

УДК 621.762

Баглюк Г. А.

## МЕТОД ПРОНИЦАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Среди численных методов решения задач, связанных с нахождением полей напряжений и деформаций, которые возникают как в компактных, так и в пористых материалах, широкое распространение получил метод конечных элементов (МКЭ). К его достоинствам относят удобство с точки зрения алгоритмизации и программирования, а также сравнительно высокую точность получаемых решений [1–4].

Однако, при исследовании технологических процессов, в ходе которых развиваются большие деформации, применение МКЭ затруднительно, что обусловлено чрезмерными искажениями сетки конечных элементов. В частности, при больших осевых деформациях возможно локальное сплющивание ячеек, что особенно существенно для объемносжимаемых материалов, поскольку расчет распределения плотности может оказаться невозможным. С чисто технической точки зрения указанная регуляризация вызывает необходимость регенерации сетки через каждые несколько шагов счета, существенно увеличивает время счета и заметно усложняет алгоритм решения.

Для решения технологических задач такого типа представляется более целесообразным разработанный в ИПМ НАН Украины метод проницаемых элементов (МПЭ) [5, 6]. Его сущность состоит в использовании элементов, форма которых регламентируется заранее, при чем, в отличие от МКЭ, где элементы совпадают с материальными объемами и их массы неизменны, здесь массы элементов переменны – между соседними ячейками возможно перетекание материала.

Целью данной работы является рассмотрение возможностей использования метода проницаемых элементов для моделирования процессов деформирования пористых порошковых материалов.

При построении алгоритма моделирования процессов уплотнения и деформации пористых заготовок при их обработке давлением с применением метода проницаемых элементов использована модель идеального жестко-пластического пористого тела. Физическая и математическая постановка задачи при этом основана на следующих основных допущениях.

Пористая заготовка представляет собой изотропное сжимаемое тело, к которому применимы основные уравнения механики сплошной среды. В рамках этого подхода пористое тело рассматривается как хаотическая смесь твердого вещества и пустоты. Применение механики сплошной среды (МСС) на макроуровне основано на допущении, что рассматриваемое тело может быть разбито на элементарные микрообъемы, характерные размеры которых, с одной стороны, намного меньше характерных размеров тела, а с другой – намного больше характерных размеров структурных элементов материала. При этом предполагается, что изменение макропараметров внутри микроэлементов незначительно. В соответствии с основными представлениями механики континуума предполагается, также, что поведение рассматриваемых элементов может быть описано с помощью тензора скоростей деформаций  $e_{ij}$ , тензора напряжений  $\sigma_{ij}$ , плотности  $\rho$  или пористости  $\theta$  и ряда других параметров  $\chi_k$  [7].

Предлагаемый метод предназначен для решения задач в квазистатической постановке и его реализация условно может быть подразделена на следующие три этапа:

- задание дискретизирующей структуры и определение соответствующих ей функций формы для поля скоростей;
- определение поля скоростей обрабатываемого материала;
- определение поля плотностей, деформаций, напряжений и других деформационных параметров.

Первый из указанных этапов характеризуется тем, что в отличие от МКЭ, движение сетки в МПЭ (если такое и реализуется) не связано с перемещением частиц прессуемого материала, а является независимым от него и определяется, исходя из удобства анализа результатов. Последнее обусловлено использованием в качестве базового эйлерова представления о движении деформируемого материала. В связи с этим масса каждого элемента может быть переменной, а сами элементы – проницаемы.

Сетка проницаемых элементов и эволюция их формы в процессе обработки задаются априори исходя из известных данных о характере движения обрабатывающего инструмента, удобства аналитического представления функций полей скоростей, а также из соображений возможности дальнейшей экспериментальной проверки. Сказанное также составляет одно из преимуществ МПЭ, поскольку упрощает процедуру сравнения результатов, полученных опытным и расчетным путями, отпадает необходимость в использовании усредняющих операций, снижающих точность получаемого решения.

