

УДК 621.73.06

Рябичева Л. А.  
Усатюк Д. А.  
Рябовол Т. А.

## СИЛОВЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАКРЫТОЙ ОСАДКИ

Одной из основных операций технологического процесса изготовления порошковых деталей является операция окончательного формоизменения, позволяющая получить необходимую форму и размеры детали. Осадка в закрытой матрице является самой простой схемой деформирования и характеризуется высокой производительностью, точностью и стабильностью размеров детали, позволяет уменьшить разноплотность при оптимальной величине трения [1]. Для статических процессов характерно постепенное возрастание давления до максимального значения и низкие скорости деформирования. Важной задачей при разработке технологии изготовления изделий является выбор оптимальной схемы деформирования, сводящий к минимуму влияние внешних сил трения.

При осадке в закрытой матрице используются порошковые пористые заготовки простой и сложной формы, приближающейся к форме детали. Наиболее распространенной операцией является осадка с радиальным течением металла, заходящим в полость матрицы пуансоном [2]. При такой схеме на первой стадии деформирования до соприкосновения заготовки со стенками матрицы повышается плотность изделия. На последующей стадии происходит затекание металла в труднозаполняемые места и доуплотнение заготовки. Для получения необходимой плотности изделия диаметр отверстия матрицы рассчитывается исходя из предельной степени деформации данного материала. В связи с простотой изготовления инструмента осадка в закрытой матрице может быть использована для отработки технологического процесса изготовления порошкового материала со сложными свойствами.

Целью данной работы является изучение распределения напряжений, деформаций и плотности, а также оценка силовых и энергетических параметров процесса осадки в закрытой матрице пуансоном, заходящим в полость матрицы.

Исходным материалом выбрана порошковая пористая медь, легированная титаном марки ВТ1-0 в количестве 0,5 % по массе. Заготовки диаметром 10 мм, высотой 20 мм, исходной пористостью 15 % получали двухсторонним прессованием на гидравлическом прессе ПД-476 силой 1600 кН. Скорость деформации  $0,1 \text{ с}^{-1}$ . Спекание прессовок проводили в защитной среде синтез-газа (72 %  $\text{H}_2$ , 21 %  $\text{CO}$ , 5,5 %  $\text{CO}_2$ , 1,5 %  $\text{H}_2\text{O}$ ) по ступенчатому режиму [3]. Холодную штамповку выполняли в закрытом штампе на этом же прессе. В качестве смазки использовали дисульфид молибдена, коэффициент трения 0,05.

Компьютерное моделирование осуществляли с использованием метода конечных элементов на основе основных закономерностей теории пластичности порошковых пористых тел [4]. На рис. 1, а представлена расчетная схема закрытой осадки, на рис. 1, б – схема зон, образующихся при осадке, в которых анализировали напряженно-деформированное состояние, а также изменение плотности.

Выполнен анализ истории нагружения в различных зонах образца в течение деформирования (рис. 2). На начальной стадии во всех зонах образца происходит увеличение интенсивности напряжений (рис. 2, а). Наиболее высокие их величины достигаются в очаге деформации и в боковой зоне. В очаге деформации наблюдается резко выраженная объемная схема всестороннего неравномерного сжатия, в то время как в боковой зоне разноименное плоское напряженное состояние. В зонах 3 и 4 наличие контактного трения приводит к уменьшению интенсивности напряжений. Причем в зоне 3 под верхним пуансоном интенсивность напряжений больше [5]. Аналогично изменяется интенсивность деформаций (рис. 2, б), достигая на последней стадии осадки величины равной 1,2. К началу второго этапа деформирования на кривых наблюдается перегиб. К концу операции происходит выравнивание напряженно-деформированного состояния по всему объему образца.

