

Еволюція процесу ущільнення та деформованого стану поруватих заготовок при їх гарячому штампуванні у відкритому штампі

Г.А. Баглюк¹ • С.Ф. Кирилюк¹

Received: 27 November 2023 / Revised: 18 December 2023 / Accepted: 27 December 2023

Анотація. В статті наведені результати дослідження еволюції деформованого стану заготовок, енергосилових параметрів процесу і розподілу поруватості по об'єму поковки на всіх етапах гарячого штампування поруватих порошкових поковок у відкритому штампі. Моделювання процесу проводили методом скінченних елементів з використанням програмного комплексу DEFORM 2D/3D. В результаті моделювання встановлено, що на початковій стадії процесу відбувається головним чином ущільнення заготовки при мінімальній радіальній течії матеріалу. Помітна течія металу в зону облойної канавки починається лише при досягненні матеріалом поковки середньої відносної густини, що перевищує 90%. Відзначено суттєво відмінний характер розподілу по об'єму поковки осьових e_z та радіальних e_r деформацій. Зона з підвищеними рівнями значень осьових деформацій формується в центральному шарі поковки, рівновіддаленому від верхньої та нижньої поверхонь порожнини штампі, а значення радіальних деформацій зменшуються по мірі віддаленості від зони, яка межує з вільною боковою поверхнею заготовки в радіальному (доцентровому) напрямку. Мінімальні значення e_z та e_r проявляються в верхній та нижній кутових застійних зонах поковки. Показано, що графік залежності зусилля деформування від переміщення пуансона відзначається наявністю щонайменше трьох характерних ділянок, обумовлених співвідношенням між процесом ущільнення та формозміни поковки на кожному етапі процесу.

Ключові слова: порошкова металургія, гаряче штампування, деформація, щільність, моделювання, метод скінченних елементів, поковка.

Вступ

Одним з найбільш ефективних процесів порошкової металургії, що дозволяє забезпечити отримання виробів (в тому числі – складної форми) з високощільних матеріалів, є гаряче штампування поруватих заготовок [1]–[8]. Крім максимальної щільності, яку може забезпечити застосування цієї технології, отримані з її використанням матеріали мають інші специфічні особливості, зокрема – спадкову дрібнозернистість, що вигідно відрізняють її від методів ливарного переділу або (у разі застосування технології порошкової металургії) високотемпературного спікання порошкових заготовок у присутності рідкої фази.

В практиці порошкової металургії найбільш широке застосування знайшов метод гарячого штампування у закритому штампі, який передбачає просте допресування поруватих заготовок з мінімальною течією матеріалу в напрямку, нормальному до напрямку прикладання деформуючого зусилля, що реалізується тільки за рахунок заповнення технологічного зазору між стінкою матриці та нагрітої заготовки [1].

Однак, суттєвим недоліком такої схеми деформації є те, що при її реалізації виробі, отримані допресуванням за відсутності відчутних поперечних деформацій, зазвичай мають залишкову поруватість до 2% внаслідок того, що найбільш інтенсивно закриття пор та руйнування оксидної плівки на поверхні частинок відбувається при зсувних деформаціях, тоді як при звичайній гарячій допресовці в закритому штампі деформації зсуву зведені до мінімуму, а закриття пор відбувається лише під дією простого стиснення.

До недоліків зазначеної схеми відноситься також низька стійкість штампового оснащення та можливість

✉ С.Ф. Кирилюк
KyryliukStepan@gmail.com

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

заклинювання кривошипного преса внаслідок перенапруг у штампі, що виникають в результаті навіть незначного перевищення об'єму матеріалу заготовки відносно об'єму порожнини матриці. Це вказує на доцільність більш широкого використання альтернативних схем штампування в штампах з незамкнутими об'ємами, при яких поряд з осьовими реалізуються також і додаткові деформації зсуву [9]–[12]. У разі реалізації схем штампування з поперечною деформацією закриття пор відбувається в результаті комбінації нормального тиску та зсуву, що активує закриття пор і сприяє зниженню тиску пресування для отримання щільного матеріалу [9], [10], [11].

