

УДК 621.762 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.11

А.О. Михайлов<sup>1</sup>, О.В. Михайлов<sup>2</sup>, М.Б. Штерн<sup>2</sup>Национальный институт пищевых технологий<sup>1</sup>,Институт проблем материаловедения НАН Украины<sup>2</sup>**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК**

*Методом компьютерного моделирования исследован процесс обратного выдавливания спеченных порошковых заготовок. Рассмотрено влияние наличия несовершенных контактов между частицами порошка. Установлено, что на начальном этапе происходит осадка и уплотнение заготовки, а затем начинает преобладать процесс выдавливания. Распределения величин остаточной пористости и накопленной пластической деформации материала по объему изделия неравномерны. Непосредственно под деформирующим пуансоном находится зона затрудненной деформации. Минимальные плотность и накопленная деформация соответствуют области у свободной от нагрузки поверхности. Наличие несовершенных контактов приводит к появлению зон разуплотнения порошкового материала и уменьшению величины накопленной пластической деформации в этих зонах.*

*Ключевые слова:* обратное выдавливание, порошковая заготовка, пористость, несовершенные контакты

А.О. Михайлов, О.В. Михайлов, М.Б. Штерн

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗВОРОТНЬОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК**

*Методом комп'ютерного моделювання досліджено процес зворотнього видавлювання спечених порошкових заготовок. Розглянуто вплив наявності недосконалих контактів між частинками порошку. Встановлено, що на початковому етапі відбувається осад та ущільнення заготовки, а потім починає переважати процес видавлювання. Розподіли величин залишкової пористості та накопленої пластичної деформації матеріалу за об'ємом виробу нерівномірні. Безпосередньо під деформуючим пуансоном знаходиться зона затрудненої деформації. Мінімальні щільність і накопичена деформація відповідають області у вільній від навантаження поверхні. Наявність недосконалих контактів призводить до появи зон розущільнення порошкового матеріалу та зменшення величини накопленої пластичної деформації в цих зонах.*

*Ключові слова:* зворотнє видавлювання, порошкова заготовка, пористість, недосконалі контакти

А.О. Mikhailov, O.V. Mikhailov, M.B. Shtern

**MODELING THE PROCESS OF BACK EXTRUSION OF POROUS BLANKS**

*The process of back extrusion of sintered powder blanks was studied by computer simulation method. The influence of the presence of imperfect contacts between powder particles is considered. At the initial stage, the blank is sedimented and compacted, and then the extrusion process begins to prevail. The distribution of residual porosity and accumulated plastic deformation of the material throughout the part volume is uneven. The zone of difficult deformation is located directly under the deforming punch. The minimum density and accumulated deformation correspond to the field of the surface free of load. The presence of imperfect contacts leads to the appearance of zones of softening of the powder material and a decrease in the amount of accumulated plastic deformation in these zones.*

*Keywords:* back extrusion, powder blank, porosity, imperfect contacts

**Постановка проблеми.** Методи обработки давлением спеченных порошковых заготовок эффективно применяются при получении машиностроительных изделий различного назначения [1-3]. Среди этих деталей можно выделить большую группу, отличительной особенностью которой является наличие внутренней полости. Распространенным методом получения таких изделий является метод обратного выдавливания.

Порошковые материалы характеризуются наличием пористости и возможностью изменять свой объем при пластическом деформировании. В связи с этим течение пористого материала имеет ряд особенностей по сравнению с течением компактного материала.

Порошковые заготовки могут содержать различные дефекты, в частности - несовершенные контакты между частицами порошка. Материал самих частиц может быть как более, так и менее пластичным.

Установление закономерностей течения порошкового материала при обратном выдавливании и учет влияния на этот процесс различных материальных характеристик изделия представляют собой актуальную задачу.

**Анализ последних исследований и публикаций.** На настоящий момент процесс обратного выдавливания спеченных порошковых заготовок исследован достаточно полно [3]. Основное внимание уделяется распределению остаточной пористости и анализу напряженно - деформированного состояния получаемых изделий. В то же время, влияние наличия дефектов и материальных характеристик при выдавливании полых порошковых деталей практически не изучены.

**Цель работы** - исследовать методом компьютерного моделирования закономерности течения спеченного порошкового материала при получении изделий методом обратного выдавливания, установить влияние наличия в пористой заготовке несовершенных контактов.

Схема обратного выдавливания приведена на рис.1. Порошковая заготовка 3 помещается на выталкиватель 2 и деформируется под воздействием движущегося с постоянной скоростью пуансона 1. Боковая поверхность заготовки ограничена неподвижной матрицей 4.

