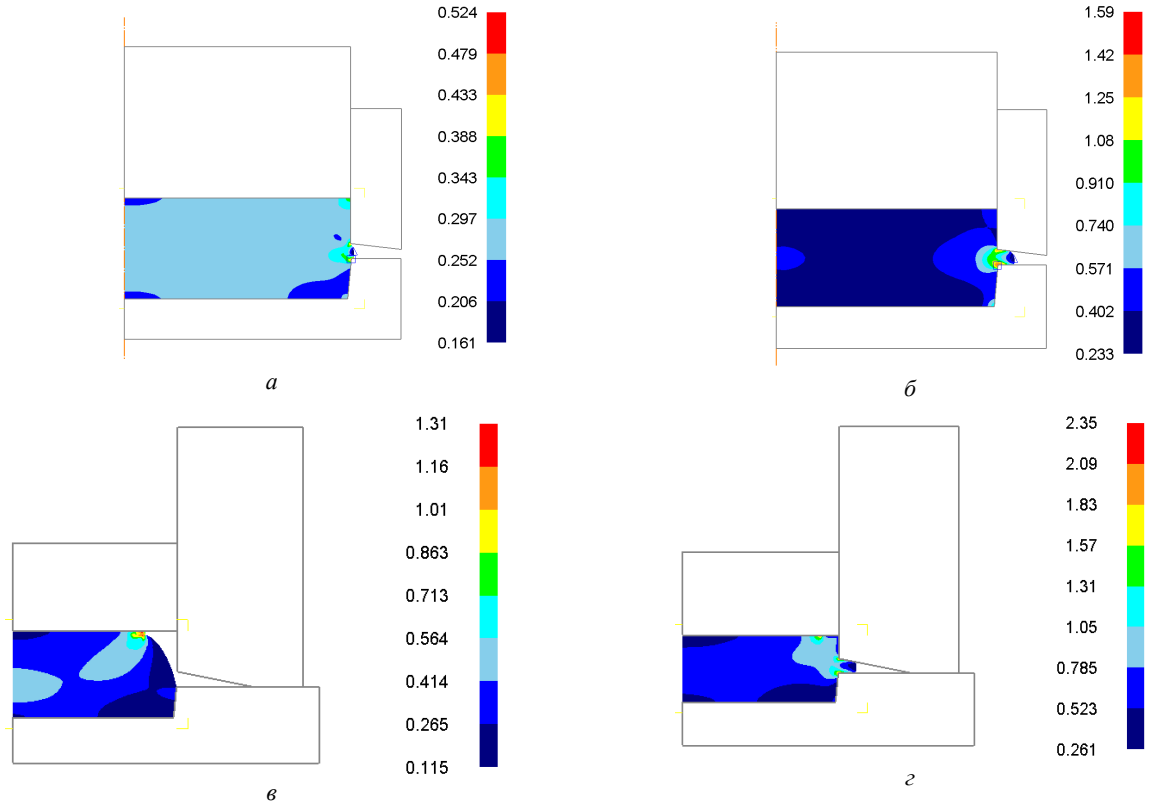


Рис. 5. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i по перерізу поковки на різних стадіях деформування для вихідних заготівок циліндричної (*а*, *б*) та конічної (*в*, *г*) форми

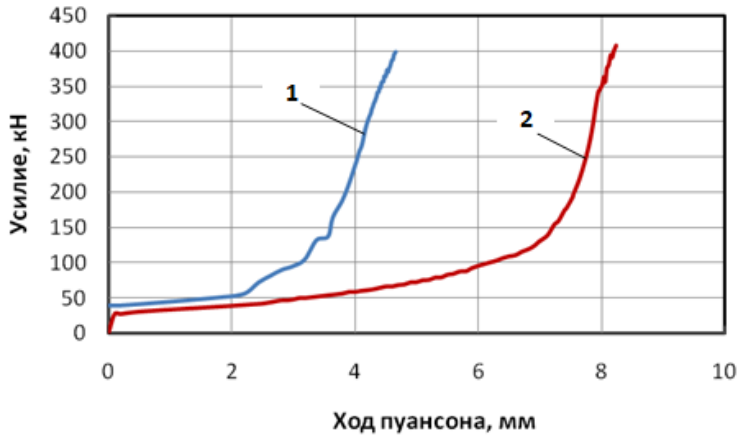


Рис. 6. Залежність зусилля деформування від ходу пуансону при отримані поковки з заготівок циліндричної (1) та конічної (2) форми

