

УДК 621.762

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-3-17-24

## Численный анализ процесса объемной штамповки пористых заготовок в штампе с реализацией активных сил трения

© 2020 г. Г.А. Баглюк, С.Ф. Кирилюк

Институт проблем материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины, г. Киев

Статья поступила в редакцию 05.01.19 г., доработана 06.02.20 г., подписана в печать 19.03.20 г.

**Аннотация:** Приведены результаты моделирования процесса горячей штамповки пористых порошковых заготовок в штампе, обеспечивающем действие активных сил трения по боковой поверхности деформируемой заготовки, которые реализуются за счет внутренних связей системы матрица–материал. Изучалась эволюция распределения относительной плотности по сечению заготовки на разных стадиях деформации, напряженно-деформированного состояния и общего усилия деформации при варьировании граничных условий нагружения путем изменения усилия начального сжатия упругих элементов, препятствующих смещению матрицы. Показано, что в результате действия активных сил трения в периферийной области поковки, прилегающей к внутренней боковой поверхности матрицы, наблюдаются участки с существенно более высокой интенсивностью деформаций по сравнению с деформациями в центральной части объема заготовки. При этом объем области повышенной интенсивности деформаций и максимальные значения деформации возрастают с уменьшением усилия начального сжатия пружин и, соответственно, с увеличением величины смещения матрицы в процессе деформации. Реализация автоперемещения матрицы за счет внутренних связей системы матрица–материал приводит к снижению общего усилия деформации, причем с уменьшением величины смещения матрицы в процессе деформации усилие деформации растет.

**Ключевые слова:** штамповка, моделирование, пористое тело, деформация, уплотнение, усилие, трение.

**Баглюк Г.А.** – докт. техн. наук, акад. НАН Украины, проф., зам. директора по научной работе Института проблем материаловедения НАН Украины (02180, Украина, г. Киев, ул. Кржижановского, 3). E-mail: gbag@ukr.net.

**Кирилюк С.Ф.** – аспирант Института проблем материаловедения НАН Украины. E-mail: psihya@gmail.com.

**Для цитирования:** Баглюк Г.А., Кирилюк С.Ф. Численный анализ процесса объемной штамповки пористых заготовок в штампе с реализацией активных сил трения. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020. No. 3. С. 17–24. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-3-17-24.

## Numerical analysis of porous blank die forging in the die with the implementation of active friction forces

G.A. Bagliuk, S.F. Kyryliuk

Frantsevich Institute for Problems in Material Science of NASU, Kyiv, Ukraine

Received 05.01.2019, revised 06.02.2020, accepted for publication 19.03.2020

**Abstract:** The paper provides the results of simulating the hot die forging of porous powder preforms with active friction forces applied along the lateral surface of the deformable blank by means of internal cohesion in the die-material system. The study covers the evolution of relative density distribution over the blank cross section at different stages of deformation, stress-strain state and total strain force while varying the loading boundary conditions by changing the initial compression force applied to elastic elements that prevent the die from displacement. It is shown that active friction forces acting on the periphery of the forging adjacent to the die inner side result in areas with a significantly higher deformation intensity compared to deformations in the center of the blank volume. At the same time, the volume of the high deformation intensity area and maximum values of deformation increase with a decrease in the spring initial compression force and, accordingly, with an increase in the die displacement value during deformation. Automatic die displacement due to internal cohesion in the die-deformable material system leads to a decrease in the total deformation force, and with a decrease in the die displacement value during deformation, the deformation force increases.

**Keywords:** forging, modeling, porous body, deformation, compaction, force, friction.

**Bagliuk G.A.** – Dr. Sci. (Eng.), Acad. of NASU, Prof., Deputy director of the Frantsevich Institute for Problems in Material Science of NASU (02180, Ukraine, Kyiv, Krzhizhanovsky str., 3). E-mail: gbag@ukr.net.

**Kyryliuk S.F.** – Postgraduate student, Frantsevich Institute for Problems in Material Science of NASU. E-mail: psihyha@gmail.com.

**For citation:** Bagliuk G.A., Kyryliuk S.F. Numerical analysis of porous blank die forging in the die with the implementation of active friction forces. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2020. No. 3. P. 17–24 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-3-17-24.

