

УДК 621.762.4

Рябичева Л. А.  
Смоляк В. В.**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
РКУ-ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК**

Эффективными способами производства материалов с заданными свойствами являются различные методы интенсивной пластической деформации, к которым относится равноканальное угловое прессование (РКУ-прессование). РКУ-прессование позволяет получить высокоплотные порошковые материалы с ультрамелкодисперсной структурой, в результате чего качественно изменяются их свойства. В работах [1, 2] рассмотрены результаты компьютерного моделирования РКУ-прессования порошковой заготовки различной пористости без противодействия. Показано изменение очагов уплотнения и деформации в зависимости от физико-механических свойств материала и условий деформирования. При деформировании без противодействия участок образца, выходящий на свободную поверхность, не пропрессовывается и сохраняется плотность такая же, как у исходного образца. В работе [3] получено, что с помощью РКУ-прессования пористых заготовок при наличии противодействия можно достичь максимальной плотности при большой величине начальной пористости образца.

Целью данной работы является дальнейшее теоретическое и экспериментальное исследование уплотнения и пластического формоизменения порошковой пористой заготовки, подвергнутой РКУ-прессованию с противодействием за один и два прохода.

Математическое моделирование РКУ-прессования выполнено на основе закономерностей теории пластичности пористых тел, согласно которым пластический потенциал рассматривается как функция компонентов тензора напряжений, и которому в пространстве напряжений отвечает гладкая, выпуклая и замкнутая поверхность [4, 5]. Этот потенциал может быть представлен в виде:

$$F = \frac{\tau^2}{\varphi} + (1+m)^2 \frac{\left( p + \frac{m}{m+1} \bar{\rho} \sigma_s \sqrt{\psi} \right)^2}{\psi} - \bar{\rho} \sigma_s, \quad (1)$$

где  $p = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$  – среднее давление;

$\tau = \sqrt{(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})}$  – интенсивность касательных напряжений;

$\varphi = (1-\theta)^2$ ,  $\psi = \frac{2(1-\theta)^2}{3\theta}$  – функции пористости  $\theta$ ;

$\bar{\rho} = 1-\theta$  – относительная плотность.

$m$  – параметр, характеризующий степень несовершенства контактов в порошковой заготовке и определяющий разное сопротивление пористой заготовки при ее испытании на растяжение и сжатие.

Скорость изменения объема в результате пластической деформации:

$$e \sim \frac{2(1+m)^2}{\psi} p + \frac{2m(1+m)\sigma_0}{\sqrt{\psi}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение течения твердой фазы, которое является функцией накопленной деформации  $\omega$  и определяется по кривой упрочнения материала порошка при одноосном растяжении.

Напряжение течения твердой фазы может быть представлено в виде зависимости  $\sigma = \sigma_0 + K\omega^{0.5}$ , где  $K$  – коэффициент упрочнения. В расчетах принимали  $K/\sigma_0 = 0,5$ .

Скорость накопления деформации в твердой фазе пористого тела определялась на основе постулата В. В. Скорохода [6] об однозначности диссипативной функции:

$$\omega = \sqrt{1-\theta} \left( \frac{m}{1+m} \sqrt{\psi} e + \frac{\sqrt{(1+m)^2 \gamma^2 + e^2 \psi}}{1+m} \right), \quad (3)$$

где  $\gamma$  – скорость изменения формы.

Величина накопленной деформации  $\omega$  возобновляется путем решения дифференциального уравнения:

$$\frac{d\omega}{dt} = W, \quad (4)$$

где  $W$  – эквивалентная скорость деформации:

$$W = \frac{1}{\sqrt{1-\Theta}} \sqrt{\psi e^2 + \varphi \gamma^2}. \quad (5)$$

Для определения распределения интенсивности напряжений и деформаций, а также плотности использован метод конечных элементов, который представлен в виде последовательности процедур. Первой процедурой является триангуляция области пластически деформированного тела или переход от сплошной заготовки к ее конечно-элементному аналогу. При этом использовано требование экстремальности функционала:

$$J(v_i(x)) = \int_{\Omega} D(e_{ij}(V_i)) d\Omega + \int_{\partial\Omega_p} p_i v_i d(\partial\Omega), \quad (6)$$

где  $D(e_{ij}(V_i))$  – диссипативная функция;

$p_i$  – вектор напряжений на поверхности рассматриваемого образца;

$v_i$  – вектор скорости на той же поверхности.