У той же час відомо, що щільність матеріалу поковки - не єдиний критерій, що визначає формування структури і властивостей металу. Залежно від схеми напружено-деформованого стану при однаковій кінцевій щільності порошкового металу істотно змінюються також мікроструктура, пластичні властивості і, особливо, ударна в'язкість [12]–[15]. При застосуванні схем деформування, при яких реалізуються додаткові деформації зсуву, відбувається краще диспергування структури матеріалу і підвищення якості міжзеренних границь у порівнянні зі звичайним штампуванням доущільненням без помітних зсувних деформацій [16]. Крім того, наведені в [17] дані вказують, що традиційна схема гарячого штампування поруватих заготовок у закритому штампі є також найменш оптимальною з точки зору енергосилових параметрів процесу.

Все вищенаведене обумовлює доцільність використання менш жорстких схем деформації, зокрема - шляхом використання для штампування заготовок з плюсовим допуском по масі з частковим видавлюванням надлишкового об'єму матеріалу заготовок в спеціальні компенсаційні порожнини штампів на кінцевій стадії деформування.

До такого методу штампування відноситься, зокрема, одна з найбільш широко застосовуваних схем штампування компактних металів та сплавів - штампування у відкритих штампах [18]. Однак, в практиці порошкової металургії ця технологія штампування не знайшла широкого застосування.

Відмінною особливістю відкритого штампування є наявність протягом усього процесу деформації ділянки заготовки, що змінюється по висоті, з вільною бічною поверхнею, яка має можливість течії в поперечному напрямку. При цьому слід брати до уваги, що співвідношення між інтенсивністю заповнення порожнини штампів, ущільненням матеріалу, і видавлюванням надлишку матеріалу в облої на різних стадіях процесу визначає як якість оформлення елементів поковки, так і властивості відштампованого матеріалу. У той же час, характер та особливості деформування заготовок у відкритих штампах та закритих штампах із компенсаційними порожнинами, особливо на заключному етапі процесу, не лише кількісно, а й якісно відрізняються від традиційного штампування поруватих

заготовок у закритому штампі. У зв'язку з цим, більшість параметрів процесу, що описують деформацію в закритих штампах, як правило, не можуть бути справедливими для відкритого штампування.

Вищенаведене обумовлює доцільність розробки розрахункових моделей для опису процесів ущільнення та формозміни пористих заготовок при використанні схем відкритого штампування та дослідження впливу основних технологічних параметрів процесу на характер розподілу поруватості та напружено-деформованого стану матеріалу поковки на різних етапах деформації.

Так, зокрема, в [19], [20] була запропонована розрахункова модель, побудована на основі варіаційного принципу, а як чисельний метод реалізації моделі використаний метод проникних елементів.

Результати моделювання з використанням запропонованої моделі показали, що при відкритому штампуванні ущільнення різних зон поковки на різних етапах процесу деформації суттєво нерівномірне та значною мірою залежить від вихідних технологічних параметрів. При цьому, в кожному конкретному випадку необхідно вибирати оптимальні співвідношення вихідної поруватості заготовки і початкового зазору між напівматрицями, що забезпечують як повне доущільнення заготовки в крайній нижній точці повзуна преса до моменту початку інтенсивного видавлювання матеріалу в облої, так і мінімальну величину облою.

Метою даної роботи є аналіз еволюції зміни деформованого стану заготовок, енергосилових параметрів процесу і розподілу поруватості по об'єму заготовки на всіх етапах штампування циліндричних поковок у відкритому штампі з використанням числового методу скінчених елементів.

Методика числового експерименту

В якості розрахункової схеми для моделювання процесу застосовували схему відкритого штампування, наведену на рис. 1. Особливістю схеми є те, що штампування у відкритих штампах характеризується наявністю зазору висотою h між верхньою 1 та нижньою 2 напівматрицями, що змінюється від початкового значення h_0 до кінцевого h , в який на заключному етапі деформування витісняється надлишок матеріалу заготовки (облої) 3.