## Введение

Важнейшим направлением совершенствования и интенсификации процессов обработки давлением как сплошных, так и пористых порошковых заготовок является изыскание более эффективных схем пластического деформирования, которые позволяют снизить общие энерго- и трудозатраты на изготовление деталей при улучшении их качества [1–7]. При этом новые подходы в совершенствовании технологических процессов деформирования основываются, как правило, на изменении напряженного состояния заготовки с целью более полного использования пластических свойств металла. Управление напряженным состоянием при этом достигается как за счет существенного изменения граничных и контактных условий, так и в результате дополнительного силового воздействия на заготовку или часть ее, что приводит к изменению напряженно-деформированного состояния в очаге деформации [8–14].

В совершенствовании процессов обработки давлением спеченных пористых заготовок, деформирующего инструмента и технологического оборудования все отчетливее в последнее время проявляется важная роль внешнего трения [15–17]. Трение является одним из основных факторов, определяющих граничные условия технологических процессов прессования, штамповки или экструзии порошковых материалов, так как в значительной мере формирует очаг деформации и обуславливает неравномерность распределения деформации по объему тела. Его роль чрезвычайно велика и существенно характеризует не только энергосиловые и деформационные показатели этих процессов, а в ряде случаев в значительной степени влияет и на структурные параметры получаемых из деформируемых материалов изделий.

В связи с этим, учитывая большие потери энергии на преодоление трения и неоднородность деформации по объему деформируемой заготовки, рациональной становится постановка и решение проблемы использования трения в технологи-

ческих целях [15, 16]. При этом если в борьбе с негативным трением основным является снижение этих сил за счет применения в составе прессуемой шихты пластификаторов, использования смазки элементов пресс-оснастки и др., то при превращении негативного трения в активное задача сводится, прежде всего, к изменению направления сил трения, величина которых в этом случае может быть значительной, что одновременно позволяет в ряде случаев исключить использование смазки.

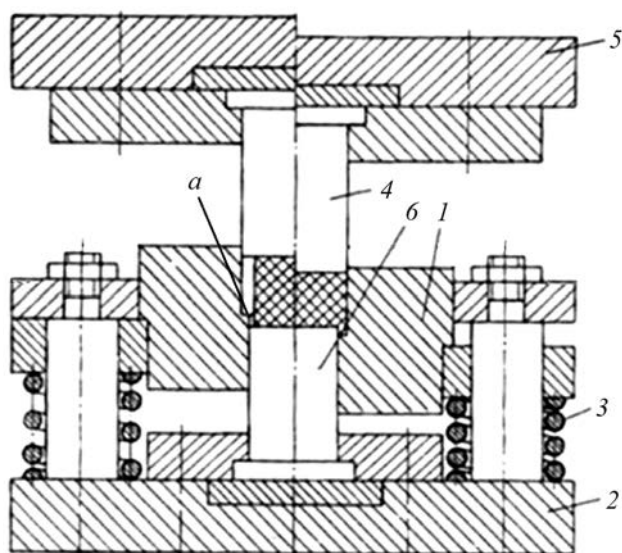
Целью настоящей работы являлось изучение влияния граничных условий схемы нагружения при штамповке пористой заготовки в штампе с реализацией активных сил трения на эволюцию напряженно-деформированного состоянияковки, энергосиловых параметров процесса и распределения пористости по ее сечению на всех этапах деформации.

## Схема процесса и методика численного эксперимента

Ранее в работе [18] была предложена конструкция штампа, в котором реализация активных сил трения осуществляется не принудительно, а за счет внутренних сил системы матрица–деформируемый материал (рис. 1).

Конструкция штампа включает в себя матрицу 1, имеющую в верхней части на внутренней поверхности технологический уступ «а», которая установлена на нижней плите 2 на упругих элементах 3, верхний пуансон 4, закрепленный на верхней плите 5, и нижний пуансон 6.

Работает штамп следующим образом. Перед штамповкой матрица 1 находится в крайнем верхнем положении под действием упругих элементов 3. Внутренний технологический уступ матрицы «а» находится выше или на уровне торцевой поверхности пуансона 6. В процессе уплотнения пористая заготовка осаживается, касается матрицы, и на конечной стадии штамповки материал



**Рис. 1.** Схема штампа для штамповки в условиях реализации активных сил трения [18]  
Пояснения см. в тексте

**Fig. 1.** Die diagram for forging with the implementation of active friction forces [18]  
See explanations in the text

заготовки воздействует на технологический уступ матрицы, вызывая ее движение в направлении действующего усилия деформирования со скоростью большей, чем скорость движения пуансона 4, вследствие значительной разницы площадей сечений пуансона 4 и торцевого уступа матрицы.