Зазначена закономірність є вкрай позитивною з технологічної точки зору, так як внаслідок інтенсифікації деформації в процесі штампування забезпечується краще пропрацювання матеріалу поковки, внаслідок чого не тільки практично усувається поруватість, але й відбувається подрібнення зерен і утворення більш якісного матеріалу за рахунок посилення міжзеренної дифузії, що викликана руйнуванням міжчасткових адсорбованих плівок оксидів, сульфідів та неметалевих включень при пластичному деформуванні з реалізацією інтенсивних зсувних деформацій [11, 13].

Аналіз силових параметрів процесу штампування заготівок різної конфігурації показав (рис. 6), що криві 1 і 2, що описують залежності зусилля деформації від ходу пуансона при штампуванні вихідних заготівок циліндричної і конічної форми, помітно відрізняються між собою, проте кожну з них можна умовно розділити на три етапи.

На початковій стадії процесу, коли заготовка ще має досить високу поруватість, хід пуансона супроводжується вкрай повільним підвищенням зусилля. На цьому етапі відбувається ущільнення матеріалу заготівки без якої–небудь помітної формозміни. Звертає на себе увагу, що на початковій стадії процесу криві 1 і 2 розташовані практично паралельно, однак зусилля деформування циліндричної заготівки має дещо більшу величину у порівнянні із заготовкою у вигляді зрізаного конусу. Це пояснюється більшою площею контакту деформуючого інструменту з матеріалом заготівки на початковому етапі деформування.

На другому етапі деформації циліндричної заготовки різко зростає інтенсивність наростання зусилля. Паралельно з ущільненням відбувається і деформація заготовки в радіальному напрямку, що супроводжується формуванням контакту бічної поверхні останньої з внутрішньою поверхнею штампу з подальшим заповненням кутових ділянок порожнини штампу (см. рис. 2, *б*). Тривалість другої стадії деформування для заготовки конічної форми істотно більша в зв'язку з необхідністю реалізації значно більших радіальних деформацій до заповнення матеріалом заготовки порожнини штампу (див. рис. 2, *д, ж*).

Третя стадія процесу, що починається після повного заповнення матеріалом заготовки порожнини штампу, являє собою кінцеве доущільнення заготовки з незначним видавлюванням надлишку матеріалу в компенсаційну щілину (див. рис. 2, *г*, *з*). Ця стадія характеризується інтенсивним зростанням зусилля на відносно невеликій ділянці ходу робочого інструмента. Величини максимального зусилля штампування для обох схем деформації практично збігаються, так як визначаються головним чином зусиллям остаточного доущільнення матеріалу при повністю заповненій порожнині штампу.

Висновки

1. Результати моделювання показали, що штампування вихідних заготівок, виконаних у вигляді усіченого конуса, забезпечує реалізацію істотно більш високого рівня інтенсивності деформацій в об’ємі поковки (ε_i = = 0,52–1,05) в порівнянні з заготівками циліндричної форми, величина інтенсивності деформацій ε_i для якої в переважаючій більшості об’єму становить 0,23 – 0,40. В результаті підвищення рівня інтенсивності деформації в процесі штампування забезпечується краще пропрацювання матеріалу поковки, відбувається подрібнення зерен і підвищення міцності металевого контакту між зернами матеріалу.

2. Величини максимального зусилля штампування для двох схем деформацій практично збігаються, так як визначаються головним чином зусиллям кінцевого доущільнення заготовки при повністю заповненій порожнині штампу.