На этом же этапе, по аналогии с МКЭ, определяются кинематические параметры как функции формы через неизвестные их значения в узлах сетки. В общем случае сетка МПЭ может строиться также как и в МКЭ, однако движение узлов уже не контролируется полем скоростей течения материала.

В качестве базовой модели для описания процессов горячего штампования пористых материалов используются модель пластического пористого тела [7], основанная на предположении о существовании некоторого критерия пластичности  $F$ , который связывает компоненты тензора напряжений с пористостью:

$$F = \frac{p^2}{f_1(\theta)} + \frac{T^2}{f_2(\theta)} - \sigma_s^2 = 0, \quad (1)$$

где  $f_1(\theta)$  и  $f_2(\theta)$  – некоторые функции пористости  $\theta$  материала, которые определяют его реологические свойства;

$\sigma_s$  – предел текучести материала основы для данных температурно-скоростных условий деформации.

Основной алгоритм решения задач с применением метода проницаемых элементов, основанный на применении вариационных методов, включает следующие операции. Для исследуемого объема деформируемой заготовки, задаются некоторые функции поля скоростей, отвечающие граничным условиям, в виде многочленов:

$$v_k = a_1 \varphi_1(k) + a_2 \varphi_2(k) + \dots + a_n \varphi_n(k), \quad (2)$$

где  $k$  – обобщенная координата;

$\varphi_i(k)$  – некоторые функции координат;

$a_i$  – численные коэффициенты – неизвестные варьируемые параметры, значение которых на каждом шаге деформации подбирают с использованием одного из известных методов оптимизации таким образом, чтобы он минимизировал величину функционала  $J$ :

$$J = \sum_{k=1}^K \iiint_V \sqrt{e^2 \cdot f_1(\Theta) + H^2 \cdot f_2(\Theta)} \cdot dV + \sum_{m=1}^M \sqrt{3} \iint_F \mu \sqrt{f_2(\Theta) \cdot (v_1^2 + v_2^2)} \cdot dF, \quad (3)$$

где  $e = e_{ij} \delta_{ij}$  – первый инвариант тензора скоростей деформаций, характеризующий скорость равномерного всестороннего сжатия (или растяжения), который может быть определен как  $e = \frac{1}{\Theta} \frac{d\Theta}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}$ ;

$H_i$  – интенсивность скоростей деформаций сдвига;

$dV$  – элементарный объем деформируемого тела;

$\mu$  – коэффициент трения;

$v_1$  и  $v_2$  – компоненты скоростей перемещений частиц деформируемого тела по контактными поверхностям (на границе раздела заготовка – инструмент);

$dF$  – элементарная площадка контактной поверхности.

Определив значения варьируемых параметров  $a_i$ , можно найти функции (2) поля скоростей и вычислить компоненты интенсивности скоростей деформаций  $H_i$  и скорость уплотнения  $e$ , что позволяет решать задачи конечного формоизменения и определять силовые и энергетические параметры процесса.

Поле распределения плотности находим из закона сохранения массы, который для любого элемента сплошной среды формулируется в виде:

$$\frac{dm}{dt} = \int_S v_n \rho \cdot dS, \quad (4)$$

где  $m$  – масса;

$t$  – время;

$v_n$  – проекция вектора скорости течения материала данного пронизываемого элемента на нормаль к поверхности  $S$ , ограничивающей этот элемент.

Принято считать, что в пористых уплотняемых материалах при квазистатическом течении в общем случае не существует разрывов скоростей, в связи с чем не существует поверхностей, на которых деформации  $\varepsilon_{ij}$ , скорости деформаций  $e_{ij}$  или величины пористости  $\theta$  претерпевают разрыв. Это вызывает необходимость при моделировании процессов деформации аналитически описывать поле скоростей перемещений в виде непрерывных функций координат, что обычно существенно усложняет вычисления. Поэтому в теории обработки металлов давлением принимают допущение о существовании разрывов скоростей в пористом материале, которое носит несколько искусственный характер, но часто бывает полезным для упрощения решения и сокращения объема вычислений.