Если масса заготовки равна или меньше расчетной массы поковки, доуплотнение заготовки прекращается, когда технологический уступ займет положение на уровне торца нижнего пуансона. В случае наличия избыточного материала в массе заготовки уступ в процессе штамповки сдвигается ниже уровня торца нижнего пуансона.

Наличие в устройстве зазора-компенсатора между боковой поверхностью нижнего пуансона 6 и матрицей создает условия, когда вытесняемый в зазор прессуемый материал не только не препятствует уплотнению, но и за счет воздействия на уступ реализует активное действие сил трения, снижая усилие прессования и износ инструмента.

Очевидно, что за счет изменения размеров технологического уступа и начального усилия сжатия упругих элементов 3 появляется возможность управлять граничными условиями процесса в части регулирования начала и скорости перемещения матрицы в направлении движения деформирующего пуансона.

Вследствие этого можно ожидать соответствующего изменения напряженно-деформированного состояния деформируемой поковки и, соответственно, общего усилия штамповки.

Численная оценка характера влияния граничных условий схемы деформации на эволюцию напряженно-деформированного состояния поковки была проведена с использованием программного комплекса DEFORM 2D/3D.

В качестве реологической модели деформируемой среды при разработке численной модели процесса деформации в данном программном комплексе принята модель жесткопластического пористого тела, материал которого подчиняется условию пластичности вида [19, 20]

$$f(\sigma_{i,j}) = \sigma_i^2 + 6,2(1-\rho)^{1,028} p^2 = \rho^5 \sigma_s^2, \quad (1)$$

где  $\rho$  — относительная плотность пористого материала;  $\sigma_s$  — предел текучести твердой фазы материала при заданных температурно-скоростных условиях деформирования;  $\sigma_i$  — интенсивность напряжений в пористом теле;  $p$  — гидростатическое давление напряжений, которые определяются как

$$p = \frac{\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta}{3}, \quad (2)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 6\tau_{rz}^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

В результате моделирования определяли распределение по осевому сечению заготовки относительной плотности ( $\rho$ ) и интенсивности деформаций ( $\epsilon_i$ ):

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ (\epsilon_{11} - \epsilon_{22})^2 + (\epsilon_{22} - \epsilon_{33})^2 + (\epsilon_{33} - \epsilon_{11})^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

а также характер изменения общего усилия деформации ( $P_{шт}$ , кН) в процессе штамповки при использовании режимов с различными начальными усилиями сжатия пружин.

В качестве исходной заготовки принимали полую цилиндрическую прессовку  $\varnothing 44$  мм, высотой 12,5 мм и исходной пористостью 20 %, спрессованную из порошка алюминиевого сплава Aluminium 2024 (Д16). Диаметр полости матрицы составлял 44 мм.

вил 45 мм; ширина технологического уступа «а» на боковой поверхности матрицы — 1,5 мм; температура нагрева заготовки — 350 °С, температура матрицы — 20 °С. Коэффициент трения между заготовкой и инструментом принимали равным 0,35.

Варьирование граничных условий нагружения осуществляли путем изменения усилия начального сжатия упругих элементов 3 (см. рис. 1): рассматривали 3 варианта с усилиями сжатия пружин  $P_0 = 45, 75$  и 95 кН. Жесткость пружин принимали равной 200 Н/мм.

Учитывая симметричность деформируемой заготовки относительно осей координат, моделирование проводили для половины ее продольного сечения.

## Результаты и их обсуждение

Как показали результаты моделирования, на начальной стадии деформации происходит свободная осадка заготовок до момента касания со стенками матрицы. При этом по объему заготовки формируется заметная разнотекстурность: тогда как ее центральная часть уплотнена до 88–90 %, относительная плотность периферийных участков заготовки составляет лишь 82–84 % (рис. 2, а).

При достижении основной частью объема заготовки плотности 92–95 % усилие, возникающее в результате воздействия уплотняемого материала на технологический уступ «а», преодолевает усилие начального сжатия упругих элементов и матрица смещается в направлении движения деформирующего пуансона (рис. 2, б).