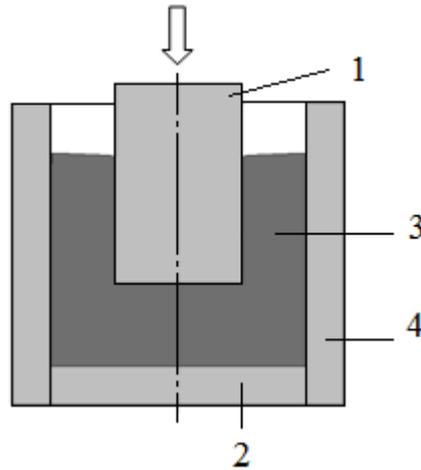


Рис. 1. Схема обратного выдавливания: 1 - пуансон; 2 - выталкиватель; 3 - порошковая заготовка; 4 - матрица

Размеры заготовки были: диаметр - 20 мм, высота - 20 мм. Диаметр пуансона равнялся 10 мм. Величину начальной пористости принимали равной 0.15. Считали, что в начальный момент пористость распределена по объему равномерно. Материал пористой заготовки - алюминиевый сплав. Коэффициент трения между порошковым материалом и инструментом принимали равным 0.10.

Деформируемое тело рассматривали как сплошную, непрерывную среду. Моделирование течения этой среды под воздействием внешней нагрузки проведено на основе соотношений теории пластичности пористого тела [4] и метода конечных элементов [5].

Согласно [4] уравнение поверхности нагружения пористого тела в  $P - \tau$  плоскости имеет вид:

$$F = \frac{(p - p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} - \tau_s^2 = 0, \quad (1)$$

где  $p_0$  - значение шаровой компоненты напряженного состояния, при которой объем не изменяется. Размер полуоси эллипсоидального контура принимается зависящим от  $P$  :

$$\begin{cases} \psi = \psi_1 & \text{при } p \leq p_0 \\ \psi = \psi_2 & \text{при } p \geq p_0 \end{cases} \quad (2)$$

Величины материальных функций  $\varphi$ ,  $\psi$  и  $p_0$  определяются по формулами (3) – (6) :

$$\varphi = \frac{1}{(1+m)^2} \cdot (1-\theta)^3 \cdot (1-|2 \cdot a - 1|)^2 \quad (3)$$

$$\psi_1 = \frac{8}{3} \cdot \frac{(1-\theta)^4}{\theta} \cdot \frac{(1-a)^2}{(1+m)^2} \quad (4)$$

$$\psi_2 = \frac{8}{3} \cdot \frac{(1-\theta)^4}{\theta} \cdot \frac{a^2}{(1+m)^2} \quad (5)$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \tau_s \cdot \frac{(1-\theta)^2}{\sqrt{\theta}} \cdot \left( \frac{1-m-2 \cdot a}{1+m} \right), \quad (6)$$

где, наряду с пористостью  $\theta$  и приведенным напряжением течения твердой фазы  $\tau_s$ , входят два параметра  $a$  и  $m$ , изменяющиеся в диапазонах  $0 \leq a \leq 1$ ,  $0 \leq m \leq 1$ . Эти параметры характеризуют разнсопротивляемость порошковых заготовок и пористых полуфабрикатов при растяжении и сжатии, а также возможность объемных изменений в отсутствии гидростатической компоненты тензора напряжений. Если  $m = 0$ , пределы текучести рассматриваемых материалов при всестороннем растяжении и сжатии равны между собой по абсолютной величине. Физическая природа данного параметра может быть связана с качеством контактов порошковых и пористых материалов. Если же  $a = 0.5$ , то, как следует из закона пластического течения, ассоциированного с поверхностью нагружения (1), скорость объемной деформации, определяемая формулой  $e = \lambda \frac{\partial F}{\partial p}$ , обращается в нуль при  $p = 0$ . Во всех остальных случаях данное условие не

выполняется, что является одним из проявлений дилатансии [6 – 8]. Физическая сущность параметра  $a$ , который характеризует внутреннюю симметрию поверхности нагружения, по – видимому, больше связана с элементами Кулонового трения, присущего слабозвязанным материалам в условиях преобладания сдвиговых деформаций [7]. При  $m = 0$  и  $a = 0.5$  условие пластичности (1) переходит в условия пластичности, описанные в [4,6 – 11].

При моделировании рассматривали три варианта сочетаний материальных параметров:  $a=0.5$ ,  $m=0.0$  (рис.2,а, контур поверхности нагружения симметричен, несовершенные контакты отсутствуют);  $a=0.5$ ,  $m=0.5$  (рис.2,б, порошковое тело имеет несовершенные контакты) и  $a=0.55$ ,  $m=0.5$  (рис.2,в, имеются несовершенные контакты и контур нагружения несимметричен).