Допущение о существовании разрывов скоростей вызывает необходимость учета в основном энергетическом уравнении составляющей, учитывающей затраты энергии на деформацию на поверхностях разрыва. С учетом вышесказанного функционал (4) принимает вид [8]:

$$J = \sum_{k=1}^K \iiint_V \sigma_{ij} \cdot e_{ij} \cdot dV + \sum_{m=1}^M \sqrt{3} \iint_F \mu \sigma_s \sqrt{f_2(\Theta) \cdot (v_1^2 + v_2^2)} \cdot dF + D, \quad (5)$$

где  $D$  – диссипация мощности на поверхностях разрыва кинематически возможных скоростей перемещений. Поверхность разрыва рассматривается как предельное положение тонкого переходного слоя толщиной  $\Delta n$  при  $\Delta n \rightarrow 0$ , в котором скорость перемещения испытывает быстрое, но непрерывное изменение.

Величина диссипации мощности на поверхности разрыва скоростей может быть определена как [8]:

$$D = \int_{\Sigma} \sigma_s \sqrt{(\Delta v_n)^2 f_1(\Theta) + \left[ \frac{4}{3} (\Delta v_n)^2 + (\Delta v_t)^2 \right] f_2(\Theta)} \cdot d\Sigma, \quad (6)$$

где  $d\Sigma$  – элементарная поверхность разрыва скоростей;

$\Delta v_n$  и  $\Delta v_t$  – нормальная и касательная составляющие вектора скорости разрыва.

Примем значения функций  $f_1(\theta)$  и  $f_2(\theta)$  в виде зависимостей [5]:

$$f_1(\Theta) = \frac{4}{9} \cdot \frac{(1-\Theta)^4}{\Theta}; \quad f_2(\Theta) = \frac{(1-\Theta)^3}{3}; \quad (7)$$

после чего можно записать:

$$D = \int_{\Sigma} \frac{(1-\Theta)^{3/2}}{\sqrt{3}} \sigma_s \sqrt{\frac{4}{3\Theta} (\Delta v_n)^2 + (\Delta v_t)^2} \cdot d\Sigma. \quad (8)$$

Разработанный общий алгоритм МПЭ был успешно использован, в частности, для моделирования процессов закрытой и открытой горячей штамповки и штамповки пористых заготовок в полуоткрытом штампе, уплотнения биметаллических пористых заготовок с горизонтальной плоскостью раздела, осадки кольцевой пористой заготовки в закрытом штампе со свободным центростремительным радиальным течением материала, консолидации ступенчатых изделий типа втулки с буртом и др.

Приведем, в частности, примеры использования рассмотренного метода для исследования механики течения материала при горячей открытой горячей штамповке пористых заготовок (рис. 1, а) и закрытой штамповке в штампе с компенсационной полостью (рис. 1, б).

Интерес к подобным схемам обработки пористых заготовок обусловлен следующими обстоятельствами. Эффективность процесса штамповки пористых заготовок, которая в значительной степени определяется минимизацией энергетических и материальных затрат, существенно зависит от правильности выбора геометрии и пористости исходной заготовки, а также схемы деформации, которые должны обеспечивать при горячей обработке давлением пластическое формоизменение и уплотнение образца без разрушения по кратчайшей траектории. Наиболее широко используемая в промышленности технология горячей штамповки пористых заготовок осуществляется, как правило, с использованием схемы закрытой объемной деформации, предусматривающей допрессовку пористых заготовок путем их осадки в штампе с минимальным поперечным течением материала (реализующимся только за счет заполнения технологического зазора между стенкой матрицы и нагретой заготовки) [9].