С увеличением степени осевой деформации центральная зона поковки приобретает практически беспористое состояние, тогда как в периферийной области, и особенно в зоне, прилегающей к технологическому уступу «а», наблюдается наличие значительной остаточной пористости (до 7 %) (рис. 2, в), которая устраняется на конечном этапе процесса, сопровождающемся сдвигом матрицы вниз и выдавливанием избытка материала в компенсационную щель (рис. 2, г).

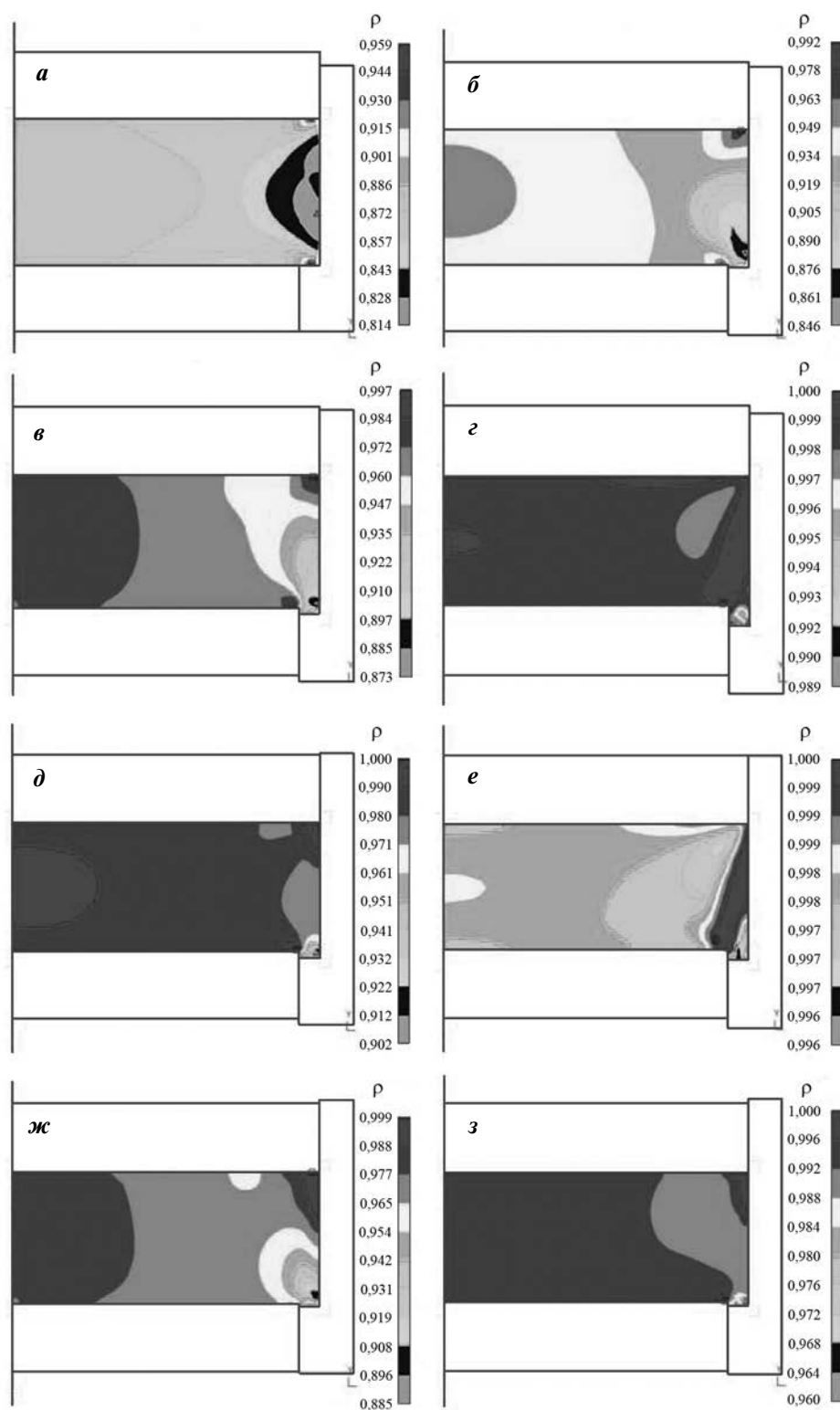
С повышением усилия начального сжатия ( $P_0$ ) упругих элементов 3 (см. рис. 1) до 75 и 95 кН перемещение матрицы за счет воздействия уплотняемого материала на технологический уступ «а» начинается при значениях относительной плотности основного объема заготовки около 99 % (рис. 2, д, з), а общая величина смещения матрицы в осевом направлении снижается с увеличением зна-

чения  $P_0$ . При этом для варианта с максимальным начальным усилием пружины (95 кН) матрица практически неподвижна (ее смещение не превышает ~0,6 мм).

