

УДК 621.756

Баглюк Г. А.
Хоменко А. И.**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ШТАМПОВКЕ В ЗАКРЫТОМ И ОТКРЫТОМ ШТАМПАХ**

Одним из наиболее эффективных процессов порошковой металлургии, обеспечивающих получение плотных (практически беспористых) изделий, в том числе и сложной формы, является горячая штамповка пористых заготовок. Этот процесс имеет много общего с классическими методами объемной штамповки компактных металлов, однако, наличие пористости обуславливает известные особенности пластического течения пористых материалов, так как, кроме формоизменения, характерного и для беспористых материалов, сопровождается также необратимыми объемными изменениями. В связи с этим, наряду с обычными для компактных материалов условиями течения металла, характеризующимися наличием свободной поверхности в деформируемой заготовке, пористые материалы могут деформироваться в замкнутых объемах, когда нормальные нагрузки на всей поверхности тела являются сжимающими [1, 2].

Именно такая технологическая схема, включающая изготовление заготовки близкой по форме и размерам к поковке и ее последующую горячую допрессовку в закрытом штампе до конечных размеров и плотности простой осадкой без реализации сколь-либо заметных сдвиговых деформаций, нашла значительно более широкое применение в практике порошковой металлургии [1–4]. В значительной степени это обусловлено тем, что при использовании методов штамповки, которые обеспечивают быстрый переход от схемы одноосного сжатия к схеме неравномерного всестороннего сжатия, уменьшается вероятность появления трещин на боковой поверхности заготовок, что особенно важно для пористых материалов, имеющих, как правило, существенно более низкую пластичность по сравнению с компактными сплавами аналогичного состава.

Однако, использование такой схемы штампования предусматривает необходимость довольно точно (в пределах $\pm 2\%$) выдерживать массу исходных прессовок, что достаточно часто сложно реализовать вследствие варьирования технологических свойств порошка (насыпной плотности, текучести, уплотняемости) даже в границах одной партии поставки. Наличие проблем, связанных с уплотнением пористых порошковых заготовок при их штамповке с применением схемы простой допрессовки в закрытом штампе, способствовало более широкому использованию схем открытой или полузакрытой штамповки, широко применяемых в обработке давлением компактных сталей и сплавов [5–8].

Одной из наиболее распространенных схем штамповки компактных материалов является штамповка заготовок в открытых штампах, характеризующаяся переменным зазором между верхней и нижней полуматрицами, в который вытесняется избыток материала заготовки [9, 10]. Отличительной особенностью открытой штамповки является наличие на протяжении всего процесса деформации изменяющегося по высоте участка заготовки со свободной боковой поверхностью, имеющего возможность течения в поперечном направлении. Однако такая схема, несмотря на относительную простоту реализации, не нашла широкого применения в порошковой металлургии вследствие того, что в случае не оптимального выбора конструктивных размеров полости штампа (в частности – толщины облойного мостика) не удавалось получить поковки с высокой плотностью, что резко снижало прочностные и эксплуатационные характеристики материала штампованной детали [6]. Однако, ряд более поздних теоретических [7, 8] и экспериментальных работ [1, 4] подтвердили возможность успешного применения такой схемы для получения поволоков из пористых порошковых заготовок.

В то же время, в известных публикациях отсутствуют сравнительные данные относительно особенностей течения пористого материала в полости штампа при горячей штамповке с использованием различных схем деформации.

Целью данной работы является исследование с использованием метода координатных сеток особенностей деформированного состояния пористых заготовок на разных стадиях деформирования в закрытом и открытом штампах.

Для экспериментального моделирования процесса горячей штамповки пористых заготовок при реализации различных схем деформации был изготовлен штамп, схема которого представлена на рис. 1, а, в котором один из участков пористой заготовки деформировался по схеме открытой штамповки (поз. 1), а противоположный (поз. 2) – закрытой штамповки.

Исходные заготовки высотой 14 мм прямоугольной в плане формы с центральным отверстием прессовали из порошка железа под давлением 600 МПа и спекали в среде проточного водорода при 1150 °С. Начальная пористость спеченных заготовок составляла 30–32 %.