Моделювання процесу гарячого штампування проводили методом скінчених елементів [21] з використанням елементів дискретизації у вигляді ізопараметричних чотирикутних блоків з білінійною функцією форми 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 [22], [23]:

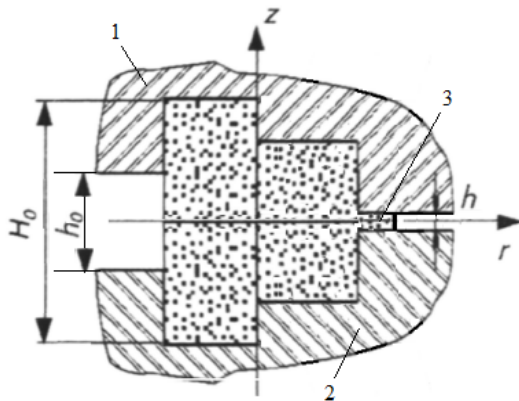


Рис. 1. Схема деформації поруватої заготовки при штампуванні у відкритому штампі

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

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 відповідно, які визначаються як:

$$p = (\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\phi) / 3;$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_z - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_r - \sigma_\phi)^2 + 6\tau_{rz}^2} \quad (2)$$

В результаті моделювання визначали розподіл по осьовому перерізу заготовки відносної щільності ρ , осьової ϵ_z та радіальної ϵ_r деформацій і інтенсивності деформацій ϵ_i :

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \int_0^t \sqrt{(\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_\phi)^2 + (\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\phi)^2 + \frac{3}{2} \dot{\gamma}_{rz}^2} dt \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}, \dot{\epsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}, \dot{\epsilon}_{\phi r} = \frac{V_r}{r}, \dot{\gamma}_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \quad (4)$$

де, V_r та V_z – радіальна та осьова компоненти вектору швидкостей, а також характер зміни загального зусилля деформування $P_{ум}$. (кН) в процесі штампування, а також характер його зміни.

В якості вихідних заготовок приймалися пресо-вки циліндричної форми з вихідною поруватістю 20%, які були спресовані з порошку алюмінієвого сплаву Al-2024 (аналог Д16Т). Діаметр порожнини матриці становить 45 мм. Температура нагріву заготовок під штампування – 450°C, температура матриці – 40°C. Швидкість руху верхнього деформуючого пуансону 2 складала 0,6 м/с. Коефіцієнт тертя між заготовкою і інструментом приймали рівним 0,3.

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

Результати моделювання та їх обговорення

Відомо, що для розробки технологічного процесу гарячого штампування поруватих заготовок важливе значення має інформація щодо співвідношення між ущільненням та формозміною на кожному етапі процесу [11]. Аналіз отриманих результатів моделювання дозволив виявити основні закономірності процесів штампування поруватої заготовки у відкритому штампі.

Як показали результати моделювання, на початкових стадіях процесу штампування у відкритому штампі відбувається помітне ущільнення заготовки, тоді як радіальна течія матеріалу (зокрема - в зоні вільної бокової поверхні) майже відсутня (рис. 2 а, б). Помітна течія металу в зону облойної канавки починається лише при досягненні матеріалом поковки середньої відносної поруватості, що перевищує 90% (рис. 2 в).

На кінцевій стадії процесу поковка ущільнюється до практично безпористого стану. При цьому відбувається інтенсивне витікання її надлишкової маси в облойну канавку (рис. 2 з).

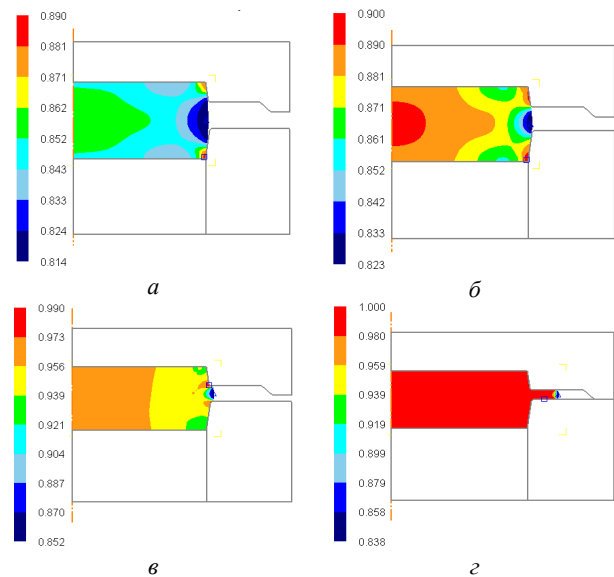


Рис. 2. Розподіл відносної щільності по перерізу заготовки на різних стадіях деформації: а) на початку процесу; б-в) проміжні стадії; з) в кінці процесу

Відзначена закономірність досить близько узгоджується з відомими даними щодо результатів численних експериментальних досліджень вільної осадки поруватої заготовки, які показують, що ущільнення при гарячій осадці більш інтенсивне на початковій стадії деформації при відносно високій поруватості заготовки, а поперечна течія металу та цій стадії майже відсутня [25]–[28]. Так, за даними роботи [28], зменшення поруватості заготовки на 50% на початковому етапі осадки супроводжується лише 5%-ним збільшенням її діаметра.