Однако, существенным недостатком такой схемы деформации является возможность перегрузки штампа или заклинивания прессы вследствие несоответствия объема материала заготовки и ручья матрицы. Кроме того, при ее реализации изделия, полученные допрессовкой при отсутствии ощутимых поперечных деформаций, обычно имеют остаточную пористость около 2 % вследствие того, что наиболее интенсивно закрытие пор и разрушение оксидной пленки на поверхности частиц происходит при сдвиговых деформациях, а при обычной горячей допрессовке в закрытом штампе сдвиговые деформации сведены к минимуму. Кроме того, следует отметить также, что достигаемая плотность – не единственный критерий, определяющий формирование структуры и свойств металла. Применение схем деформации с развитым очагом сдвиговых деформаций позволяет получать материалы с более дисперсной структурой, повышенными прочностными и, в особенности, пластическими свойствами при одинаковой конечной плотности порошкового металла за счет обеспечения благоприятных условий для интенсификации межзеренных диффузных процессов между частичками порошка.

Это вызывает необходимость более широкого использования альтернативных схем штамповки, таких как штамповка в открытом штампе или в полузакрытом штампе с компенсационными полостями.

Эффективность применения методов горячей штамповки порошковых изделий в штампах с незамкнутыми объемами, при которых наряду с осевыми реализуются дополнительные сдвиговые деформации, показана в целом ряде работ [10–12].

В то же время, горячая объемная штамповка пористых заготовок в открытом штампе, отличительной особенностью которой является наличие на протяжении всего процесса деформации изменяющегося по высоте участка заготовки со свободной боковой поверхностью, не нашла широкого распространения, так как при реализации такой схемы возможно неконтролируемое выдавливание уплотняемого материала в облой на ранних этапах деформации, что может вызывать недоуплотнение материала поковки.

В связи с этим представляют практический интерес вопросы исследования механики течения материала заготовки в процессе штамповки в штампах, имеющих дополнительные компенсационные полости.

Расчетная модель для описания течения пористого материала при горячей открытой штамповке и закрытой штамповке в штампах с компенсационной щелью была построена на основе вариационного принципа, при этом упрочнением материала, температурными эффектами и силами инерции пренебрегали, а в качестве численного метода реализации модели использован метод проникаемых элементов.

Принимая во внимание симметричность деформируемой заготовки относительно вертикальной оси, расчет производили для половины ее поперечного сечения, которое было условно разбито на три расчетные зоны (проницаемых элемента) – для открытой штамповки (рис. 1, а), и четыре – для закрытой штамповки (рис. 1, б). Внутри каждого из расчетных элементов распределение плотности и скоростей деформаций в различные моменты уплотнения считаем однородным.

Граничные условия для компонент скоростей  $v_z$  и  $v_r$  можно выразить в виде:

$$v_z|_{z=H} = -v_0; \quad v_r|_{z=H} = 0; \quad v_z|_{z=0} = 0; \quad v_r|_{r=0} = 0; \quad v_z|_{z=h} = -v_0,$$

где  $v_0$  – скорость движения верхней полуматрицы.