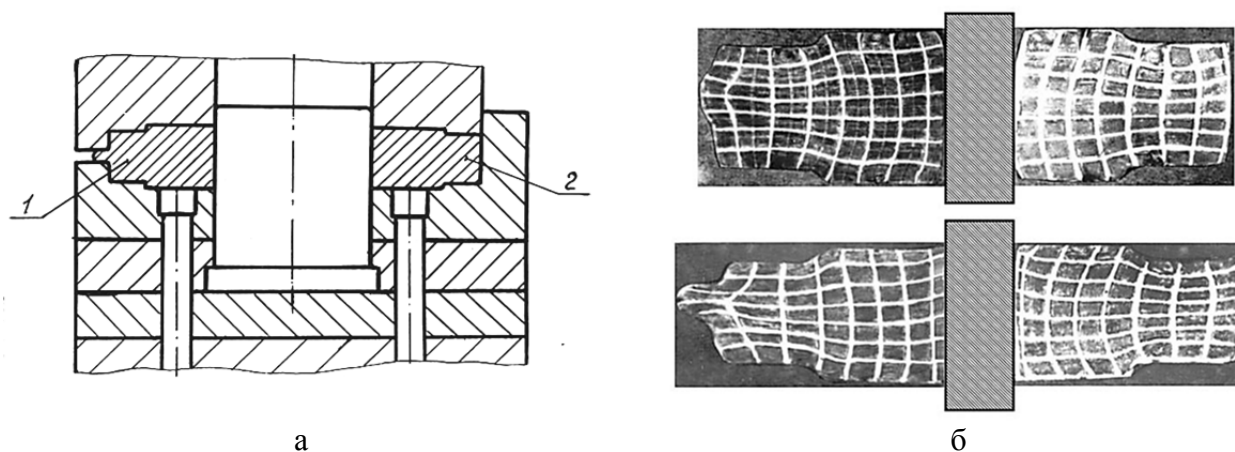


Рис. 1. Схема штампа для горячей штамповки пористых заготовок (а) и внешний вид продольных сечений поволоков с нанесенной координатной сеткой после осадки с разными степенями деформации (б)

Спеченные заготовки разрезали в продольном направлении вдоль оси прессования и на поверхность разреза наносили координатную сетку с размером ячейки 2×2 мм. Затем половинки образцов соединяли точечной сваркой, нагревали в среде проточного аргона до 1150 °С и штамповали на дугостаторном прессе усилием 1600 кН с разными степенями деформации. После каждого этапа деформации половинки образцов разъединяли и копировали изображения координатной сетки деформированных образцов (рис. 1, б) с помощью сканера для ее дальнейшей цифровой компьютерной обработки.

В процессе обработки экспериментальных данных с использованием программного комплекса «Тензор» [11] определяли координаты узлов сетки каждого из образцов, на их основе строили расчетные сетки и рассчитывали для каждой ячейки сетки с угловыми точками A, B, C и D (рис. 2) компоненты тензора деформаций, считая схему деформации плоской.

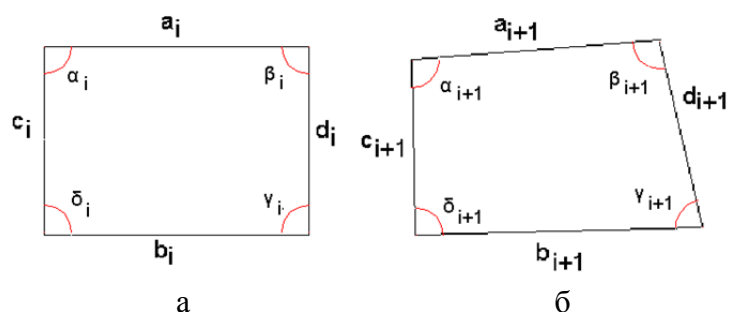


Рис. 2. Расчетная схема ячейки до (а) и после деформации (б)

