

$$\dot{\varepsilon}_i(\rho) = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\lambda^2}{r_d^2 - R_h^2 + \lambda^2}} \right), \quad (8)$$

где

$$\lambda = r_d \left[ \exp \left( \frac{T_{bh} - T_o}{T_p - T_o} \right) \right] \left[ \frac{\varepsilon_i(r_d)}{\varepsilon_i(\rho)} \right]^n \left[ \frac{\dot{\varepsilon}_i(r_d)}{\dot{\varepsilon}_i(\rho)} \right]^m,$$

где  $R_h$  - радиус наружного края фланца;

$T_{bh}, T_o, T_p$  - температуры наружного, внутреннего края фланца и текущая.

Там же, приведены зависимости, позволяющие определить распределение температур, обеспечивающие однородность деформаций.

Таким образом, разработан метод расчета параметров внешнего нагружения, обеспечивающий идеальное протекание процесса пластического деформирования. Установлено, что в этом случае в качестве критерия оптимизации параметров нагружения необходимо использовать условия, обеспечивающие однородность поля деформации и скоростей деформаций. Наиболее рационально реализовать идеальный процесс пластического деформирования, используя «температурную и силовую интенсификацию процессов».

**Список литературы:** 1. Ершов В.И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки/В.И.Ершов, В.И.Глазков, М.Ф.Каширин. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с. 2. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением/В.А.Огородников. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с. 3. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование/Д.Химмельблау – М.: Мир, 1975. – 534 с. 4. Стеблюк В.И. Определение оптимального температурного поля при глубокой вытяжке с дифференцированным нагревом / В.И.Стеблюк, А.Г.Некрасов, И.Л.Семеренко – Кузнечно-штамповочное производство. № 11, 1989. – с. 32-34.

**УДК 621.762**

**РЯБИЧЕВА Л.А.**, докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой материаловедения Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, г. Луганск

**ЛЮБЧИЧ К.В.** аспирант, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск

## **АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РАДИАЛЬНО-ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОВОК**

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние при радиально-прямом выдавливании порошковой пористой заготовки при различном противодавлении. Получено уменьшение неравномерности деформаций и увеличение плотности с ростом противодавления.

Ключевые слова: выдавливание, напряжение, деформация, плотность.

Розглянуто напружено-деформований стан при радіально-прямому видавлюванні порошкової пористої заготовки при різному противотиску. Отримано зменшення нерівномірності деформацій і збільшення щільності з ростом противотиску.

Ключові слова: видавлювання, напруження, деформація, щільність.

A stress-strain state at radial-direct extrusion of powder porous billet at different back pressure has been observed. The reduction of non-uniformity of deformations and density increasing have obtained while growth of back pressure.

Keywords: extrusion, stress, strain, density.

В технологиях изготовления деталей тел вращения с отверстиями и глухими полостями из порошковых материалов методами обработки давлением широко используются различные виды выдавливания. Согласно рекомендациям Головина В.А. [1], полые детали с дном обычно получают обратным выдавливанием, которое характеризуется высокими давлениями и сложными условиями работы пуансона. Исследование обратного выдавливания полых деталей довольно глубоко представлено в работах И.О. Сивака [2], О.В. Романа [3], в которых подробно рассмотрена эволюция очага деформации при различных условиях нагружения и решен вопрос по использованному ресурсу пластичности. В.А. Головин не отрицает возможности изготовления полых деталей прямым выдавливанием. При этом уменьшается давление на пуансон за счет уменьшения реактивных сил трения. При выдавливании полых деталей из пористых заготовок, когда деформированию предшествует стадия уплотнения, целесообразным является применение прямого выдавливания. В.А. Евстратов [4] отмечает, что при выдавливании гладких стаканов существуют ограничения на минимальную толщину стенки и на максимальную глубину выдавливаемой полости.