Вариации кинематики движения элементов рабочей штамповой оснастки в процессе штамповки ожидаемо приводят и к изменению компонентов тензора деформаций по сечению поковки для различных вариантов технологических режимов штамповки. Оценка величины интенсивности деформаций ( $\epsilon_i$ ) показала, что для всех рассматриваемых режимов штамповки в преобладающей части объема поковки ее значения находятся в пределах 0,35–0,38, тогда как в периферийной области, прилегающей к внутренней боковой поверхности матрицы, наблюдаются участки с существенно более высокой интенсивностью деформаций (до 0,45–0,61), обусловленной реализацией активных сил трения (рис. 3). Обращает на себя внимание то, что объем области повышенной интенсивности деформаций и максимальные значения  $\epsilon_i$  заметно возрастают с уменьшением усилия начального сжатия пружин и, соответственно, с увеличением величины смещения матрицы в процессе деформации.

Отмеченная закономерность является крайне положительной с технологической точки зрения, так как вследствие реализации активных сил трения обеспечивается лучшая проработка приграничных слоев штампуемой заготовки, вследствие чего не только практически устраняется пористость в этих объемах и улучшается качество поверхности изделий, но и происходят диспергирование зеренной структуры и повышение прочности качественного металлического контакта между частицами материала за счет усиления межзеренных диффузионных процессов, разрыва адсорбированных межчастичных пленок оксидов, сульфидов и неметаллических включений в процессе пластического деформирования с локальными интенсивными сдвиговыми деформациями [8, 21].

Показательным с технологической точки зрения является также положительное влияние активных сил трения на энергосиловые параметры процесса. Как показали результаты оценки изменения усилия штамповки для режимов с различными начальными усилиями сжатия упругих элементов (рис. 4), на начальном и промежуточном этапах деформации (при неподвижной матрице) зависимости величины  $P_{шт}$  от хода деформирую-