Расчет производился по следующей схеме. Считая, что на начальном шаге деформации прямоугольная ячейка сетки имела прямоугольную форму со сторонами, равными a_i , b_i , c_i и d_i (рис. 2, а), то на $i + 1$ -м шаге деформации (рис. 2, б) стороны ячейки имели длину a_{i+1} , b_{i+1} , c_{i+1} и d_{i+1} , соответственно. Тогда величины компонентов тензора деформации для каждой ячейки можно записать в виде:

$$\varepsilon_x = \ln \left(\frac{a_{i+1} + b_{i+1}}{a_i + b_i} \right); \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \ln \left(\frac{c_{i+1} + d_{i+1}}{c_i + d_i} \right); \quad (2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_i) + (\beta_{i+1} - \beta_i) + (\gamma_{i+1} - \gamma_i) + (\delta_{i+1} - \delta_i)}{4}. \quad (3)$$

Используя значения компонентов тензора деформаций, для каждой ячейки сетки рассчитывали также значение объемной деформации (с учетом плоской схемы деформации):

$$\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (4)$$

и интенсивность сдвиговых деформаций:

$$H_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + 6\gamma_{xy}^2}. \quad (5)$$

Принимая во внимание, что [12]:

$$\varepsilon = \ln \left[\frac{1 - \theta_i}{1 - \theta_{i+1}} \right] \quad (6)$$

из (6) находили пористость θ_{i+1} каждой ячейки после $(i + 1)$ -го этапа деформации:

$$\theta_{i+1} = 1 - \frac{1 - \theta_i}{\exp(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}. \quad (7)$$

Результаты цифровой обработки полученных экспериментальных данных позволили оценить эволюцию изменения основных параметров деформированного состояния поковок в процессе штамповки.

На рис. 3–5 показаны графики распределения деформационных параметров 1-го, 4-го и 7-го горизонтальных слоев поковок в направлении от центра к периферии (по оси абсцисс отложены номера ячеек в горизонтальном направлении).

Анализ кривых распределения радиальной деформации (рис. 3) показывает, что при сходности в целом вида кривых ε_r для верхнего и нижнего (№ 1 и 7 соответственно) слоев поковки, значения величин радиальной деформации для схемы открытой штамповки несколько выше практически для всех ячеек этих слоев. В то же время, характер формы кривой ε_r для среднего горизонтального слоя (№ 4) существенно отличается. В большей части объема поковки радиальная деформация среднего слоя существенно превышает значения ε_r для верхнего и нижнего слоев как для открытой, так и закрытой штамповки, что может быть объяснено как меньшим охлаждением внутренних слоев материала, так и влиянием контактного трения, которое обуславливает снижение радиальной деформации приконтактных слоев

поковки. При этом характер тренда кривой ε_r для открытой и закрытой штамповки существенно различаются между собой. Если для закрытой штамповки значения ε_r монотонно снижаются от центра к периферии и приобретают отрицательные значения в близких к периферийным слоям поковки (кривая 4, рис. 3, б, г), то при использовании схемы открытой штамповки величина радиальной деформации увеличивается для всех ячеек слоя за исключением крайнего участка со свободной поверхностью (кривая 4, рис. 3, а, в).