Целью работы является экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния при радиально-прямом выдавливании порошковых пористых заготовок с различной глубиной полости с использованием противодавления.

При выдавливании полых деталей с различной толщиной стенки на течение металла и качество оказывает влияние соотношение размеров: глубины полости  $h$  и толщины стенки  $b$ , а также соотношение глубины полости  $h$  и радиуса изделия  $0,5D$ . В данной работе рассматривается выдавливание изделий с соотношением  $h/0,5D < 1,5$  и  $h/b < 3,1$ .

Образцы для исследования изготавливали из медного порошка марки ПМС-1 ГОСТ 4960-75 по следующей технологии: прессование на гидравлическом прессе модели ПД-476 усилием 1000 кН цилиндрических заготовок пористостью 20%; спекание по ступенчатому режиму в шахтной лабораторной печи в среде синтез-газа; радиально-прямое выдавливание по схеме, показанной на рис. 1. Исходную прессовку 3 устанавливали в матрицу 1 на подвижный пуансон 5 с противодавлением, создаваемым подвижным упором 6. Верхним пуансоном 2 выдавливали образец 5. Диаметр матрицы – 32,0 мм, диаметр контрпуансона для выдавливания полости – 18,0 мм.

Для исследования кинематики процесса радиально-прямого выдавливания на меридиональное сечение одной из половинок исходной прессовки наносили координатную сетку шагом 2 мм с помощью координатно-расточного станка. Элементы продеформированной сетки измеряли на инструментальном микроскопе. Поле деформаций рассчитывали по методике И.П. Рене [5]. Плотность исследовали методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 25281-82. Для выполнения расчетов использован стандартный программный пакет «Mathematica 5.0».

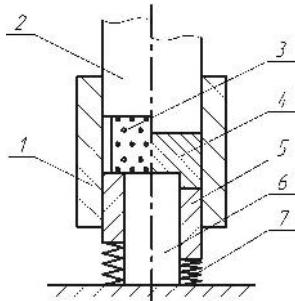


Рис. 1. Схема радиально-прямого выдавливания

Выполнен анализ относительной плотности образцов в зависимости от отношения  $h/0,5D$  (рис. 2). С ростом отношения  $h/0,5D$  относительная плотность  $\rho$  растет при выдавливании с любой величиной противодавления до беспористого состояния. Однако при противодавлении 95 МПа она значительно больше, и относительная плотность равная 1 достигается при отношении  $h/0,5D=0,56$ . Кроме того, визуально установлено, что при противодавлении 50 МПа на торцевой части образца наблюдается утяжина, а при противодавлении 95 МПа и глубине полости 18,2 мм образцы имеют правильную форму и дефектов не обнаружено.

На рис. 3 показаны искаженные координатные сетки образцов, деформированных на различную глубину полости при противодавлении 95 МПа.

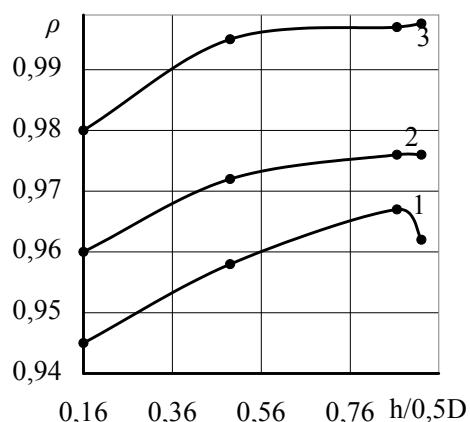


Рис. 2. Изменение плотности образцов в зависимости от величины противодавления: 1 – без противодавления; 2 – с противодавлением 50 МПа; 3 – с противодавлением 95 МПа