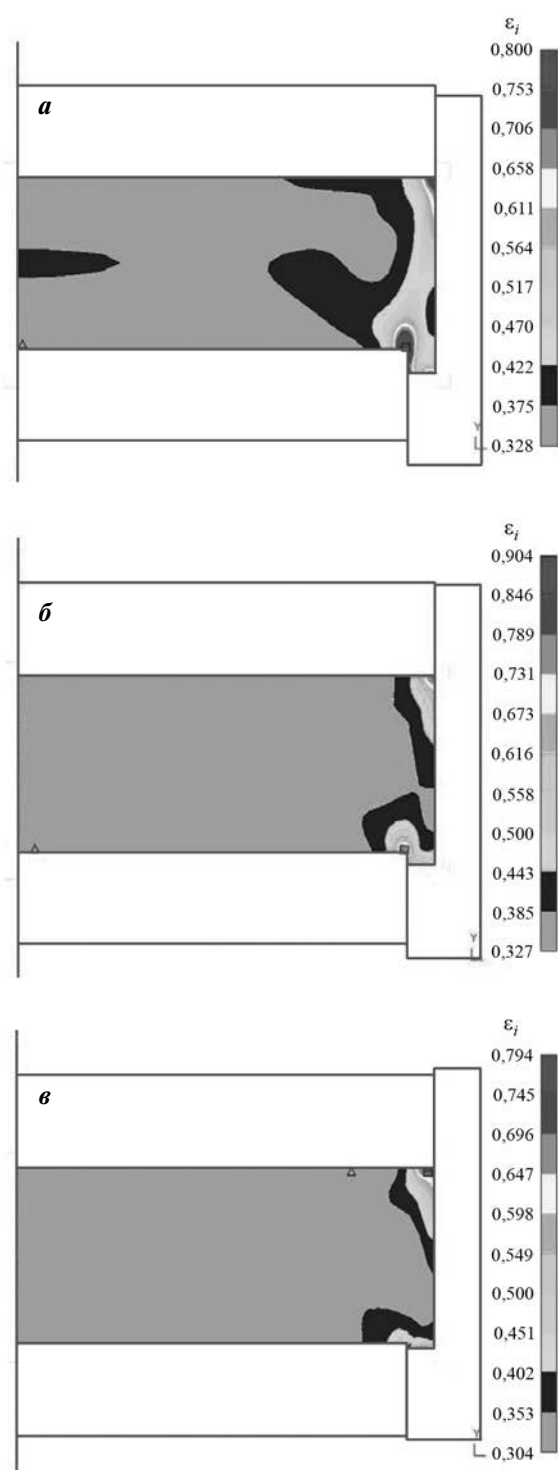


**Рис. 2.** Распределение относительной плотности по сечению поковки

Начальные (*а, б*), промежуточные и конечные (*в–з*) этапы деформации для режимов с различными исходными усилиями сжатия пружин:  $P_0 = 45$  кН (*а–г*), 75 кН (*д, е*) и 95 кН (*ж, з*)

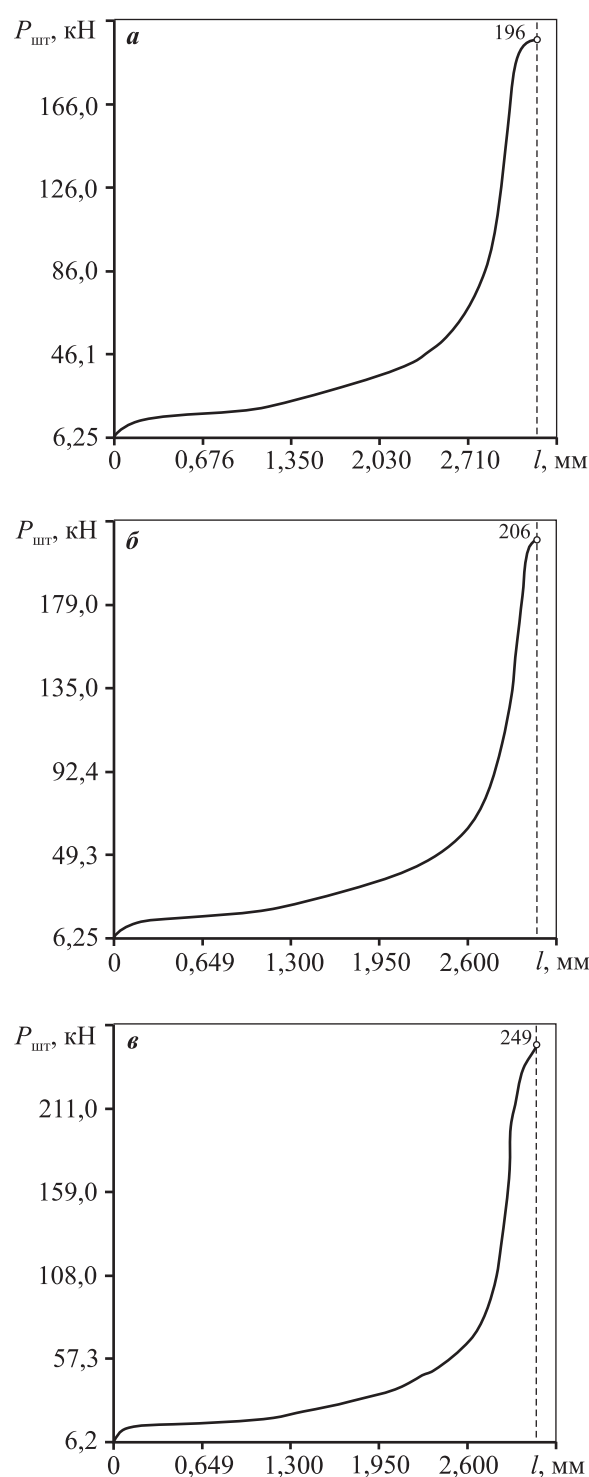
**Fig. 2.** Relative density distribution over the forging cross section

Initial (*a, b*), intermediate and final (*v–z*) deformation stages for modes with different initial spring compression conditions:  $P_0 = 45$  kN (*a–g*), 75 kN (*d, e*) and 95 kN (*zh, z*)



**Рис. 3.** Распределение интенсивности деформаций по сечению поковки для режимов с различными начальными усилиями сжатия пружин  $P_0 = 45$  кН (а), 75 кН (б), 95 кН (в)