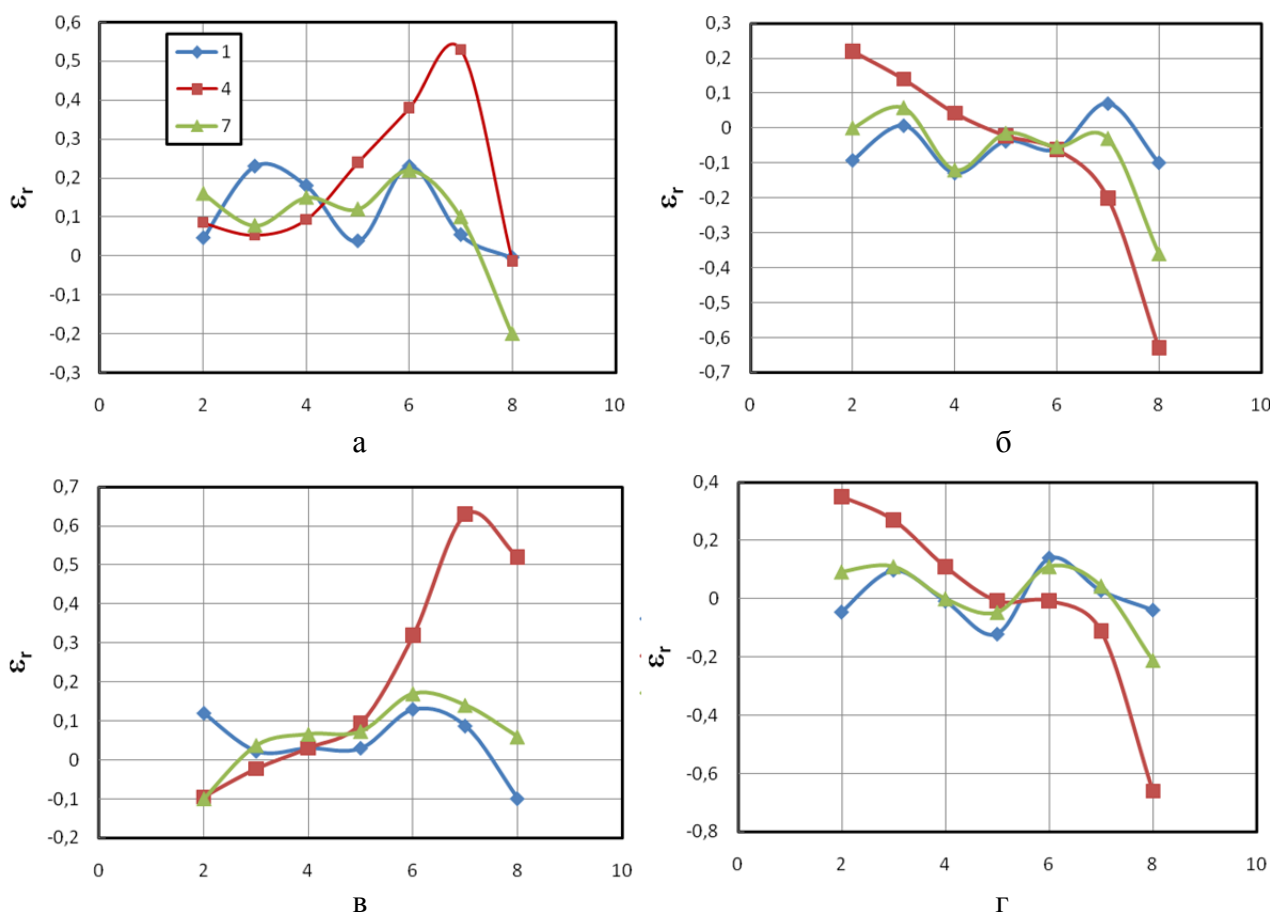


Рис. 3. Распределение радиальной деформации в горизонтальных слоях № 1 (верх), 4 (середина) и 7 (низ) для первого (а, б) и конечного (в, г) этапов деформации: а, в – участок открытой штамповки; б, г – закрытой штамповки

Подобное различие наблюдается и для характера распределения осевых деформаций (рис. 4) – для схемы закрытой штамповки величина отрицательного значения ε_z снижается от центра к периферии (кривая 4, рис. 4, б, г), тогда как для открытой штамповки – резко увеличивается (кривая 4, рис. 4, а, в). Следует отметить, что независимо от применяемой схемы степень осевой деформации для верхнего слоя поковки (слой № 1) заметно выше по сравнению с нижним слоем (№ 7), что обусловлено большим охлаждением слоев поковки, непосредственно контактирующим с относительно холодной поверхностью нижней полуматрицы.

Аналогичная закономерность относительно различия верхнего и нижнего слоев проявляется и для значений интенсивности сдвиговых деформаций, характеризующей интегральную величину накопленной деформации в разных зонах поковки (рис. 5). Обращает на себя внимание заметное снижение интенсивности сдвиговых деформаций в крайних ячейках сетки, ограниченных боковой поверхностью поковки в среднем горизонтальном слое (№ 4) независимо от схемы деформации. Это, по-видимому, может быть обусловлено наличием свободной боковой поверхности на протяжении значительной части цикла деформирования заготовок, имеющих начальный зазор по отношению к боковым стенкам матрицы.