Оцінка характеру розподілу осьової деформації ϵ_z по перерізу заготовки на різних стадіях деформації показала, що на початкових етапах процесу в центральних шарах поковки, рівновіддалених від верхньої та нижньої поверхонь порожнини штамп, формується зона з підвищеними рівнями значень ϵ_z (рис. 3 *a, б*). В той же час в верхній і нижній зонах поковки, наближених до кутів, формуються застійні зони з мінімальними значеннями ϵ_z (рис. 3 *б*).

Подібний характер розподілу осьових деформацій по перерізу поковки залишається на протязі і наступних стадій процесу (рис. 3 *в, г*), однак на кінцевій стадії штампування, що супроводжується витіканням надлишку матеріалу в облой, дещо зменшується товщина контактуючих з торцевими поверхнями порожнини штамп шарів поковки із зменшенням рівнем значень осьової деформації (рис.3 *г*). Максимальні значення ϵ_z очікувано спостерігаються в зоні облою та в невеликому об'ємі поковки, контактуючих з нею.

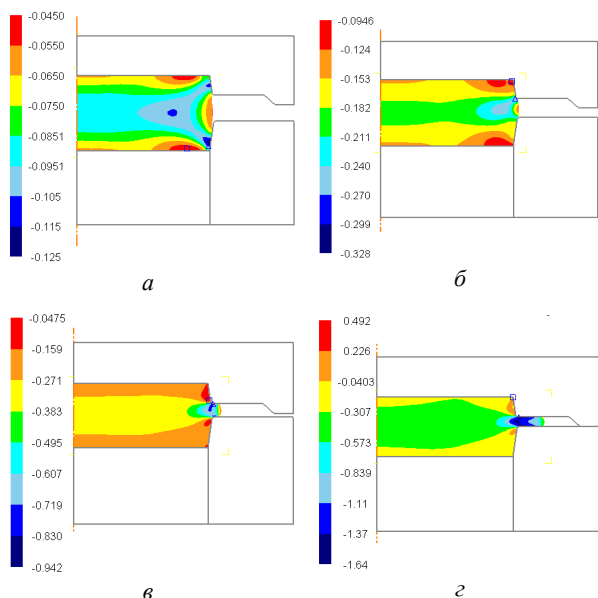


Рис. 3. Розподіл осьових деформацій по перерізу заготовки на різних стадіях процесу: *a*) на початку процесу; *б–в*) проміжні стадії; *г*) в кінці процесу

На відміну від осьових деформацій, які в об'ємі поковки на протязі всього процесу штампування мають від'ємні значення (що характеризують деформації стиску), радіальні деформації ϵ_r у переважній частині об'єму відзначаються позитивними їх значеннями, що вказує на деформації розтягу (рис. 4). При цьому, на початкових стадіях процесу в об'ємі поковки формується суттєво нерівномірна картина розподілу значень ϵ_r в радіальному напрямку. Максимальні значення ϵ_r спостерігаються в зоні, яка межує з вільною боковою поверхнею заготовки. По мірі віддаленості від цієї поверхні в доцентровому напрямку величини ϵ_r змен-

шуються, а їх мінімальні значення (близькі до нуля) проявляються в верхній та нижній кутових застійних зонах (рис. 4 *a, б*).

З початком видавлювання надлишку матеріалу в облой величина радіальної деформації в центральних (по висоті) горизонтальних шарах поковки (приблизно рівновіддалених від верхньої та нижньої торцевих поверхонь порожнини матриці) помітно збільшується, тоді як в кутових та центральних областях поковки, межуючих з торцевими поверхнями порожнини штамп, залишається об'єм зон з мінімальними значеннями ϵ_r (рис. 4 *в, г*).