**Fig. 3.** Deformation intensity distribution over the forging cross section for modes with different initial spring compression conditions  $P_0 = 45$  кН (а), 75 кН (б), 95 кН (в)



**Рис. 4.** Графики изменения усилий в процессе штамповки с различными начальными усилиями сжатия пружин

а –  $P_0 = 45$  кН, б – 75 кН, в – 95 кН

**Fig. 4.** Curves showing force variation during forging with different initial spring compression forces

а –  $P_0 = 45$  кН, б – 75 кН, в – 95 кН

шего пуансона ( $l$ ) практически идентичны. В то же время величины усилия сжатия упругих элементов и, соответственно, перемещения матрицы в направлении приложения деформирующего усилия оказывают существенное влияние на максимальные значения  $P_{шт}$ . Так, если для режима с начальным усилием сжатия пружин  $P_0 = 45$  кН значение  $P_{шт} = 196$  кН, а для промежуточного режима ( $P_0 = 75$  кН)  $P_{шт} = 206$  кН, то в случае с максимальным начальным сжатием упругих элементов ( $P_0 = 95$  кН) усилие штамповки возрастает уже до 249 кН, что объясняется как снижением затрат усилия, необходимого для преодоления сил трения между матрицей и уплотняемым материалом, так и действием активных сил трения, которые реализуются за счет внутренних связей системы матрица—материал.

## Выводы

1. Результаты моделирования показали эффективность применения предложенной конструкции штампа, обеспечивающей автосмещение матрицы в направлении движения деформирующего инструмента на заключительной стадии штамповки, инициирующее действие активных сил трения, которые реализуются за счет внутренних связей системы матрица—материал.

2. С увеличением усилия начального сжатия ( $P_0$ ) упругих элементов перемещение матрицы за счет воздействия уплотняемого материала на технологический уступ начинается при больших значениях относительной плотности заготовки, а величина смещения матрицы в осевом направлении при этом снижается.

3. В результате инициируемого воздействием уплотняемого материала на технологический уступ перемещения матрицы и формирования компенсационной полости на заключительной стадии деформации в периферийной области, прилегающей к внутренней боковой поверхности матрицы, наблюдаются участки с существенно более высокой интенсивностью деформаций ( $\epsilon_p$ ) по сравнению с деформациями в центральной части объема заготовки. При этом объем области повышенной интенсивности деформаций и максимальные значения  $\epsilon_p$  возрастают с уменьшением усилия начального сжатия пружин и, соответственно, с увеличением величины смещения матрицы в процессе деформации.

4. Реализация автоперемещения матрицы за

счет внутренних связей системы матрица—материал приводит к снижению общего усилия деформации, причем с уменьшением величины смещения матрицы в ходе деформации усилие деформации растёт.

## Литература/References

1. Dixit U.S., Joshi S.N., Davim J.P. Incorporation of material behavior in modeling of metal forming and machining processes: A review. *Mater. Design*. 2011. Vol. 32. P. 3655—3670.
2. Narayanasamy R., Ramesh T., Pandey K.S. Some aspects on cold forging of aluminium—iron powder metallurgy composite under triaxial stress state condition. *Mater. Design*. 2008. Vol. 29. P. 891—903.
3. Baglyuk G. Densification and shape change of porous billets in closed and open dies. In: *Recent Developments in Computer Modeling of Powder Metallurgy Processes*. IOS Press. NATO Sci. Ser. 2001. P.163—168.
4. Горохов В.М., Дорошкевич Е.А., Звонарев Е.В. Уплотнение и формоизменение порошковых материалов при горячем прессовании в условиях неоднородного напряженно-деформированного состояния. *Порошковая металлургия*. 1984. No. 5. С. 100—105. Gorokhov V.M., Doroshkevich E.A., Zvonarev E.V. Compaction and shaping of powder materials during hot pressing in conditions of non-uniform stress-strain state. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1984. No. 5. P. 100—105 (In Russ.).
5. Баглюк Г.А., Хоменко А.И. Особенности деформированного состояния пористых заготовок при их закрытой и открытой горячей штамповке. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2015. No. 1. С. 57—62. Bagliuk G.A., Khomenko A.I. Features of the deformed state of porous blanks with their closed and open hot forging. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2015. No. 1. P. 57—62 (In Russ.).
6. Qiu J.W., Liu Y., Liu B., Liu Y.B. Optimizing the hot-forging process parameters for connecting rods made of PM titanium alloy. *J. Mater. Sci*. 2012. Vol. 47. P. 3837—3848. DOI: 10.1007/s10853-011-6239-4.
7. Narayanasamy R., Senthilkumar V., Pandey K.S. Some aspects on hot forging features of P/M sintered iron preforms under various stress state conditions. *Mech. Mater*. 2006. Vol. 38. P. 367—386.
8. Баглюк Г.А. Влияние деформационных параметров на структуру и свойства горячештампованных порошковых материалов. *Обработка материалов давлением*. 2011. No. 1 (26). С. 139—145. Bagliuk G.A. Influence of deformation parameters on the structure and properties of hot-forged powder materials.