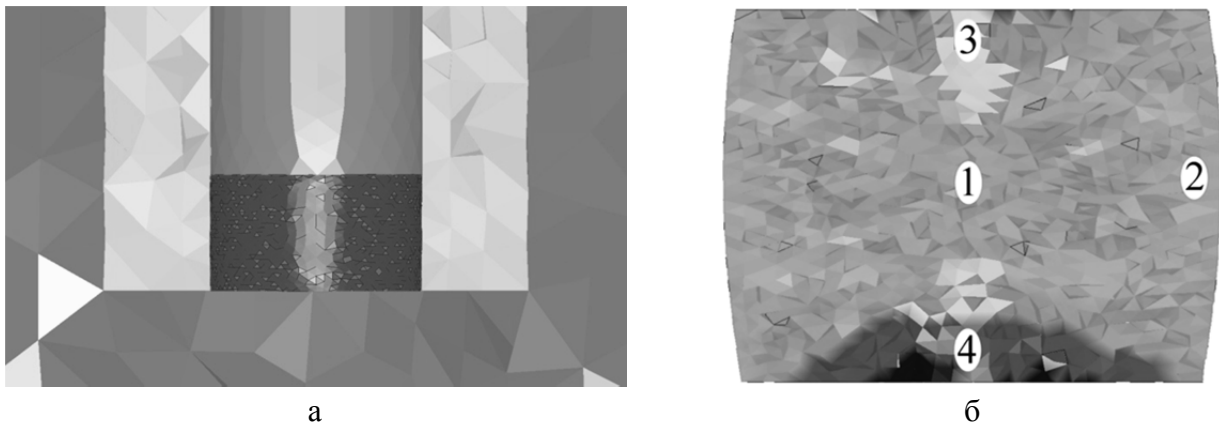


Рис. 1. Расчетная схема закрытой осадки (а); зоны, образующиеся при осадке (б):

1 – очаг деформации; 2 – боковая зона; 3 – зона под верхним пуансоном; 4 – зона над нижним пуансоном

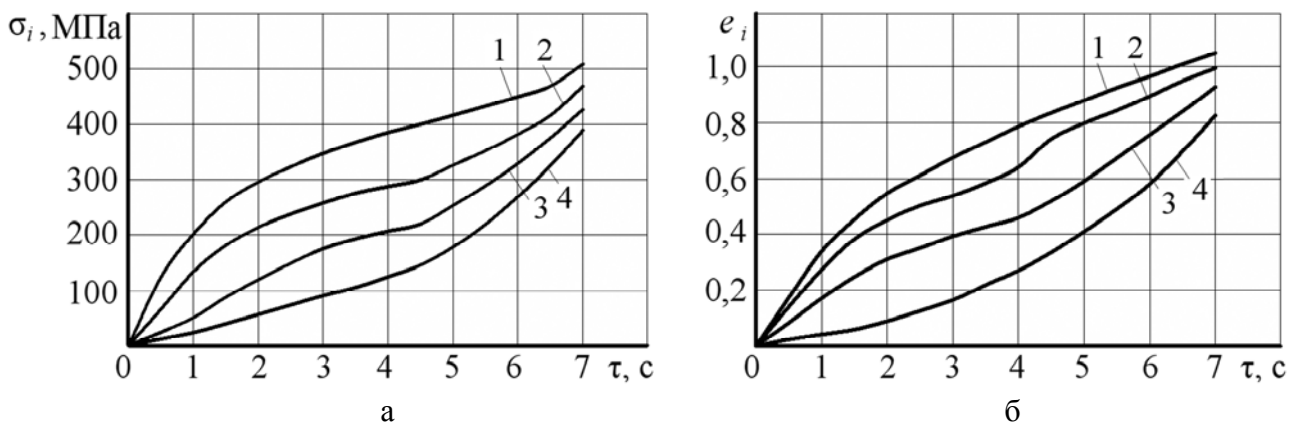


Рис. 2. Изменение интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) при закрытой осадке:

1 – очаг деформации; 2 – боковая зона; 3 – зона под верхним пуансоном; 4 – зона над нижним пуансоном

Наличие различных зон напряженно-деформированного состояния в заготовке влияет на распределение плотности в течение осадки (рис. 3). К концу операции достигается относительная плотность равная 0,92–0,94. Остаточная пористость составляет в среднем 6 %. Изменение плотности, определенное экспериментально на разных этапах осадки, практически совпадает со значениями плотности, рассчитанными теоретически.