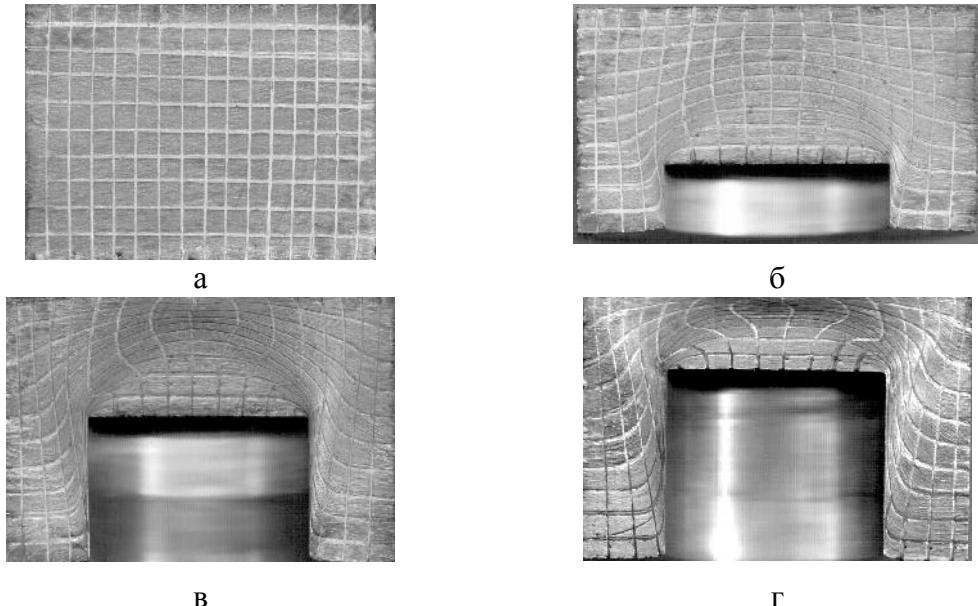


Рис. 3. Эволюция очага деформации при различной относительной глубине полости: а – после осадки; б –  $h/0,5D=0,35$ ; в –  $h/0,5D=0,87$ ; г –  $h/0,5D=1,225$

На первом этапе происходит осадка, радиальное течение металла и заполнение полости матрицы. При этом плотность быстро растет. На втором этапе осуществляется процесс выдавливания полости. Образец на рис.3,а получен закрытой осадкой со степенью структурной деформации равной 20%. Уплотнение материала при закрытой осадке позволило уменьшить пористость с 20 до 6%.

При относительной глубине полости  $h/0,5D = 0,35$  можно четко различить начало образования очага деформации под верхним пуансоном и распространение его на углы закругления контрпуансона (рис. 3,б). С увеличением глубины полости до  $h/0,5D=0,87$  (рис. 3,в) и  $h/0,5D=1,225$  (рис. 3,г) наблюдается сжатие ячеек координатной сетки в осевом направлении и растяжении в радиальном. Очаг деформации смещается к верхнему пуансону.

Эволюция очага деформации при различной глубине полости также подтверждается анализом интенсивности деформаций (рис. 4). С ростом глубины полости наблюдается рост компонент деформации и уменьшается неравномерность. При удалении от оси симметрии характер распределения компонент деформаций в очаге меняется. В месте закругления пуансона величина компонент деформации значительна, но по мере удаления к стенке она снижается. Изменение компонент деформации вдоль радиальной линии, проходящей через очаг деформации, показывает, что при удалении от оси симметрии характер деформации становится более равномерным с максимумом вблизи оси образца. С увеличением глубины полости образца в месте перехода от донной части к кольцевой наблюдается рост компонент деформации, причем градиент изменения компоненты деформаций в этом месте больше, чем под верхним пуансоном. Рост компонент деформаций в дальнейшем приводит к увеличению градиента напряжений и разрушению образца.

При противодавлении 50 МПа по сечению образца видна резкая неравномерность деформированного состояния. Наибольшая интенсивность

деформации получена в очаге деформации под верхним пуансоном и на углах закругления нижнего контрпуансона. На торце образца в местах образования утяжин интенсивность деформации изменяется в пределах 0,76-1,00.