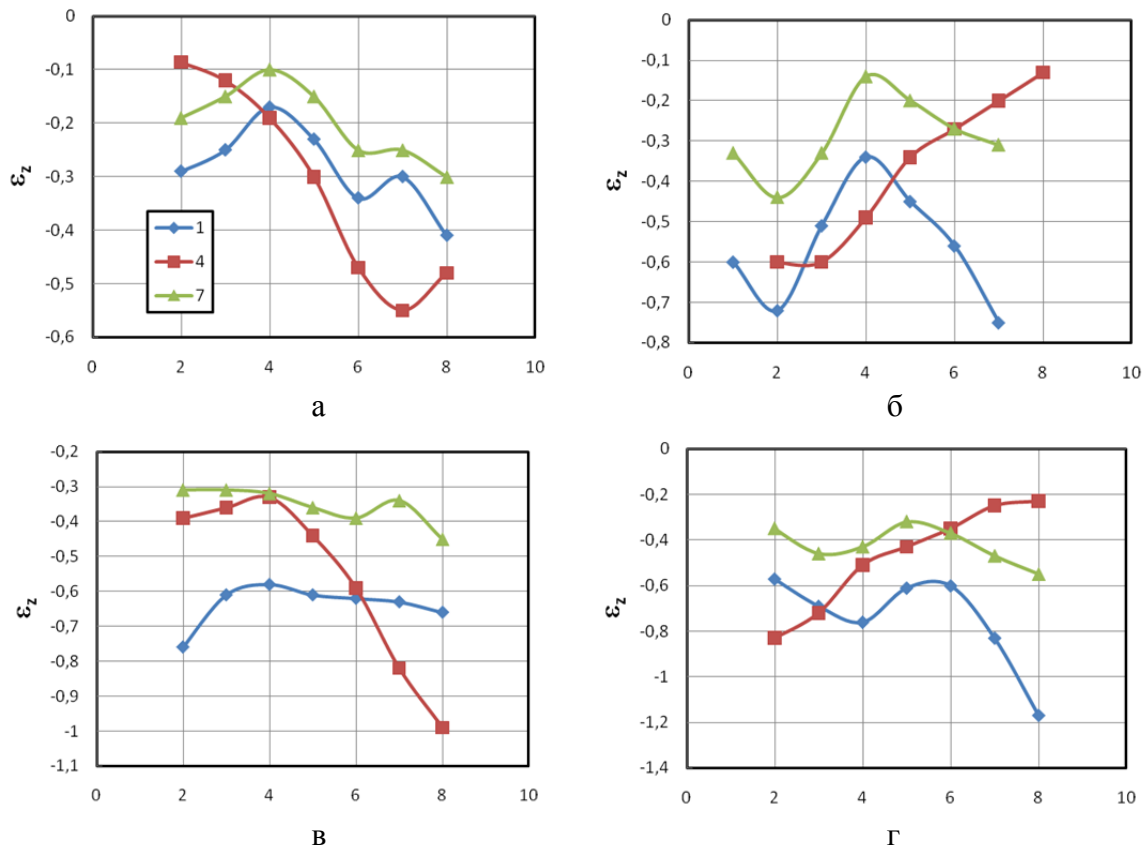


Рис. 4. Распределение осевой деформации в горизонтальных слоях поковки (здесь и на рис. 5 обозначение рисунков и кривых – аналогично рис. 3)