Первый интеграл в формуле (6) представляет собой полную скорость диссипации энергии, второй интеграл – мощность внешних напряжений.

Для пористой заготовки, которая деформируется пластически, диссипативная функция  $D(e_{ij}(V_i))$  имеет вид:

$$D(e_{ij}(V_i)) = \frac{\sqrt{\gamma^2 \varphi + e^2 \psi}}{\sqrt{1-\theta}} \tau_s + \frac{p_0 e}{\sqrt{1-\theta}}, \quad (7)$$

$$\text{где } V_i = v(x); \quad e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right); \quad p_0 = -\sqrt{\frac{2}{3}} \tau_s \sqrt{\psi} \frac{m}{1+m};$$

$\tau_s$  – предел текучести твердой фазы на сдвиг.

Зависимости (1)–(7) использованы для конечно-элементного анализа РКУ-прессования медной пористой заготовки призматической формы сечением  $15 \times 15$  мм, длиной 59 мм, исходной пористостью 42 %.

Для верификации результатов моделирования выполнено экспериментальное исследование РКУ-прессования. Заготовки призматической формы сечением  $15 \times 15$  мм, длиной 59 мм, исходной пористостью 42 % получали из электролитического медного порошка марки ПМС-1 ГОСТ 4960-75 двусторонним прессованием на гидравлическом прессе модели ПД-476 силой 1600 кН. Спекание осуществляли в среде синтез-газа. РКУ-прессование выполняли по схеме, представленной на рис. 1, на гидравлическом прессе модели ПД-476 силой 1600 кН. Перед РКУ-прессованием на заготовку наносили координатную сетку размером

3 × 3 мм. Давление прессования для первого прохода составляло 890 МПа, а для второго прохода – 1330 МПа. Величину противодействия принимали для первого прохода 90 МПа, для второго – 150 МПа.

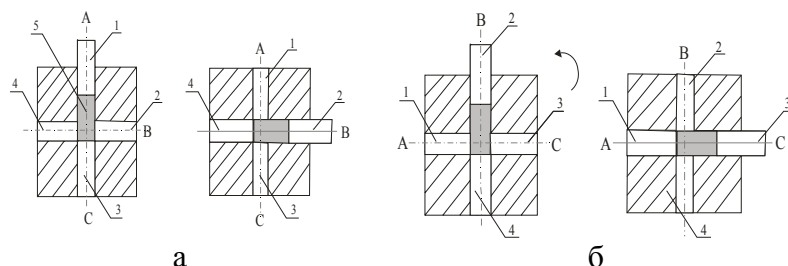


Рис. 1. Схема РКУ-прессования:  
а – первый проход; б – второй проход

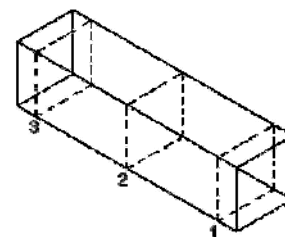


Рис. 2. Сечения заготовки

Распределение параметров напряженно-деформированного состояния по сечениям 1, 2 и 3 (рис. 2) после первого и второго проходов представлено на рис. 3. На первом проходе сечение 1 находится со стороны противодействия, сечение 3 – под пуансоном.