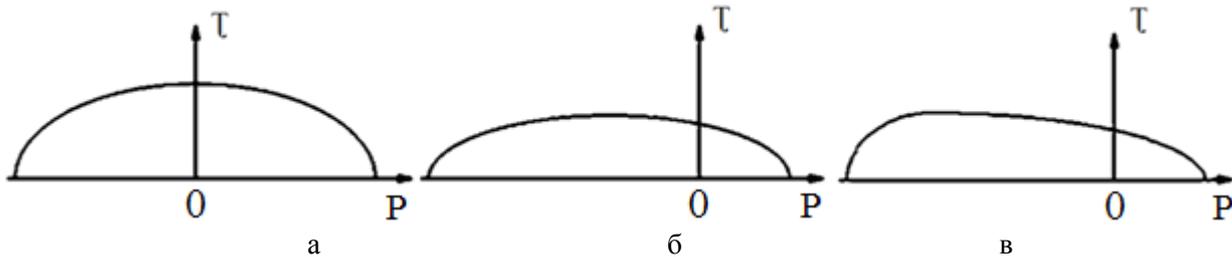


Рис. 2. Контур поверхности нагружения при различных значениях материальных параметров: а -  $a=0.5$ ,  $m=0.0$ ; б -  $a=0.5$ ,  $m=0.5$ ; в -  $a=0.55$ ,  $m=0.5$

**Результаты моделирования.** Компьютерное моделирование показало, что на начальном этапе процесса выдавливания происходит осадка и уплотнение порошковой заготовки, а затем начинает преобладать процесс вытекания материала в зазор между пуансоном и матрицей.

На рис.3 и рис.4 приведены соответственно результаты по распределению остаточной пористости и величины накопленной пластической деформации на последовательных этапах обратного выдавливания для случая, когда несовершенные контакты отсутствуют (рис.2,а).

Максимальное уплотнение материала происходит в области торца пуансона у его наружной поверхности. Непосредственно под пуансоном находится зона затрудненной деформации. По мере протекания процесса очаг деформации смещается в направлении дна заготовки.

Распределение остаточной пористости в полученном изделии неравномерно. Максимальное уплотнение материала произошло в областях дна и нижней внутренней поверхности стенки полученной детали. Минимальная плотность соответствуют верхней части стенки детали в области контакта с матрицей. В области затрудненной деформации под пуансоном также наблюдается уменьшение относительной плотности.

Изменение распределения накопленной пластической деформации происходит аналогично изменению относительной плотности.

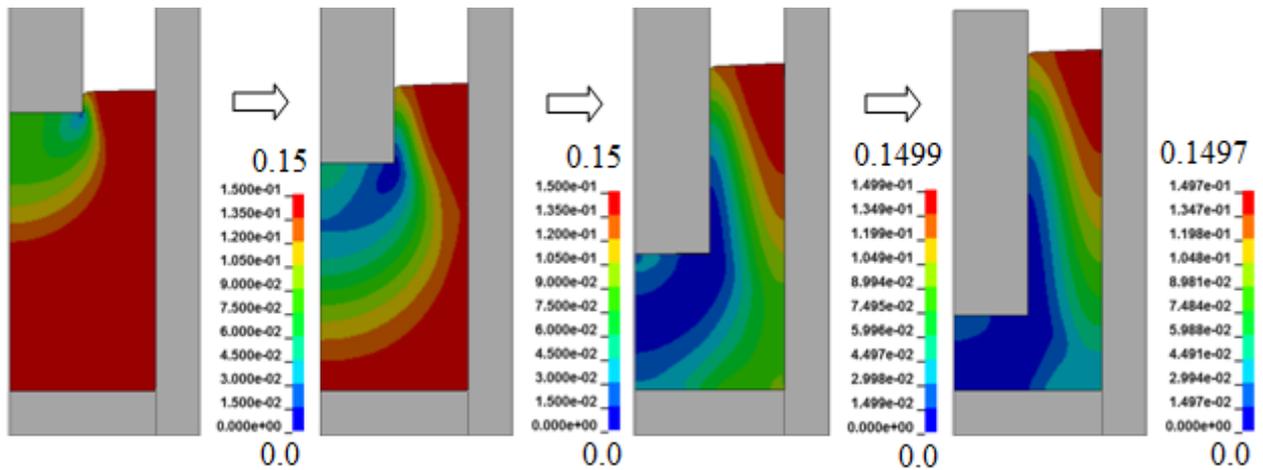


Рис. 3. Изменение распределения пористости в процессе обратного выдавливания ( $a=0.5, m=0.0$ )