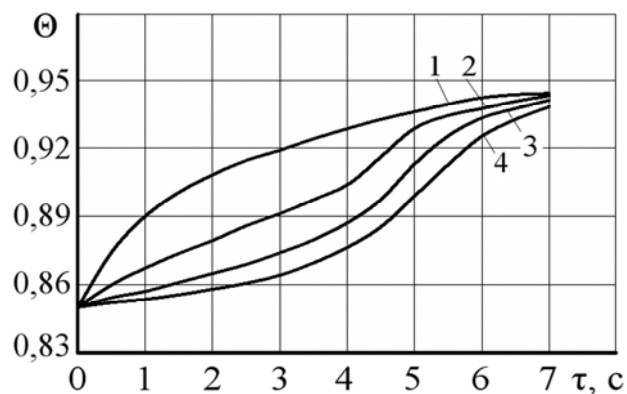


Рис. 3. Распределение относительной плотности при закрытой осадке:

1 – очаг деформации; 2 – боковая зона; 3 – зона под верхним пуансоном; 4 – зона над нижним пуансоном

Для анализа пластического течения порошкового пористого тела используем основные соотношения теории пластичности [4]. Исходя из этого, можно записать:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_S = \sigma_0, \quad (1)$$

где  $\sigma_S$  – напряжение течения материала твердой фазы при одноосном сжатии. Условие пластичности пористого материала используем в виде:

$$\sigma_z^2 - 4\nu\sigma_r\sigma_z + 2(1-\nu)\sigma_r^2 = (1-\theta)\varphi(1-\nu)\sigma_0^2, \quad (2)$$

где  $\sigma_r, \sigma_z$  – радиальное и осевое напряжения;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\varphi, \psi$  – функции пористости;

$\theta$  – пористость.

С учетом соотношения:

$$(1-\nu)\sigma_r - \nu\sigma_z = 0, \quad (3)$$

получим систему уравнений для определения радиального  $\sigma_r$  и осевого  $\sigma_z$  напряжений.

Решение системы уравнений (2) и (3) имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\sqrt{(1-\theta)\varphi} \sqrt{\frac{1-\nu}{1-2\nu}} \sigma_0, \\ \sigma_r &= -\sqrt{(1-\theta)\varphi} \frac{\nu}{\sqrt{1-\nu}\sqrt{1-2\nu}} \sigma_0. \end{aligned} \quad (4)$$

или в переменных функций пористости  $\varphi, \psi$ :

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\sqrt{(1-\theta)} \sqrt{\psi + \frac{2}{3}\varphi} \sigma_0, \\ \sigma_r &= -\sqrt{(1-\theta)} \frac{\psi - \frac{1}{3}\varphi}{\sqrt{\psi + \frac{2}{3}\varphi}} \sigma_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Используя выражения для функций пористости  $\varphi$  и  $\psi$ , уравнения (5) можно выразить через пористость:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{(1-\theta)^{3/2}}{\sqrt{\theta}} \sigma_0, \\ \sigma_r &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{3}{2}\theta\right) \frac{(1-\theta)^{3/2}}{\sqrt{\theta}} \sigma_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Закон деформационного упрочнения материала твердой фазы используем в виде:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + K \omega^n, \quad (7)$$

где  $K, n$  – коэффициент и показатель деформационного упрочнения.

Для определения накопленной деформации твердой фазы  $\omega$  используем выражение для эквивалентной скорости деформации твердой фазы:

$$W = \sqrt{\frac{\varphi}{1-\theta}} \frac{1}{\sqrt{1-2\nu}} \left( (1-\nu)e_z^2 + 4\nu e_r e_z + 2e_r^2 \right)^{1/2}, \quad (8)$$

где  $e_r, e_z$  – радиальная и осевая скорость деформации.

Для осадки в жесткой матрице полагаем  $e_r = 0$ .