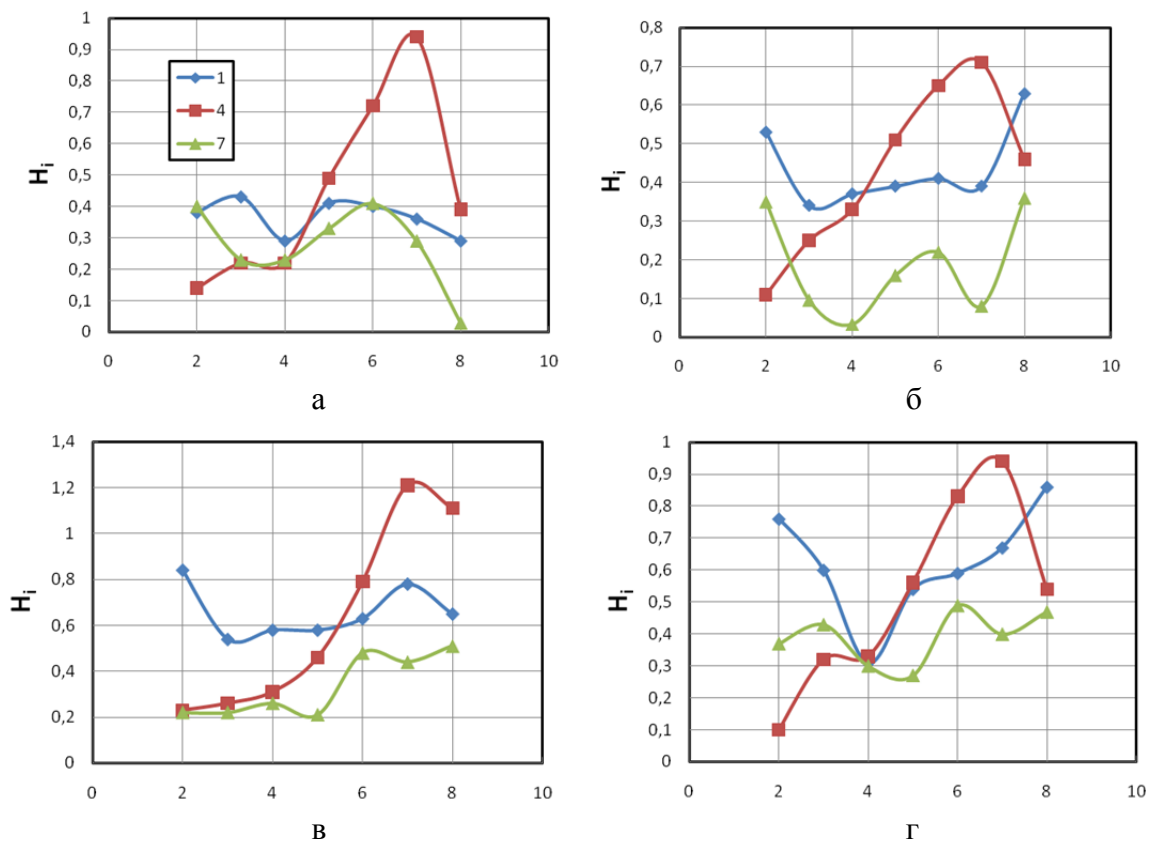


Рис. 5. Распределение интенсивности сдвиговых деформации в горизонтальных слоях поковки

Следует, также, отметить, что применение схемы открытой штамповки способствует увеличению уровня интенсивности сдвиговых деформаций для всех слоев поковки по сравнению с закрытой штамповкой (рис. 5, в, г), что свидетельствует о наличии более развитого очага деформации при использовании схемы открытой штамповки. Такой характер деформации оказывает заметное влияние на структуру получаемого материала: как следует из работы [13], структура горячештампованной в открытом штампе поковки отличается существенно большей степенью дисперсности и наличием ярко выраженной текстуры, по сравнению с поковкой, отштампованной простой допрессовкой в закрытом штампе.

Анализ характера распределения пористости по объему поковки на разных стадиях деформирования (рис. 6, а, в) показал, что после первой стадии деформации как для схемы открытой, так и для закрытой штамповки проявляется существенная неравноплотность по сечению заготовки – наряду с участками с высокой плотностью ($\theta = 1-3\%$) в отдельных объемах отмечаются значения пористости около 15%. После завершения второй стадии деформации заготовка, отштампованная в закрытом штампе, т. е., когда реализуется более жесткая схема деформации, имеет практически нулевую пористость по всему объему поковки. В то же время, при реализации схемы открытой штамповки некоторые локальные объемы поковки имеют пористость, достигающую значений 7%, что обусловлено наличием свободной боковой поверхности на значительном промежутке цикла штамповки, способствующему выдавливанию части материала поковки в облой на конечной стадии допрессовки. Эти результаты достаточно хорошо коррелируют с выводами, полученными в [10, 11] по результатам численного моделирования процесса открытой штамповки пористых заготовок.