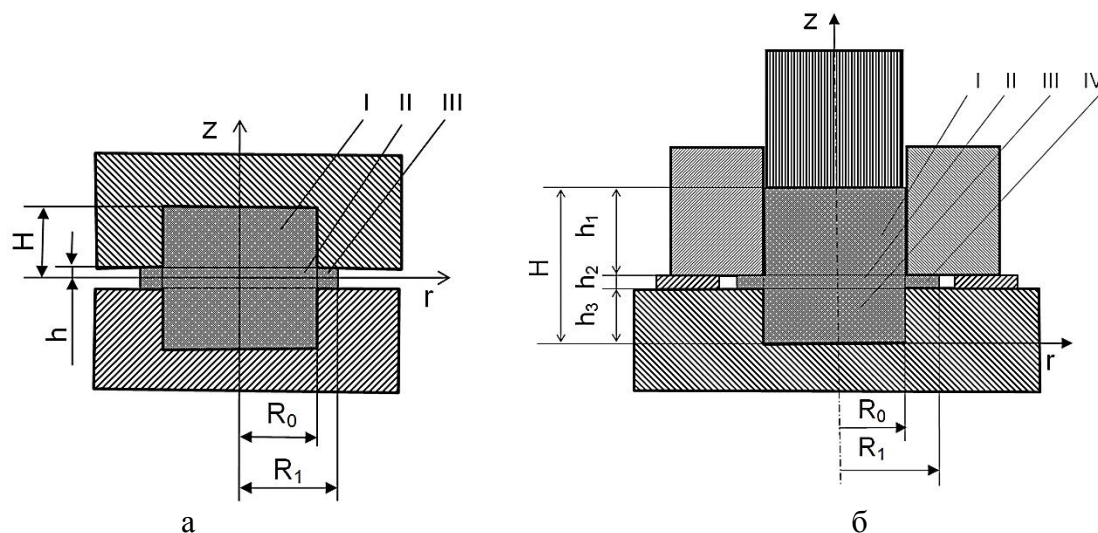


Рис. 1. Расчетные схемы процессов открытой штамповки (а) и закрытой штамповки в штампе с компенсационной щелью (б)

Считая, что скорости в каждой из расчетных зон поковки являются линейными функциями координат  $r$  и  $z$ , с учетом граничных условий примем следующие выражения, описывающие поле скоростей течения материала в каждой из зон:

– открытая штамповка:

$$\left. \begin{aligned} \text{зона I: } v_z &= -v_0 \frac{z}{H}; \quad v_r = 0; \\ \text{зона II: } v_z &= -v_0 \frac{z}{H}; \quad v_r = \frac{v_0}{h} a_1 r v; \\ \text{зона III: } v_z &= -v_0 \frac{z}{h}; \quad v_r = \frac{v_0}{h} a_1 R_0 v \left(1 + a_2 \frac{r - R_0}{R_1}\right); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

– закрытая штамповка:

$$\left. \begin{aligned} \text{зона I: } v_z &= v_{12} - \frac{v_0}{H} (z - h_2 - h_3); \quad v_r = 0; \\ \text{зона II: } v_z &= v_{23} - \frac{v_0}{H} (z - h_3); \quad v_r = \frac{v_0 r}{H a_1 v}; \\ \text{зона III: } v_z &= -\frac{v_0 z}{H}; \quad v_r = 0; \\ \text{зона IV: } v_z &= 0; \quad v_r = \frac{v_0 R_0}{H a_1 v} \left[1 + a_2 \frac{(r - R_0)}{R_1}\right]; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – некоторые варьируемые параметры;  
 $v_{12}$  и  $v_{23}$  – линейные скорости перетекания материала между зонами I–II и II–III соответственно (закрытая штамповка).

После соответствующих преобразований с учетом зависимостей (9) и (10) определяли вид составляющих функционала  $J$  и, принимая параметры  $\sigma_s$ ,  $\mu$  и  $v_0$  постоянными на протяжении всего цикла деформации, на каждом расчётном шаге находили значения  $a_1$  и  $a_2$ , минимизирующие функционал (5). Минимизацию функционала осуществляли с помощью метода покоординатного спуска [13].

Расчет осуществляли с использованием метода ступенчатого нагружения, в соответствии с которым весь период деформации разбивали на равные временные интервалы  $\Delta t$ , за который происходит осадка заготовки на величину  $\Delta H = v_0 \cdot \Delta t$ . На каждом  $i$ -м шаге нагружения определяли параметры  $a_1$  и  $a_2$ , минимизирующие функционал  $J$ , из (9) и (10) находили новое значение радиуса облоя  $R_I$  и из зависимости:

$$\Theta_k^i = 1 - \frac{m_k \pm \frac{dm_k}{dt} \Delta t}{V_i^k \gamma}, \quad (11)$$

где  $\Theta_k^i$  и  $V_k^i$ ,  $m_k$  – соответственно пористость и объем и масса  $k$ -той зоны заготовки после очередного шага деформации, вычисляли текущие значения пористости в отдельных зонах заготовки.