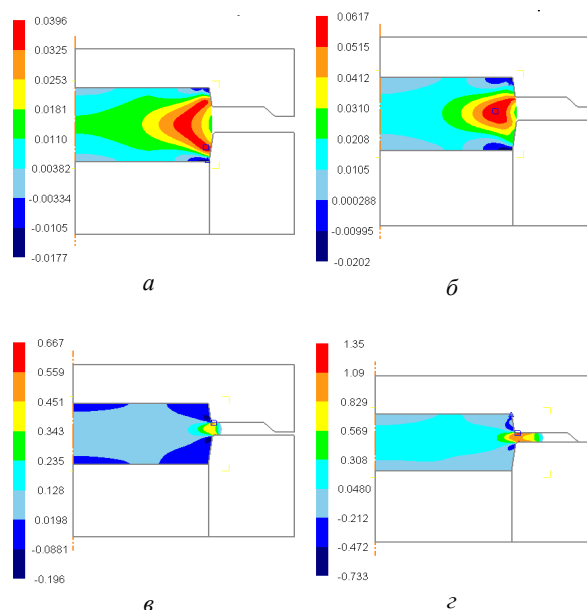


Рис. 4. Розподіл радіальної деформації по перерізу заготовки на різних стадіях деформації: *a*) на початку процесу; *б–в*) проміжні стадії; *г*) в кінці процесу

Наведений вище характер розподілу осьових та радіальних деформацій призводить також до формування відповідної картини розподілу інтенсивності деформацій ϵ_i на різних стадіях деформування поковки (рис. 5). На початковій стадії процесу максимальні значення інтенсивності деформацій характерні для зони поковки, що межує з її боковою вільною поверхнею, тоді як кутові застійні зони відзначаються мінімальними значеннями ϵ_i (рис. 5 *a*). На наступних стадіях формується також центральна зона поковки з підвищеним рівнем значень ϵ_i (рис. 5 *б, в*), а на кінцевій стадії штампування відбувається помітне усереднення значень інтенсивності деформацій по об'єму поковки в діапазоні 0,27–0,54 (рис. 5 *г*).

Графік залежності зусилля деформування від переміщення пуансона (рис. 6) відзначається наявністю щонайменше трьох характерних ділянок. Перша початкова стадія процесу (при переміщенні пуансона Δz

до $\sim 0,5$ мм) включає пружну складову деформації та стадію заповнення бокових технологічних зазорів в порожнині матриці. На другій стадії спостерігається монотонний ріст зусилля деформування, що характеризує ущільнення матеріалу поковки заготовки за відсутності помітної радіальної течії матеріалу (в зоні вільної бокової поверхні) в облойну канавку ($\Delta z \approx 0,5-2,0$ мм). Після досягнення матеріалом поковки середньої відносної густини, що перевищує 90% (рис. 2 в) починається стадія видавлювання надлишку матеріалу поковки в облойну канавку, що обумовлює різкий стрибок інтенсивності наростання зусилля ($\Delta z \approx 2,5-3,5$ мм).

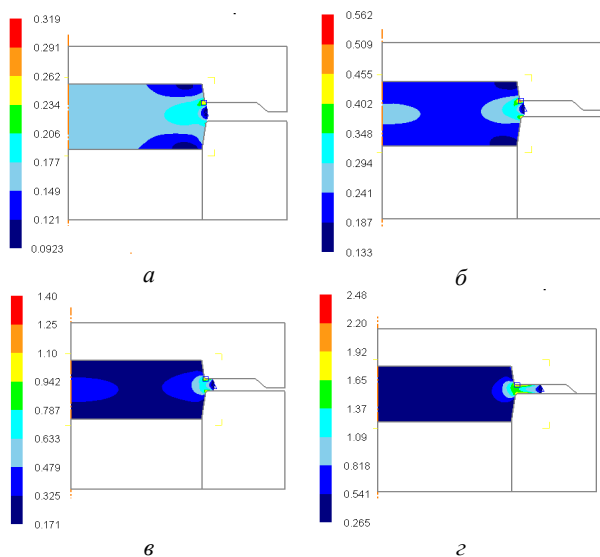


Рис. 5. Розподіл інтенсивності деформації по перерізу заготовки на різних стадіях процесу: а) на початку процесу; б-в) проміжні стадії; з) в кінці процесу