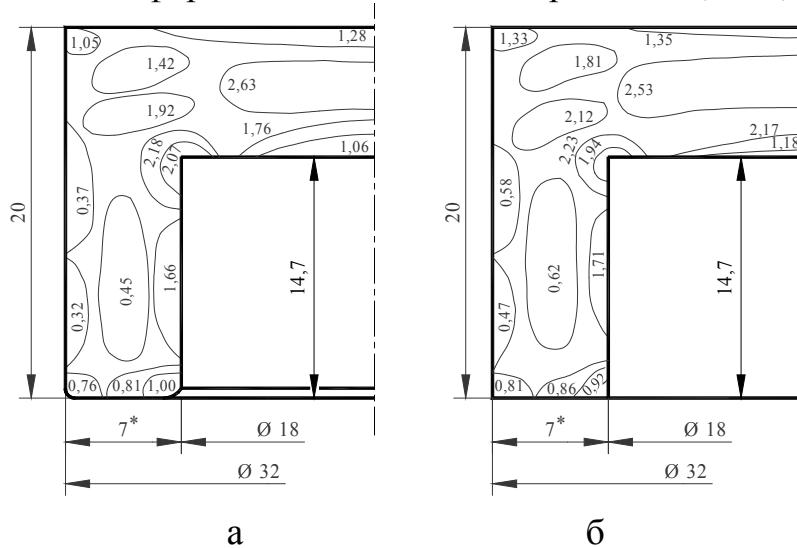


Рис. 4. Интенсивность деформаций при выдавливании: а – с противодавлением 50 МПа; б – с противодавлением 95 МПа

Рост противодавления до 95 МПа обеспечило понижение неравномерности деформаций и получение качественного образца. Интенсивность деформации в очаге под пуансоном несколько снизилась, а на торцах и в кольцевой части образца увеличилась.

Поискаженной координатной сетки определяли скорости изменения высоты и радиуса образца (скорости течения) -  $\dot{h}$ ,  $\dot{a}$ . В силу предположения об однородности напряженного состояния имеет место поле скоростей [6]:

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{\dot{h}}{h} z, \\ V_r &= \frac{\dot{a}}{a} r. \end{aligned} \quad (1)$$

Скорости деформаций при осесимметричном напряженном состоянии определяли по соотношениям:

$$e_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}, e_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}, e_\varphi = \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi}. \quad (2)$$

Интенсивность скоростей деформации рассчитывали по формуле:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(e_z - e_r)^2 + (e_z - e_\varphi)^2 + (e_\varphi - e_r)^2}. \quad (3)$$

На рис. 5 показаны изолинии распределения интенсивностей скоростей деформаций, рассчитанных по формуле (3).

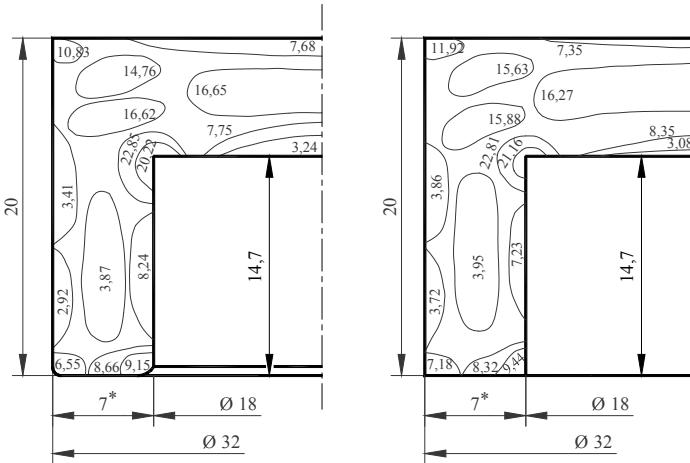


Рис. 5. Интенсивность скоростей деформаций при выдавливании:  
а – с противодавлением 50 МПа; б – с противодавлением 95 МПа