Сравнение результатов моделирования процесса горячей штамповки в открытом штампе с аналогичными данными для штамповки в закрытом штампе с компенсаторами показало, что, если при штамповке в открытом штампе вытеснение материала в облой начинается уже на начальных этапах деформации (рис. 2), то в закрытом штампе с компенсаторами – только после достижения заготовкой некоторого порогового, достаточно высокого, уровня плотности (при  $\theta = 2 \div 5\%$ ) (рис. 3), что обуславливает уменьшение конечной величины заусенца при штамповке в штампе с компенсаторами.

В то же время, резкое увеличение сопротивления истечению металла в облой на конечной стадии открытой штамповки вследствие постепенного смыкания полуматриц, способствует доуплотнению материала во второй зоне, в то время как при закрытой штамповке с компенсатором в связи с постоянной величиной зазора между полуматрицами сопротивление истечению в магазин изменяется незначительно, что определяет наличие некоторой остаточной пористости в зоне II поковки.

Следует отметить, также, что в отличие от открытой штамповки, при которой выбор оптимальной пористости, соотношение размеров заготовки и полости матрицы оказывает значительное влияние на распределение плотности в разных частях поковки и конечную величину облоя, то при реализации схемы закрытой штамповки с компенсаторами зависимость качественных характеристик поковки от указанных конструктивно-технологических параметров существенно ниже. Этот факт, наряду с фактом уменьшения величины облоя при штамповке в закрытом штампе с компенсатором при прочих равных условиях позволяет сделать вывод о предпочтительности рассматриваемой схемы по сравнению с открытой штамповкой. В то же время, следует отметить, что конструктивная сложность штамповой оснастки для реализации процесса закрытой штамповки с компенсаторами несколько ограничивает возможности её более широкого использования в промышленности.

Существенное значение при выборе схемы деформации и марки пресса, а также при расчете штамповой оснастки, имеет информация о силовых параметрах рассматриваемых процессов. Рассмотрим наряду с приведенными выше схемами, традиционную для порошковой металлургии схему закрытой штамповки без компенсационных щелей.

Усилия штамповки для трех рассматриваемых схем деформации рассчитывали с использованием основного уравнения энергетического метода.

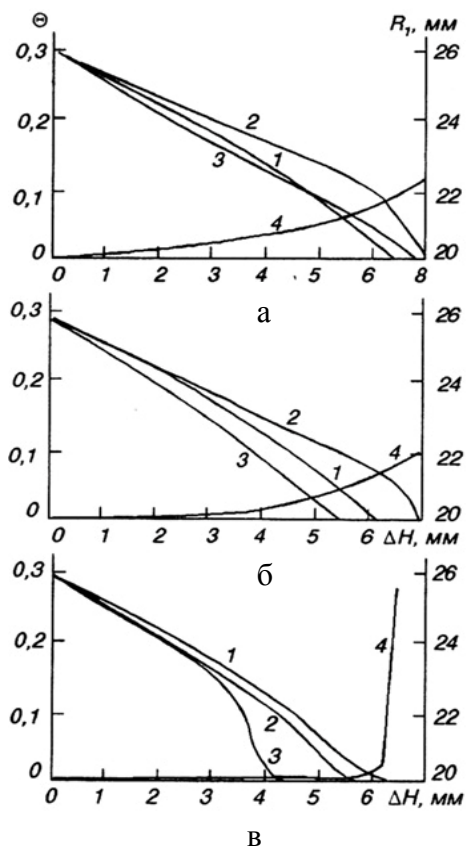


Рис. 2. Зависимость текущей пористости материала в зонах: I (1), II (2) и III (3) и радиуса облоя (4) от осевой деформации при  $h_0 = 11$  (а), 9 (б) и 7 (в) мм;  $\theta_0 = 0,3$