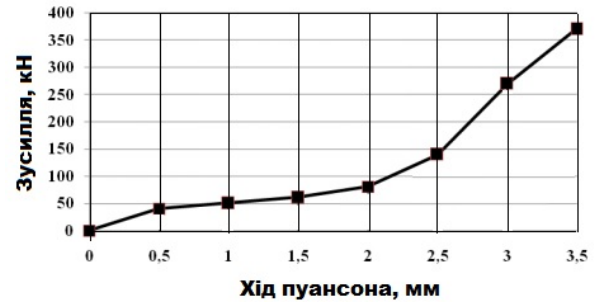


Рис. 6. Залежність зусилля деформування від ходу пуансона Δz

Висновки

1. На початковій стадії процесу відбувається помітне ущільнення заготовки, тоді як радіальна течія матеріалу практично відсутня. Помітна течія металу в зону облойної канавки починається лише при досягнення матеріалом поковки середньої відносної густини, що перевищує 90%.

2. Характер розподілу по об'єму поковки осьових ε_z та радіальних ε_r деформацій суттєво відрізняються між собою. Тоді як зона з підвищеними рівнями значень осьових деформацій формується в центральному шарі поковки, рівновіддаленому від верхньої та нижньої поверхонь порожнини штампу, то значення радіальних деформацій зменшуються по мірі віддаленості від зони, яка межує з вільною боковою поверхнею заготовки в радіальному (доцентровому) напрямку. Мінімальні значення ε_z та ε_r проявляються в верхній та нижній куткових застійних зонах поковки.

References

- [1] Yu. G. Dorofeev *et al.*, *Industrial technology of hot pressing of powder products*, Mocsow: Metallurgy, 1990, 206 p.
- [2] V. M. Gorokhov, E. A. Doroshkevich, A. M. Efimov and E. V. Zvonarev, *Volumetric stamping of powder materials*, Minsk: Navuka and technology, 1993, 272 p.
- [3] A. A. Hendrickson, P. M. Machmeier and D. W. Smith, "Impact forging of sintered steel preforms," *Powder Metallurgy*, Vol. 43, No. 4, pp. 327–344, 2000, doi: 10.1179/003258900666050.
- [4] J. W. Qui *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of titanium alloy connecting rod made by powder forging process", *Materials and Design*, Vol. 33, pp. 213–219, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.07.034.
- [5] G. Sutradhar, A. K. Jha and S. Kumar, "Production of sinter-forged components," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 41, pp. 143–169, 1994, doi: 10.1016/0924-0136(94)90058-2.
- [6] G. Brown, "The powder-forging process: a review of the basic concept and development prospects," *Powder Metallurgy*, 14(27), pp. 124–143, 1971, doi: 10.1179/pom.1971.14.27.010.
- [7] E. Ilija *et al.*, "Benchmarking the industry: powder forging makes a better connecting rod", *SAE Trans*, pp. 340–352, 2005, doi: 10.4271/2005-01-0713.
- [8] S. Wang, Y. K. Wu, H. L. Wang and F. Jiang, "Investigation on the hot deformation behaviour of sintered and forged specimens to improve the forging safety of powder forged products", *Powder Metallurgy*, 2021, doi: 10.1080/00325899.2021.1892990.
- [9] G. A. Bagliuk, "Increasing the efficiency of compaction of porous blanks due to intensification of shear deformations", *Rheology, structure, properties of powder and composite materials. Collection of sciences*. 2004. pp. 35–48.