В основе определения компонент тензора напряжений лежит соотношение между напряжениями и скоростями деформаций при пластическом деформировании пористого образца. Оно имеет вид [6]:

$$\sigma_{ij} = \frac{\sigma}{W} \left( \left( \varphi - \frac{1}{3} \psi \right) e \delta_{ij} + \varphi e_{ij} \right), \quad (4)$$

где  $\sigma_{ij}$  - компоненты тензора напряжений;

$\sigma$  - эквивалентное напряжение;

$e_{ij}$  - компоненты тензора скоростей деформаций;

$\varphi, \psi$  - функции пористости;

$W$  – эквивалентная скорость деформаций;

$e$  - первый инвариант тензора скоростей деформаций:

$$e = e_z + e_r + e_\varphi. \quad (5)$$

Функции пористости определяются из выражений [7]:

$$\varphi = \frac{(1 - k_2 \theta)^2}{1 - \left( 1 + \frac{1}{3} k_1 \right) \theta} (1 - \theta),$$

$$\psi = \frac{1}{2} \frac{(1 - \theta)(1 - k_2 \theta)^2}{k_1 \theta},$$

где  $k_1, k_2$  - коэффициенты, являющиеся мерой чувствительности пористых тел к скорости деформации.

Для медных порошковых материалов коэффициент  $k_1 = 2,34$ , коэффициент  $k_2 = 0,07$  при пористости 5%.

Из закона сохранения массы следует, что

$$e = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad (6)$$

где  $\frac{d\rho}{dt}$  - изменение плотности  $\rho$  во времени  $t$ .

Эквивалентная скорость деформаций находится из выражения:

$$W = \frac{1}{\sqrt{1-\theta}} \sqrt{\psi e^2 + \varphi \gamma^2}. \quad (7)$$

Эквивалентное напряжение  $\sigma$  является функцией эквивалентной скорости деформаций  $W$  и эквивалентной деформации  $\omega$ . Эквивалентная деформация определяется из уравнения:

$$\frac{d\omega}{dt} = W. \quad (8)$$

Общий вид функции  $\sigma = f(W, \omega)$  определяется исходя из поведения твердой фазы пористого тела. Для этого образец, полученный из материала основы (пористость отсутствует) подвергали одноосному сжатию. В ходе испытания определяли напряжение  $\sigma_z$ , скорость деформации  $e_z = \dot{h}/h$  и степень деформации  $\varepsilon_z = \ln(h_0/h)$ , где  $h$  - текущая высота, а  $h_0$  - начальная высота образца. В результате математической обработкой результатов испытаний получили зависимость  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$ .

Учитывая, что при одноосном сжатии беспористого образца

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{3}{2}}\sigma, \quad e_z = \sqrt{\frac{3}{2}}\sigma, \quad \varepsilon_z = \sqrt{\frac{3}{2}}W, \quad (9)$$

искомую зависимость можно представить в виде

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{3}}F\left(\sqrt{\frac{3}{2}}W, \sqrt{\frac{3}{2}}\omega\right). \quad (10)$$

По полученным компонентам тензора напряжений определяли интенсивность напряжений по формуле:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (11)$$

По экспериментально полученным компонентам тензора скоростей деформаций с использованием уравнений (4), (5), (11) построены поля распределения интенсивности напряжений:

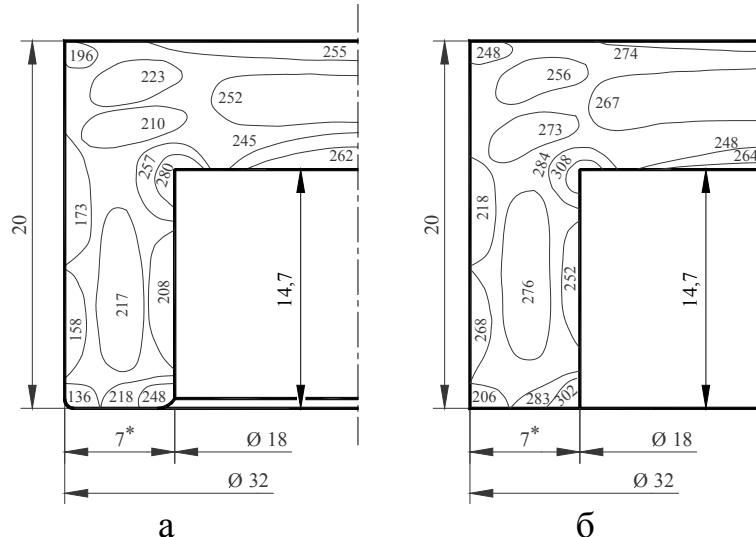


Рис. 6. Интенсивность напряжений при выдавливании:  
а – с противодавлением 50 МПа; б – с противодавлением 95 МПа

Рост величини противодавлення приводить до зростання напруженостей як у очах деформації, так і за його межами, однаково нерівномірність напруженостей зменшується. Отримані дані щодо розподілу інтенсивностей деформацій, швидкостей деформацій та напруженостей у сеченні проби свідчать про те, що протидавлення 95 МПа забезпечує отримання якісного проби з найменшою нерівномірністю напружено-деформованого стану та достаточною густинною.

**Список літератури:** 1. Головин В.А. Технология холодной штамповки выдавливанием / В.А. Головин, А.М. Мит'кин, А.Г. Резников//М.: Машиностроение, 1970.–152 с. 2. Сивак І.О. Оцінка здеформованості заготовок в процесах холодного зворотнього видавлювання / І.О. Сивак, І.Ю. Кириця, Н.В. Нікітіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2007, №6. – С. 92-96. 3. Велюга Л.Д. Напряженно-деформированное состояние пористой заготовки при обратном выдавливании / Л.Д. Велюга, Е.А. Дорошкевич, Е.В. Звонарев, О.В. Роман // КШП, 1981, №1. – С. 7-10. 4. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов/В.А. Евстратов//Х.: Вища шк.Изд-во при Харк.ун-те,1987.–144 с. 5. Рене И.П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки / И.П. Рене // Тула, ТПИ, 1970. – 146 с. 6. Штерн М.Б. Феноменологические теории прессования порошков / М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко // К.: Наук. Думка, 1982. – 140 с. 7. Orlova Yu., Ryabicheva L. Micromechanical and generalized Phenomenological Models of Strain-rate Sensitive Porous Bodies / Yu. Orlova, L. Ryabicheva // Proceedings of International Symposium on Sinegistic Effects on Materials and Processing (ISSEMP 2006), September 19, 2006, Kimamoto University, Kumamoto, Japan. – P. 33-38.

УДК 621.762.4

**РЯБИЧЕВА Л.А.**, докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой материаловедения  
Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, г. Луганск  
**СМОЛЯК В.В.** аспирант, Восточноукраинский национальный университет  
им. В. Даля, г. Луганск

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ ПОРИСТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ РКУ-ПРЕССОВАНИИ

Изучено деформированное состояние и изменение плотности порошковых пористых образцов с исходной пористостью 42% методом координатных сеток и микротвердости после РКУ-прессования. Получен беспористый материал после первого прохода. Показано распределение интенсивности сдвиговой деформации и микротвердости. Ключевые слова: равноканальное угловое прессование, интенсивность деформаций, плотность, микротвердость.

Вивчено деформований стан та зміна щільності порошкових пористих зразків з вихідною пористістю 42% методом координатних сіток та мікротвердості після РКК-пресування. Отримано беспористий матеріал після першого проходу. Показано розподіл інтенсивності зсувної деформації і мікротвердості.

Ключові слова: рівноканальне кутове пресування, інтенсивність деформацій, щільність, мікротвердість.