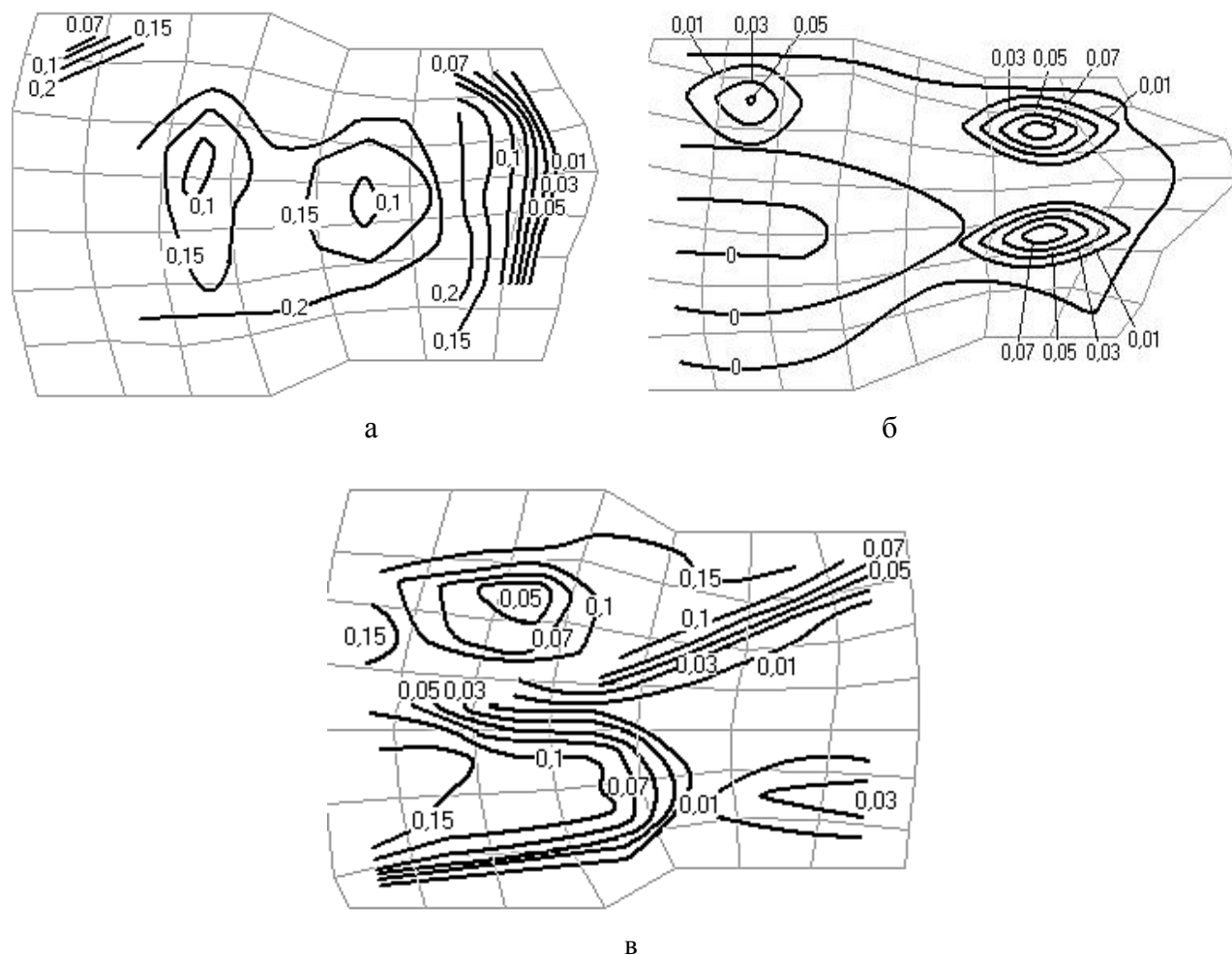


Рис. 6. Распределение пористости по сечению поковки после первого (а) и второго (б) этапов деформирования для схемы открытой штамповки и первого этапа для закрытой штамповки (в)