- [10] V. A. Pavlov, M. I. Nosenko, "Effect of the stress-strain state on the densification of metal powders (powder preforms) during hot forging," *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 31, pp. 103–107, 1992, doi: 10.1007/BF00794041.
- [11] H. F. Fischmeister, B. Arén and K. E. Easterling, "Deformation and densification of porous preforms in hot forging," *Powder Metallurgy*, Vol. 14, No. 27, pp. 144–163, 2014, doi: 10.1179/pom.1971.14.27.011.
- [12] V. A. Pavlov and M.I. Nosenko, "Effect of hot working on the formation of structure and properties in sintered metals," *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 27, pp. 103–107, 1988, doi: 10.1007/BF00802731.
- [13] R. C. Buckingham, C. Argyrakis, M. C. Hardy and S. Biroasca, "The effect of strain distribution on microstructural developments during forging in a newly developed nickel base superalloy," *Materials Science & Engineering*, Vol. 654, pp. 317–328, 2016, doi: 10.1016/j.msea.2015.12.042.
- [14] G. A. Baglyuk, "Influence of deformation parameters on the structure and properties of hot-stamped powder materials," *Processing of materials by pressure*, No. 1 (26), pp. 139–145, 2011.
- [15] Y. A. Shishkina *et al.*, "Effect of the Deformation Scheme on the Structure and Properties of Hot-Forged Aluminum-Matrix Composites," *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 55, pp. 5–11, 2016, doi: 10.1007/s11106-016-9773-4.
- [16] V. Yu. Dorofeev and S. N. Egorov, *Interparticle fusion during the formation of powder hot-deformed materials*, Moscow: ZAO Metallurgizdat, 2003, 152 p.
- [17] G. A. Baglyuk, "Comparison of the power parameters in the hot-pressing of porous semifinished products with different schemes of deformation," *Powder Metall Met Ceram*, 37, pp. 467–470, 1998, doi: 10.1007/BF02675805.
- [18] E. I. Semenov Ed., "Hot stamping," in *Forging and stamping: Handbook*. 4 vol., Vol. 2, 1986.
- [19] G. A. Baglyuk and V. L. Yurchuk, "Calculation of the plastic flow of a porous material in open-die stamping," *Powder Metall Met Ceram*, 36, pp. 353–358, 1997, doi: 10.1007/BF02675992.
- [20] G. A. Baglyuk, "Modeling deformation of a porous blank in open-die forging," *Powder Metall Met Ceram*, 36, pp. 459–461, 1997, doi: 10.1007/BF02680491.
- [21] Sh. Kobayashi, S.-I. Oh and T. Altan, *Metal forming and the finite-element method*, New York, Oxford: Oxford University Press, 1989, 377 p, doi: 10.1016/0020-7403(76)90030-8.
- [22] S. Shima and M. Oyane, "Plasticity Theory for Porous Metals," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 18, pp. 285–291, 1976.
- [23] A. R. Khoei, *Computational Plasticity in Powder Forming Processes*, Elsevier Science, 2005, 449 p.
- [24] G. E. Goncharenko, E. P. Filipovich and E. A. Doroshkevich, "Study of the process of upsetting sintered billets," *Metallurgy*, Minsk, Issue 8, pp. 151–155, 1976.
- [25] G. A. Baglyuk, "Free upset of heated porous cylindrical samples," *Powder metallurgy*, No. 7, pp. 33–37, 1988, doi: 10.1007/BF00799984.
- [26] H. Fischmeister, B. Aren and K. Easterling, "Deformation and densification of porous preforms in hot forging," *Powder Metall*, Vol. 14(27), pp. 144–163, 1971, doi: 10.1179/pom.1971.14.27.011.
- [27] T. Guest, M. Negm and R. Davies, "Metal flow and densification in the die-forging of porous preforms", *Powder Metall*, Vol. 16(32), pp. 314–326, 1973, doi: 10.1179/pom.1973.16.32.009.

The evolution of the compaction process and the deformed state of porous blanks during their hot forging in the open die

G.A. Bagliuk¹ • S.F. Kyrliuk¹

¹ Institute for Problems of Materials Science NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. The article presents the results of the study of the evolution of the deformed state of the workpieces, the energetic parameters of the process and the distribution of porosity over the volume of the forging at all stages of hot forging of porous powder forgings in an open die. Modeling of the process was carried out using the finite element method using the DEFORM 2D/3D software complex. As a result of the simulation, it was found that at the initial stage of the process, the blank is mainly compacted with minimal radial flow of the material. Noticeable flow of metal into the groove groove area begins only when the forging material reaches an average relative density exceeding 90%. A significantly different nature of the distribution of axial ϵ_r and radial ϵ_z deformations over the volume of the forging was noted. A zone with increased levels of values of axial deformations is formed in the central layer of the forging, equidistant from the upper and lower surfaces of the die cavity, and the values of radial deformations decrease with distance from the zone bordering the free side surface of the workpiece in the radial (to-center) direction. The minimum values of ϵ_z and ϵ_r appear in the upper and lower angular stagnant zones of the forging. It is shown that the graph of the dependence of the deformation force on the displacement of the punch is marked by the presence of at least three characteristic sections due to the relationship between the processes of compaction and forging shape change at each stage of the process.

Keywords: powder metallurgy, hot forging, deformation, density, modeling, finite element method, forging.