Тогда:

$$\omega = -\sqrt{\frac{\varphi}{1-\theta}} \sqrt{\frac{1-\nu}{1-2\nu}} e_z, \quad (9)$$

$$(e_z < 0).$$

Из закона сохранения массы следует, что в силу равенства нулю  $e_r$ :

$$e_z = -\frac{\dot{\rho}}{\rho} = \frac{\dot{\theta}}{1-\theta}.$$

Поэтому:

$$\omega = -\int_{\theta_H}^{\theta} \sqrt{\frac{\varphi}{1-\theta}} \sqrt{\frac{1-\nu}{1-2\nu}} \frac{1}{1-\theta} d\theta. \quad (10)$$

Окончательное выражение  $\omega$  через относительную плотность имеет вид:

$$\omega = -2\sqrt{\frac{2}{3}} \left( \arcsin \sqrt{\Theta} - \arcsin \sqrt{\Theta_H} \right). \quad (11)$$

Полагая, что  $\sigma_z$  в данном случае есть давление  $P_{oc}$ , необходимое для достижения заданной плотности, находим:

$$P_{oc} = -2 \left( \frac{2}{3} \right)^{3/2} \frac{(1-\theta)^{3/2}}{\sqrt{1-\theta}} \left( K \left( \arcsin \sqrt{\Theta} - \arcsin \sqrt{\Theta_H} \right)^n + \sigma_{s0} \right). \quad (12)$$

По определению работа деформирования равна:

$$A = \int_0^t \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} e_{ij} dt, \quad (13)$$

где  $\sigma_{ij}, e_{ij}$  – компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций;  
 $\rho$  – плотность.

В соответствии с данными [4]:

$$\sigma_{ij}e_{ij} = pe + \tau\gamma, \quad (14)$$

где  $p, \tau$  – гидростатическое давление и интенсивность касательных напряжений. При пластическом деформировании симметричного пористого материала:

$$pe + \tau\gamma = (1 - \theta)\sigma_0(\omega)W. \quad (15)$$

Поскольку  $W = \frac{d\omega}{dt}$ , выражение для работы деформирования имеет вид:

$$A = \int_0^{\omega} \frac{1}{\rho} (1 - \theta)\sigma_0(\omega)d\omega. \quad (16)$$

Учитывая далее, что  $\rho = \rho(1 - \theta)$ , а плотность твердой фазы в процессе неизменна, находим:

$$A = \frac{1}{\rho_0} \int_0^{\omega} \sigma_0(\omega)d\omega. \quad (17)$$

Таким образом, при деформировании пористых тел энергия этого процесса является функцией накопленной деформации твердой фазы.

В отличие от силовых характеристик процесса осадки энергоемкость является монотонной функцией жесткости схемы деформирования. При этом, чем больше жесткость схемы деформирования, тем меньше необходимая энергия уплотнения материала до заданной пористости. На рис. 4 показаны зависимости накопленной деформации твердой фазы и давления в зависимости от пористости, определенные по формулам (11) и (12). Как видно, с ростом плотности накопленная деформация твердой фазы, давление, определенное теоретически и экспериментально, уменьшается.