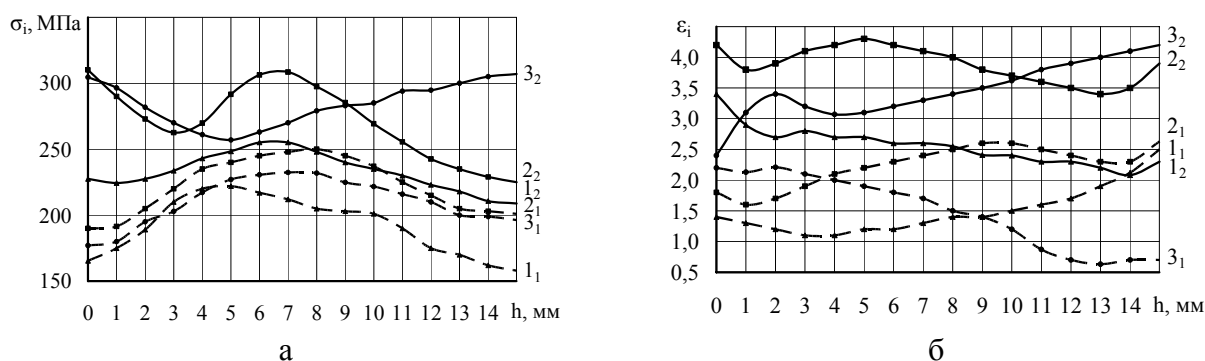


Рис. 3. Распределение интенсивностей напряжений (а) и деформаций (б) по сечениям 1, 2 и 3, полученное моделированием:

1<sub>1</sub>, 2<sub>1</sub>, 3<sub>1</sub> – после 1 прохода; 1<sub>2</sub>, 2<sub>2</sub>, 3<sub>2</sub> – после 2 прохода

Моделирование показало, что напряженно-деформированное состояние после первого прохода отличается выраженной неравномерностью (рис. 3, а). В сечении 1 наблюдается увеличение интенсивности напряжений с нижней грани заготовки к верхней, причем в очаге деформации максимальная интенсивность напряжений достигает 251 МПа. На верхней грани заготовки интенсивность напряжений довольно резко уменьшается. В сечении 2 наблюдается такой же характер изменения интенсивности напряжений с несколько большей величиной в очаге деформации. В сечении 3 под пуансоном под действием сил трения формируется второй очаг деформации, подобно закрытой осадке: интенсивность напряжений возрастает от нижней грани к верхней. При этом под пуансоном интенсивность напряжений равна 198 МПа.

Второй проход осуществляется после поворота заготовки: сечение 1 занимает место под пуансоном, сечение 3 – со стороны противодействия, обозначения остаются те же. В сечении 1 со стороны противодействия наблюдается уменьшения интенсивности напряжений с нижней грани до верхней. В сечении 2 остается очаг деформации с максимальной интенсивностью напряжений, но при этом размер его меньше вследствие упрочнения твердой фазы, полученного на первом проходе. В сечении 3 под пуансоном наблюдается уменьшение неравномерности интенсивности напряжений (рис. 3, а).

Изменение интенсивности деформаций свидетельствует о том, что после первого прохода очаг деформации занимает основную центральную часть заготовки, охватывая объем заготовки от пуансона до противодействия. При этом интенсивность деформации максимальна в очаге деформации и на угловой части верхней грани. После второго прохода объем очага деформации уменьшается, уплотнение минимально, происходит деформация частиц порошка. Очевидно скорость изменения объема заготовки уже меньше скорости формоизменения.

Экспериментально проверенное распределение интенсивности деформаций показано на рис. 4. Характер и величина интенсивности деформаций подобна картине, полученной моделированием. После первого прохода на верхней грани заготовки в сечении 1 получено разрыхление, что свидетельствует о недостаточной величине противодействия. После второго прохода с увеличением противодействия до 150 МПа заготовка не имела рыхлости и трещин. Координатная сетка была сильно искажена. В очаге деформации наблюдалось образование вихрей, что свидетельствует об интенсивности образования высокоугловых границ [7].