- Obrabotka materialov davleniem*. 2011. No. 1 (26). P. 139—145 (In Russ.).
9. Цыркин А.Т., Рябичева Л.А., Любчик К.В., Рябовол Т.А. Влияние противодавления на качество изделий при прямом выдавливании порошковых пористых заготовок. В кн: *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні*. Луганск: Изд-во СНУ им. В. Даля, 2009. С. 20—26.  
*Tsirkin A.T., Riabicheva L.A., Liubchich K.V., Riabovol T.A.* The influence of back pressure on the quality of products in the direct extrusion of powder porous blanks. In: *Resur-sozberigayuchi tekhnologii virobnitstva ta obrobki tiskom-materialiv u mashinobuduvanni*. Lugansk: SNU, 2009. P. 20—26 (In Russ.).
  10. Buckingham R. C., Argyrakis C., Hardy M. C., Biroscas S. The effect of strain distribution on microstructural developments during forging in a newly developed nickel base superalloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2016. Vol. 654. P. 317—328.
  11. Ma Q., Lin Z.-Q., Yu Z.-Q. Prediction of deformation behavior and microstructure evolution in heavy forging by FEM. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2009. Vol. 40. P. 253—260.
  12. Bontcheva N. Microstructure evolution during metal forming processes. *Comput. Mater. Sci.* 2003. Vol. 28. P. 563—573.
  13. Das S., Klotz M., Klocke F. EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses. *J. Mater. Process. Technol.* 2003. Vol. 142. P. 434—451.
  14. Jeong H.S., Cho J.R. Microstructure prediction of Nimonic 80A for large exhaust valve during hot closed die forging. *J. Mater. Process. Technol.* 2005. Vol. 162. P. 504—511.
  15. Охрименко Я.М. Полезное действие трения в процессах штамповки, прессования и выдавливания. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1981. No. 6. С. 17—20.  
*Okhrymenko Ya.M.* The beneficial effect of friction in the processes of forging, pressing and extrusion. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 1981. No. 6. P. 17—20 (In Russ.).
  16. Баглюк Г.А. Усовершенствование процессов деформирования порошковых материалов на основе управления силами контактного трения. *Порошковая металлургия*. 2002. No. 1-2. С. 19—25.  
*Bagliuk G.A.* Improving the processes of powder materials deformation based on the control of contact friction forces. *Poroshkovaya metallurgiya*. 2002. No. 1-2. P. 19—25 (In Russ.).
  17. Manisekar K., Narayanasamy R., Malayappan S. Effect of friction on barreling in square billets of aluminium during cold upset forging. *Mater. Design*. 2006. Vol. 27. No. 2. P. 147—155.
  18. Баглюк Г.А., Мажарова Г.Е. Штамп для штамповки порошковых заготовок с активными силами трения. *Порошковая металлургия*. 1989. No. 4. С. 92—94.  
*Bagliuk G.A., Mazharova G.E.* The die for forging of powder preforms with active friction forces. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1989. No. 4. P. 92—94 (In Russ.).
  19. Shima S., Oyane M. Plasticity theory for porous metals. *Int. J. Mech. Sci.* 1976. Vol. 18. P. 285—291.
  20. Khoei A.R. Computational plasticity in powder forming processes. Elsevier Sci., 2005.
  21. Дорофеев В.Ю., Егоров С.Н. Межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедеформированных материалов. М.: Металлургиздат, 2003.  
*Dorofeev V.Yu., Egorov S.N.* Interparticle concretion during the formation of powder hot-deformed materials. Moscow: Metallurgizdat, 2003 (In Russ.).