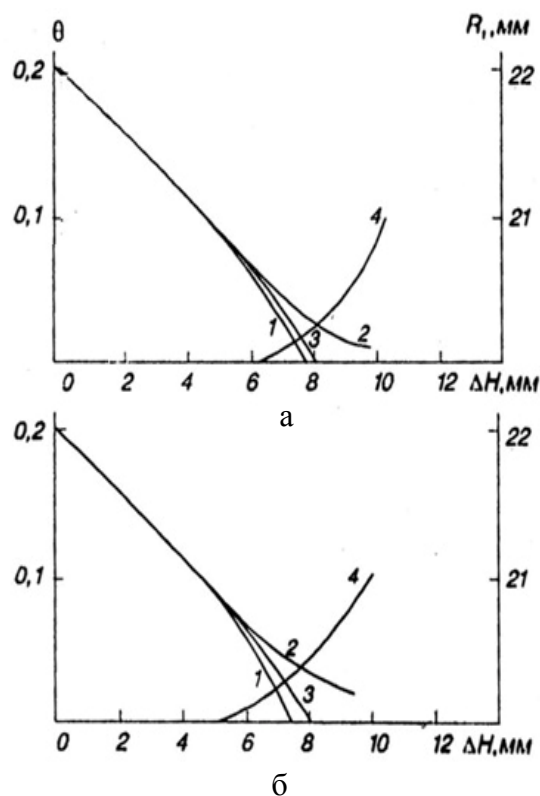


Рис. 3. Зависимость текущей пористости материала в расчетных зонах I (1), II (2), III (3) и радиуса облоя (4) от величины осевой деформации  $\Delta H$  при  $h_2 = 3,0$  (а) и 4,0 (б) мм;  $\theta_0 = 0,2$

Анализ результатов расчетов, которые представлены на рис. 4, показывает, что использование схемы закрытой штамповки вызывает необходимость приложения существенно более высоких усилий для получения высокоплотных поковок. Наименьшее усилие деформации – при открытой штамповке. Эти результаты позволяют сделать вывод, что с увеличением жесткости схемы нагружения усилие деформации возрастает. Обращает на себя внимание тот факт, что различие в усилиях растет с увеличением степени осевой деформации, а значит, и средней плотности поковок. На начальных же этапах уплотнения различие в усилиях для рассматриваемых схем деформации невелико.

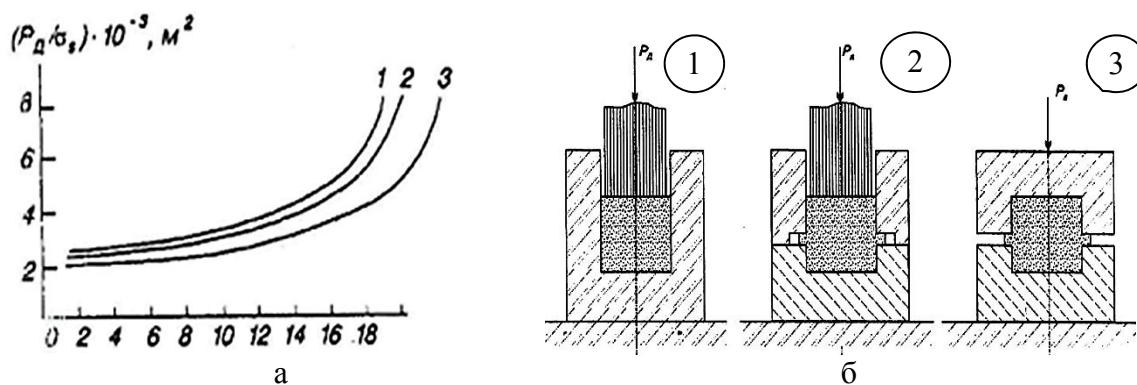


Рис. 4. Зависимость относительного значения усилия штамповки от осевой деформации (а) для схем деформации (б):

1 – закрытая штамповка; 2 – штамповка в закрытом штампе с компенсатором; 3 – открытая штамповка