References

1. Дорофеев Ю. Г., Гасанов Б. Г., Дорофеев В. Ю. и др. Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий. – М.: Металлургия, 1990. – 206 с.
2. Кун Х.А. Основные принципы штамповки порошковых заготовок // Порошковая металлургия материалов специального назначения. – М.: Металлургия. –1977. – С.143–158.
3. Bai Q., Lin J., Jiang J., Dean T.A., Zou J., Tian G. A study of direct forging process for powder superalloys // Materials Science & Engineering A. – 2015. – Vol. 621. – P. 68–75.
4. Hendrickson A. A., Machmeier P. M., Smith D. W. Impact forging of sintered steel preforms // Powder Metallurgy. – 2000. – Vol.43, No.4. – P.327–344.
5. Qui J.W., Liu Y., Liu Y.B., Liu B., Wang B., Ryba E., Tang H.P. Microstructure and mechanical properties of titanium alloy connecting rod made by powder forging process // Materials and Design. – 2012. – Vol. 33. – P. 213–219.
6. Narayanasamy R., Senthilkumar V., Padney K.S. Some features of hot forging of powder metallurgy sintered high strength 4 % titanium carbide composite steel preforms under different stress state conditions // Materials and Design. – 2008. – Vol. 29. – P. 1380–1400.
7. Baglyuk G. Densification and Shape Change of Porous Billets in Closed and Open Dies // Recent Developments in Computer Modeling of Powder Metallurgy Processes. –IOS Press. NATO Science Series. – 2001. – P. 163–168.
8. Павлов В.А., Носенко М.И. Влияние деформированного состояния на уплотнение порошковых металлов при горячей штамповке // Порошкова металлургия. –1992. – №2. – С. 8–12.
9. Баглюк Г.А. Оптимізация процесів формоутворення при гарячому штампуванні пористих заготовок // Наукові нотатки. – 2009. – Т. 25, №II. – С. 4–8.
10. Дорошкевич Е.А., Горохов В.М., Рябов И.Н., Звонарев Е.В. О нахождении оптимальной формы пористой заготовки при горячей штамповке // Порошковая металлургия. – 1988. – №4. – С.11–15.
11. Баглюк Г. А. Влияние деформационных параметров на структуру и свойства горячештампованных порошковых материалов // Обработка материалов давлением. Краматорск. – 2011. – Т. 26, №1, – С. 139–145.
12. Bagliuk G., Shishkina Yu. The influence of severe plastic deformation on structure and properties of aluminum matrix composite // Euro PM 2014 Congress Proceedings. – 21–24 September 2014. – Salzburg, Austria. – P. 21–24.
13. Дорофеев В. Ю., Егоров С. Н. Межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедеформированных материалов. – М.: ЗАО Металлургиздат, 2003. – 152 с.
14. Павлов В. А., Носенко М. И. Влияние горячей деформации на формирование структуры и свойств порошковых металлов // Порошковая металлургия. –1988. – № 2. – С.16–20.
15. Ковка и штамповка: Справочник. В 4–х т. / Ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. Горячая штамповка / Под ред. Е. И. Семенова, – М.: Машиностроение, – 1986. – Т.2. – 592 с.
16. Эдуардов М.С. Штамповка в закрытых штампах. – Л.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
17. Баглюк Г.А. Уплотнение пористого материала при горячей штамповке в закрытом штампе с компенсатором // Порошковая металлургия. – 1998. – № 5/6. – С. 14–18.
18. Шишкина Ю.А., Баглюк Г.А., Курихин В.С., Вербило Д.Г. Влияние схемы деформации на структуру и свойства горячештампованных алюмоматричных композитов // Порошковая металлургия. – 2016. – №1/2. – С. 9–17.
19. Баглюк Г.А., Толочин А.И., Толочина А.В., Яковенко Р.В., Грипачевский А.Н., Головкова М.Е. Влияние режимов обработки на структуру и свойства горячештампованного интерметаллида Fe_3Al // Порошковая металлургия. – 2016. – №5/6. – С. 59–69.
20. Патент на корисну модель № 25067 (Україна). Штамп для гарячого штампування порошкових заготовок / Баглюк Г.А., Штерн М.Б., Грабчак О.К., Сердюк Г.Г.// Бюл. № 11. – 25.07.2007.
21. Shima, S., Oyane, M. Plasticity Theory for Porous Metals // International Journal of Mechanical Sciences. –1976. – Vol. 18. – P. 285–291.
22. Khoei A.R. Computational Plasticity in Powder Forming Processes. – Elsevier Science, 2005. Vol.1. – 449 p.