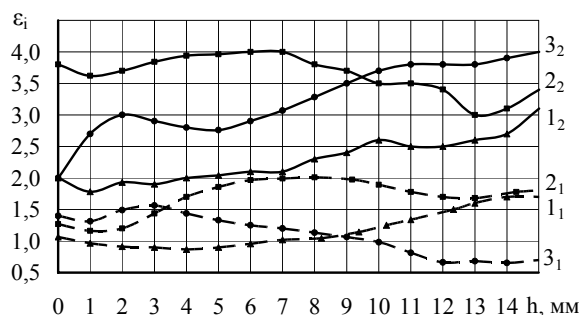


Рис. 4. Распределение интенсивности деформаций по сечениям 1, 2 и 3 (экспериментальное): 1<sub>1</sub>, 2<sub>1</sub>, 3<sub>1</sub> – после 1 прохода; 1<sub>2</sub>, 2<sub>2</sub>, 3<sub>2</sub> – после 2 прохода

Для экспериментальной оценки напряженного состояния исследовали изменение микротвердости по продольному сечению образца после первого и второго проходов (рис. 5). После первого прохода наблюдается немонокотное распределение микротвердости. При росте интенсивности деформаций уровень микротвердости по сечению образца увеличивается от наружных граней к центру. В очаге деформации получена максимальная микротвердость 714 МПа, соответствующая максимальной интенсивности деформаций. В зоне со стороны противодействия микротвердость составила 480 МПа при интенсивности деформаций 1,2, что связано с развитием рыхлости. После второго прохода с ростом накопленной деформации наблюдается прирост микротвердости, при этом уменьшается разбег значений между поверхностью и центром образца. В зоне очага деформации получена максимальная микротвердость 780 МПа, здесь же наблюдается зарождение вихревого поля, которое связано с поперечным перетеканием материала в плоскости, перпендикулярной к оси деформации. Основному росту микротвердости в средней зоне и зоне под пуансоном соответствует максимальная интенсивность деформации, которая после второго прохода составляла 4,0.

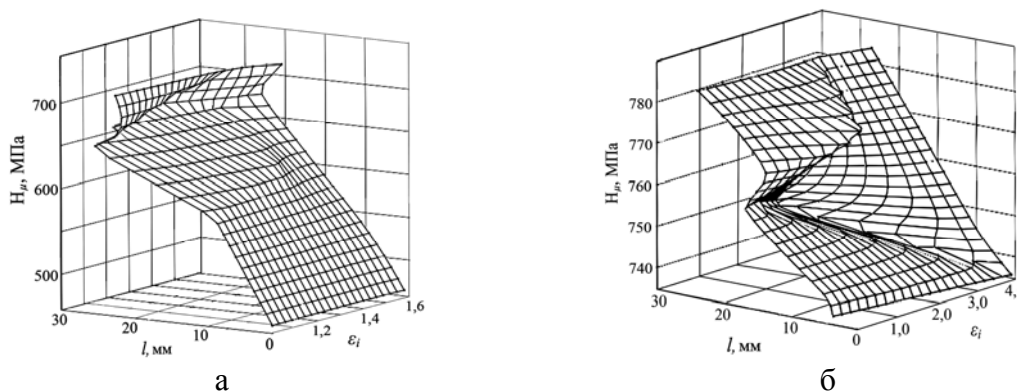


Рис. 5. Изменение микротвердости по продольному сечению заготовки: а – после первого прохода; б – после второго прохода

Распределение относительной плотности по длине образца показано на рис. 6. Установлено, что в объеме образца после первого прохода можно выделить три зоны: 1 – зона разрыхления, возникающая со стороны противодействия; 2 – средняя зона, в которой получена максимальная плотность; 3 – зона под пуансоном. Размер каждой из зон составил около 10 мм. При этом со стороны противодействия глубина нарушенного слоя после первого прохода

составила 0,4 мм. Неравномерное распределение относительной плотности после первого прохода объясняется неравномерностью напряженно-деформированного состояния заготовки и действием сил трения. После второго прохода относительная плотность практически равная 1 наблюдается в зонах 2 и 3. Со стороны противодействия плотность уменьшается. Погрешность определения плотности методом конечных элементов составила 0,7–1,2 %.