Следует отметить, что к аналогичным результатам приводят экспериментальные исследования процессов горячей штамповки порошковых образцов [11, 14]. Применение компенсационных щелей позволяет получить высокоплотные поковки с однородной структурой при меньшем давлении деформации по сравнению с традиционной закрытой штамповкой.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, представленные результаты позволяют сделать вывод, что традиционная схема горячей штамповки пористых заготовок в закрытом штампе является наименее предпочтительной с точки зрения энергосиловых параметров процесса. Это указывает на целесообразность использования менее жестких схем деформации с частичным выдавливанием материала заготовок в компенсационные полости.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kobayashi Sh. *Metal forming and the finite-element method* / Sh. Kobayashi, S.-I. Ohn, T. Altan. – New York, Oxford : Oxford University Press, 1989. – 377 p.
2. Khoei A. R. *Computational Plasticity in Powder Forming Processes* / A. R. Khoei. – Elsevier Science, 2005. – 449 p.
3. Shtern M. *Defects Formation in Die Compaction : Prediction and Numerical Analysis* / M. Shtern, O. Mikhailov // *Proceeding of Powder Metallurgy : European Congress, 22 – 24 October, 2001, Nice, France.* – 2001. – Vol. 3. – P. 50–57.
4. Shtern M. *Qualitative Methods for the Mechanics of Compaction* // M. Shtern // *Proceedings of the International Workshop on Modeling of Metal Powder Forming Process.* – Grenoble, France, 21–23 July 1997. – P. 133–147.
5. Baglyuk G. *Densification and Shape Change of Porous Billets in Closed and Open Dies* / G. Baglyuk // *Recent Developments in Computer Modeling of Powder Metallurgy Processes.* – IOS Press. NATO Science Series, 2001. – P. 163–168.
6. *Определение поля плотности при прессовании изделий сложной формы методом пронизываемых элементов* / Е. А. Олевский, М. Б. Штерн, Г. Г. Сердюк, О. В. Михайлов // *Порошковая металлургия.* – 1989. – № 3. – С. 15–21.
7. *Феноменологические теории прессования порошков* / М. Б. Штерн, Г. Г. Сердюк, Л. А. Максименко и др. – Киев : Наук. Думка, 1982. – 140 с.
8. Баглюк Г. А. *Диссипация мощности на поверхностях разрыва скоростей в пористом жесткопластическом материале* / Г. А. Баглюк // *Физика и техника высоких давлений.* – 1993. – Т. 3, № 3. – С. 86–89.
9. *Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий* / Ю. Г. Дорофеев, Б. Г. Гасанов, В. Ю. Дорофеев и др. – М. : Металлургия, 1990. – 206 с.
10. Баглюк Г. А. *Повышение эффективности уплотнения пористых заготовок за счет интенсификации сдвиговых деформаций* / Г. А. Баглюк // *Реология, структура, властивості порошковых та композиційних матеріалів : зб. наук. праць.* – Луцьк : РВВ ЛДТУ, 2004. – С. 35–48.
11. Павлов В. А. *Влияние деформированного состояния на уплотнение порошковых металлов при горячей штамповке* / В. А. Павлов, М. И. Носенко // *Порошковая металлургия.* – 1992. – № 2. – С. 8–12.
12. Баглюк Г. А. *Влияние деформационных параметров на структуру и свойства горячештампованных порошковых материалов* / Г. А. Баглюк // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 139–145.
13. Турчак Л. И. *Основы численных методов* / Л. И. Турчак. – М. : Наука, 1987. – 320 с.
14. Павлов В. А. *Исследование уплотнения порошкового титана в процессе горячей штамповки* / В. А. Павлов, А. П. Ляшенко, В. М. Анохин // *Исследования в области горячего прессования в порошковой металлургии.* – Новочеркасск, 1984. – С. 61–67.

Баглюк Г. А. – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПИ».

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: [omd@ukr.net](mailto:omd@ukr.net)

Статья поступила в редакцию 18.10.2012 г.