ВЫВОДЫ

Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение схемы открытой штамповки с более развитым очагом деформации способствует увеличению уровня интенсивности сдвиговых деформаций для всех слоев поковки по сравнению с закрытой штамповкой. В то же время, при реализации схемы открытой штамповки не удастся обеспечить получение беспористого состояния во всем объеме поковки при одинаковой массе навески и степени осевой деформации, по сравнению с закрытой штамповкой, вследствие выдавливания части материала поковки в облой на конечной стадии допрессовки. Это предопределяет необходимость корректировки в сторону увеличения массы материала заготовки под открытую штамповку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий* / Дорофеев Ю. Г., Гасанов Б. Г., Дорофеев В. Ю. [и др.]. – М. : Металлургия, 1990. – 206 с.
2. Кун Х. А. *Основные принципы штамповки порошковых заготовок* / Х. А. Кун // *Порошковая металлургия материалов специального назначения*. – М. : Металлургия, 1977. – С. 143–158.
3. Баглюк Г. А. *Технологические проблемы процессов горячей штамповки пористых заготовок* / Г. А. Баглюк // *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. – Київ : НТУУ «КПІ», 2009. – Вип. 56. – С. 93–100. – (Серія «Машинобудування»).
4. Дорофеев Ю. Г. *Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок* / Ю. Г. Дорофеев. – М. : Металлургия, 1977. – 216 с.
5. Баглюк Г. А. *Повышение эффективности уплотнения пористых заготовок за счет интенсификации сдвиговых деформаций* / Г. А. Баглюк // *Реологія, структура, властивості порошкових та композиційних матеріалів : зб. наук. пр.* – Луцьк : РВВ ЛДТУ, 2004. – С. 35–48.
6. *Горячая объемная штамповка порошка титана* / Павлов В. А., Живов Л. И., Щербина В. В. [и др.] // *Порошковая металлургия*. – 1973. – № 8. – С. 15–19.
7. Баглюк Г. А. *Расчет пластического течения пористого материала при штамповке в открытом штампе* / Г. А. Баглюк, В. Л. Юрчук // *Порошковая металлургия*. – 1997. – № 7/8. – С. 1–7.
8. Баглюк Г. А. *Моделирование процесса деформации пористой заготовки в открытом штампе* / Г. А. Баглюк // *Порошковая металлургия*. – 1997. – № 9/10. – С. 5–7.
9. Брюханов А. Н. *Ковка и объемная штамповка* / А. Н. Брюханов. – М. : Машиностроение, 1975. – 408 с.
10. *Ковка и штамповка : справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая штамповка* / под ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1986. – 592 с.
11. Баглюк Г. А. *Исследование пластической деформации порошковых материалов с помощью комплекса «ТЕНЗОР»* / Г. А. Баглюк, А. И. Хоменко // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. – 2010. – Вып. 34. – С. 47–49.
12. Павлов В. А. *Исследование горячей деформации и уплотнения порошковых металлов* / В. А. Павлов, М. И. Носенко // *Порошковая металлургия*. – 1988. – № 1. – С. 1–6.
13. Баглюк Г. А. *Влияние деформационных параметров на структуру и свойства горячештампованных порошковых материалов* // Г. А. Баглюк // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 139–145.

Баглюк Г. А. – д-р техн. наук, зам. директора ИПМ НАН Украины;

Хоменко А. И. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИПМ НАН Украины.

ИПМ НАН Украины – Институт проблем материаловедения Национальной академии наук Украины, г. Киев.

E-mail: gbag@rambler.ru; home-n-cow@yandex.ua

Статья поступила в редакцию 24.02.2012 г.