Influence of the inicial porous preform shape on the deformed state evolution and force parameters of the forging process in a semi-closed die

G. Bagliuk, S. Kyryliuk

Abstract. *The results of simulation of hot forging process for porous powder preforms of two initial configurations (cylindrical shape and in the form of a cut cone) in a die with detachable matrix are presented. Numerical assessment of the effect of the boundary conditions of the deformation scheme on the evolution of the stress-strain state of the forged piece was performed using the model of rigidly plastic porous body. The evolution of the relative density distribution, the deformed state along the cross section of the workpiece at different stages of deformation and the overall effort of deforming the process were studied. The fundamentally different nature of the evolution of density distribution and components of deformation tensor in the forged pieces volume is shown in deformation of the preforms of different initial configuration, which is manifested in a substantially higher level of deformations intensity in the volume for the initial preforms, which are made in the form of a cut cone in a cut cylindrical shape. The maximum value of the forging force for the initial preforms of both configurations is practically the same, but the intensity of the deformation force increase is much higher for the cylindrical blanks.*

Keywords: *forging, porosity, deformation, stress-strain state, densification, forces, forged piece, flash.*

Влияние формы исходной пористой заготовки на эволюцию деформированного состояния и энергосиловые параметры процесса штамповки в полузакрытом штампе

Г. А. Баглюк, С. Ф. Кирилюк

Аннотация. *Приведены результаты моделирования процесса горячей штамповки пористых порошковых заготовок двух выходных конфигураций (цилиндрической формы и в виде усеченного конуса) в штампе с разъемные матрицей. Численная оценка характера влияния граничных условий схемы деформирования на эволюцию напряженно-деформированного состояния поковки была проведена с использованием модели модель жестко-пластического пористого тела. Изучалась эволюция распределения относительной плотности, деформированного состояния по сечению заготовки на различных стадиях деформирования и общего усилия деформирования процесса. Показано принципиально различный характер эволюции распределения плотности и составляющих тензора деформации по объему поковки при деформации заготовок различной исходной конфигурации, который проявляется в существенно более высоком уровне интенсивности деформаций в объеме исходящих заготовок, выполненных в виде усеченного конуса по сравнению с заготовками цилиндрической формы. Максимальные значения усилия штамповки для выходных заготовок обеих конфигураций практически совпадают, однако интенсивность роста усилия деформирования существенно выше для заготовок цилиндрической формы.*

Ключевые слова: *штамповка, пористость, деформация, напряженно-деформированное состояние, уплотнения, усилия, уплотнения, поковка, облой.*