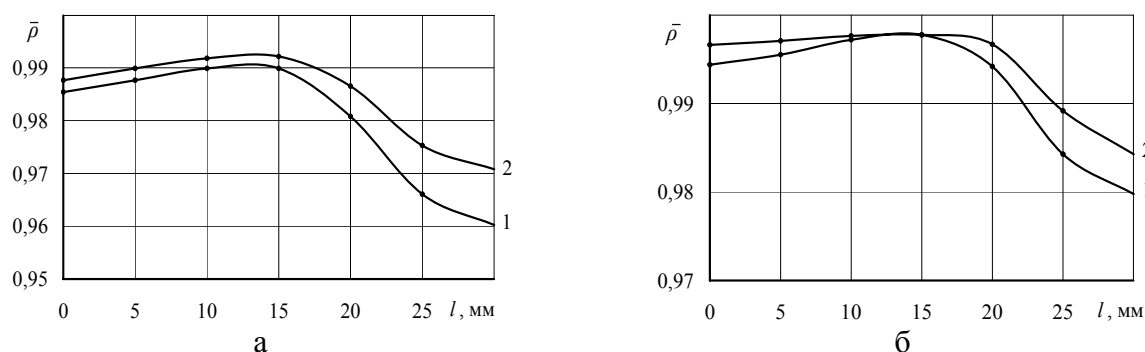


Рис. 6. Распределение плотности по длине образцов после РКУ-прессования:

а – после первого прохода; б – после второго прохода (1 – экспериментальная зависимость; 2 – расчетная зависимость)

## ВЫВОДЫ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что после первого прохода РКУ-прессования порошковой пористой заготовки с использованием противодействия 90 МПа по всему объему заготовки получена плотность меньше, чем плотность компактного материала. Очаг деформации занимает большой объем, охватывая все три зоны, выделенные в заготовке. Напряженно-деформированное состояние неравномерное. После второго прохода с противодействием 150 МПа получена высокоплотная заготовка без разрыхления и трещин с более равномерным напряженно-деформированным состоянием. Размер очага деформации уменьшается. Оценкой микротвердости установлено наличие зоны турбулентности, обеспечивающей фрагментацию структуры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Equal channel angular extrusion of porous billets: computer simulation and experimental study / A. Maydanyuk, M. Shtern, G. Bagluck, L. Ryabicheva // *The International congress and exhibition EURO PM 2010 proceedings, October 10–14, 2010. – Florence, 2010. – Vol. 3. – P. 1206–1212.*
2. Эволюция распределения плотности при равноканальном угловом прессовании пористых заготовок / А. П. Майданюк, Л. А. Рябичева, М. Б. Штерн, Г. А. Баглюк // *Вісн. Східноукр. націон. ун-ту.* – 2008. – № 3, Ч. 2. – С. 213–216.
3. Рябичева Л. А. Деформационное поведение порошковой пористой заготовки при РКУ-прессовании / Л. А. Рябичева, В. В. Смоляк // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*, 2010. – С. 150–156.
4. Modeling Sintering Deformations occurring After Cold Compaction, Qualitative Methods for the Mechanics of Compaction / N. Favrot, J. Besson, C. Colin, F. Delannay, Y. Bienvenu // *Proceedings of the International Workshop on Modeling of Metal Powder Forming Process, Grenoble, France, 21–23 July 1997. – P. 133–147.*
5. Штерн М. Б. Феноменологические теории прессования порошков / М. Б. Штерн [и др.]. – К. : Наукова думка, 1982. – 140 с.
6. Скороход В. В. Реологические основы теории спекания / В. В. Скороход. – К. : Наукова думка, 1972. – 152 с.
7. Бейгельзимер Я. Е. Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью / Я. Е. Бейгельзимер // *Физика и техника высоких давлений.* – 2008. – Т. 18. – № 4. – С. 77–86.

Рябичева Л. А. – д-р техн. наук, проф. ВНУ им. В. Даля;

Смоляк В. В. – аспирант ВНУ им. В. Даля.

ВНУ им. В. Даля – Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, г. Луганск.

E-mail: ryabic@gmail.com