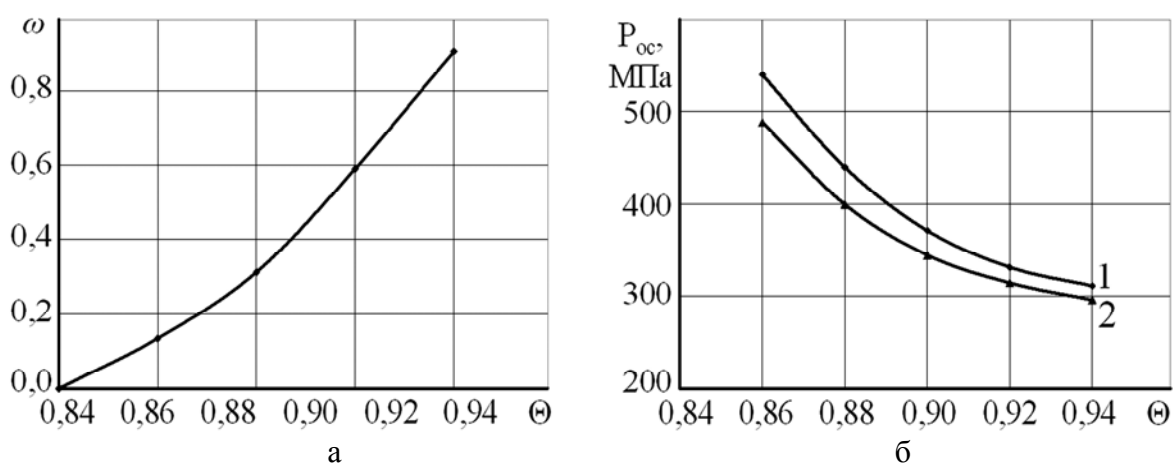


Рис. 4. Зависимость средней величины накопленной деформации твердой фазы (а) и давления (б) от относительной плотности:

1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

На рис. 5 показана зависимость работы деформирования от накопленной деформации твердой фазы.

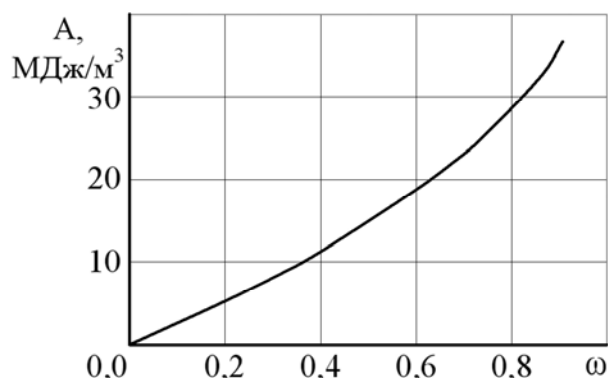


Рис. 5. Зависимость работы деформирования от накопленной деформации твердой фазы

По мере увеличения накопленной деформации твердой фазы возрастает работа деформирования.

### ВЫВОДЫ

В результате теоретических исследований получены распределения напряжений, деформаций и плотности в процессе осадки порошковых пористых заготовок в закрытой матрице пуансоном, заходящим в полость матрицы. Показано, что деформирование идет в два этапа: уплотнение и открытая осадка, доуплотнение и заполнение полости матрицы, что отражается на зависимостях напряжений, деформаций и плотности от времени нагружения. Установлены зависимости силовых и энергетических параметров процесса от плотности порошковой заготовки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мажарова Г. Е. *Производство изделий из порошков цветных металлов* / Г. Е. Мажарова, Г. А. Баглюк, А. В. Довыденкова. – К. : Техніка, 1989. – 120 с.
2. Рябичева Л. А. *Технология изготовления порошковых деталей методами пластического деформирования* / Л. А. Рябичева, А. Т. Цыркин. – Луганск : изд-во ВНУ им. В. Даля, 2011. – 180 с.
3. Рябичева Л. А. *Новые порошковые материалы: структура и свойства* / Л. А. Рябичева // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Луганськ : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. – С. 3–12.
4. Цыркин А. Т. *Малогабаритная установка для получения синтез газа* / А. Т. Цыркин, Ю. Н. Никитин, Н. В. Белошицкий [и др.] // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні* : зб. наук. пр. В 2-х ч. Ч. 2. – Луганськ : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2004. – С. 115–123.
5. *Феноменологические теории прессования порошков* / Штерн М. Б., Сердюк Г. Г., Максименко Л. А. и др. – Киев : Наук. думка, 1982. – 140 с.
6. Охрименко Я. М. *Технология кузнечно-штамповочного производства* / Я. М. Охрименко. – М. : Машиностроение, 1976. – 560 с.

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

Усатюк Д. А. – канд. техн. наук, доц. ВНУ им. В. Даля;

Рябовол Т. А. – аспирант ВНУ им. В. Даля.

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

E-mail: ryabic@gmail.com; usatyuk1@rambler.ru; material@snu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 14.02.2012 г.