References

1. Dorofeev, Yu.G., Gasanov, B.G. and Dorofeev, V.Yu. (1990), *Promyshlennaya tekhnologiya goryachego pressovaniya poroshkovykh izdelii* [Industrial technology of hot pressing of powder products], Metallurgiya, Moskva, Russia.
2. Kun, Kh. A. (1977), *Osnovnye printsipy shtampovki poroshkovykh zagotovok* [Basic principles for stamping powder blanks]. Metallurgiya, Moskva, Russia.
3. Bai, Q., Lin, J., Jiang, J., Dean, T.A., Zou, J. And Tian, G. (2015), A study of direct forging process for powder superalloys, *Materials Science & Engineering A*. vol. 621, pp. 68–75.
4. Hendrickson, A.A., Machmeier, P.M. and Smith. D.W. (2000), "Impact forging of sintered steel preforms", *Powder Metallurgy*, pp. 327–344.
5. Qui, J.W., Liu, Y., Liu, Y.B., Liu, B., Wang, B., Ryba, E. and Tang, H.P. (2012), "Microstructure and mechanical properties of titanium alloy connecting rod made by powder forging process", *Materials and Design*, vol. 33, pp. 213–219.
6. Narayanasamy, R., Senthilkumar, V. and Padney, K. (2008), "Some features of hot forging of powder metallurgy sintered high strength 4 % titanium carbide composite steel preforms under different stress state conditions", *Materials and Design,* pp. 1380–1400.
7. Baglyuk, G. (2001), Densification and Shape Change of Porous Billets in Closed and Open Dies, Recent Developments in Computer Modeling of Powder Metallurgy Processes, IOS Press. NATO Science Series, pp. 163–168.
8. Pavlov, V.A. and Nosenko, M.I. (1992), Vliyanie deformirovannogo sostoyaniya na uplotnenie poroshkovykh metallov pri goryachei shtampovke [The influence of the deformed state on the compaction of powder metals during hot stamping], Poroshkova metallurgiya, no. 2, pp. 8–12.
9. Baglyuk, G.A. (2009), Optimizatsiya protsesiv formoutvorennya pri garyachomu shtampuvanni poristikh zagotovok, [Optimization of Formation Processes in Hot Stamping of Porous Billets], Naukovi notatki. Mizhvuz. Zbirnik, no. 25, pp. 4–8.
10. Doroshkevich, E.A., Gorokhov, V.M., Ryabov, I.N. and Zvonarev, E.V. (1988), "On finding the optimal shape of a porous billet during hot stamping", *Poroshkovaya metallurgiya*, no.4, pp. 11–15.
11. Baglyuk, G.A. (2011), "Influence of deformation parameters on the structure and properties of hot stamped powder materials", *Obrabotka materialov davleniem*, pp. 139–145.
12. Bagliuk, G. and Shishkina, Y. (2014), "The influence of severe plastic deformation on structure and properties of aluminum matrix composite", *Euro PM 2014 Congress Proceedings*. pp. 21–24.
13. Dorofeev, V.Yu. and Egorov, S.N. (2003), *Mezhchastichnoe srashchivanie pri formirovanii poroshkovykh goryachedeformirovannykh materialov* [Interparticle splicing during the formation of hot–deformed powder materials], ZAO Metallurgizdat, Moscow, Russia.
14. Pavlov, V.A. and Nosenko, M.I. (1988), "The effect of hot deformation on the formation of the structure and properties of powder metals", *Poroshkovaya metallurgiya,* no. 2, pp. 16–20.
15. Semenov, E.I. (1986), *Goryachaya shtampovka* [Hot stamping], Kovka i shtampovka, Mashinostroenie, Spravochnik, vol. 2, Moscow, Russia.
16. Eduardov, M.S. (1971), *Shtampovka v zakrytykh shtampakh* [Stamping in closed stamps], Mashinostroenie, Leningrad, Russia.
17. Baglyuk, G.A. (1998), Compaction of porous material during hot stamping in a closed die with a compensator, Poroshkovaya metallurgiya, no. 4/5, pp. 14–18.
18. Shishkina, Yu.A., Baglyuk, G.A., Kurikhin, V.S. and Verbilo, D.G. (2016), "The influence of the deformation scheme on the structure and properties of hot–pressed aluminomatrix composites", Poroshkova metallurgiya, no. 1/2, pp. 9–17.
19. Baglyuk, G.A., Tolochin, A.I., Tolochina, A.V. and dr. (2016), "The influence of processing modes on the structure and properties of the hot stamped Fe3Al intermetallic", *Poroshkova metallurgiya*, no. 5/6, pp. 59–69.
20. Baglyuk, G.A., Shtern, M.B., Grabchak, O.K. and Serdyuk G.G. (2007), Shtamp dlya garyachogo shtampuvannya poroshkovikh zagotovok, [Stamp for hot stamping of powder bars], Byul. no. 11, 25.07.2007, Ukraine, Patent na korisnu model' № 25067.
21. Shima, S. and Oyane, M. (1976), Plasticity Theory for Porous Metals, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 18, no. 285–291.
22. Khoei, A.R. (2005), *Computational Plasticity in Powder Forming Processes* [Vychislitel'naya plastichnost' v protsessakh poroshkovoi formovki], Elsevier Science, 1 nd. ed.