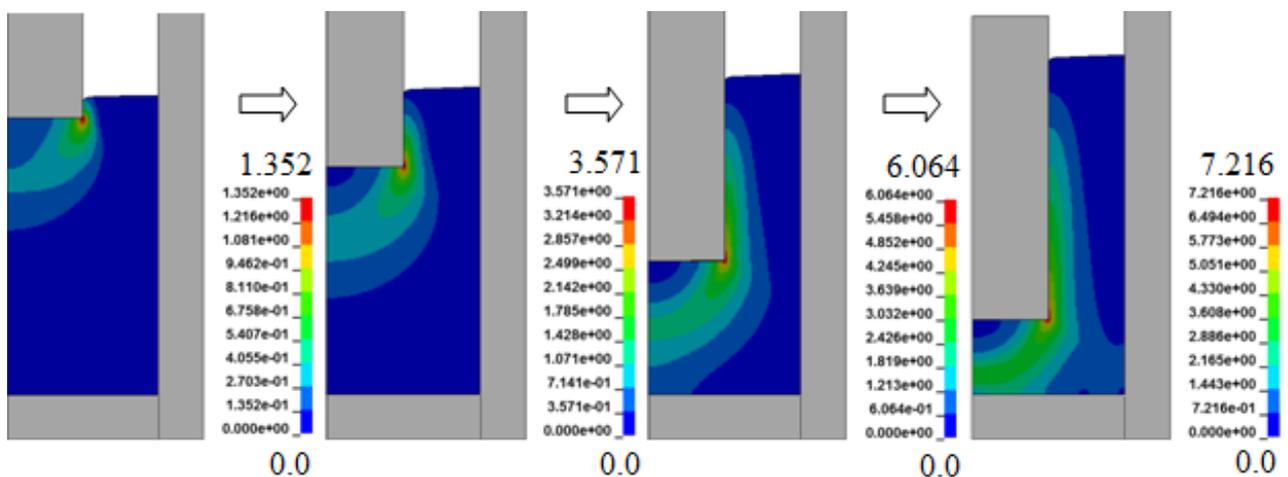


Рис. 4. Изменение распределения накопленной деформации твердой фазы в процессе обратного выдавливания ( $a=0.5, m=0$ )

На рис.5 и рис.6 представлены результаты по распределению остаточной пористости и величины накопленной пластической деформации при различных значениях материальных параметров порошкового тела. Величина перемещения пуансона была одинаковой и равнялась 5.09 мм.

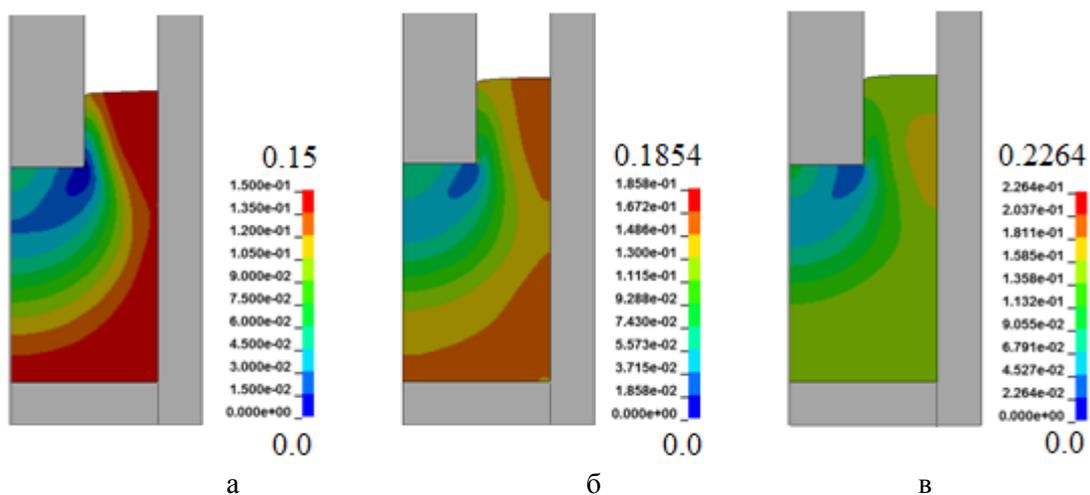


Рис. 5. Распределение пористости при различных значениях материальных параметров: а -  $a=0.5, m=0.0$ ; б -  $a=0.5, m=0.5$ ; в -  $a=0.55, m=0.5$

Как видно из рис.5, характер распределения пористости для всех рассматриваемых значений материальных параметров аналогичен. В то же время наличие несовершенных контактов между

частинами (рис.5,б) приводит к появлению зон, в которых величина пористости увеличивается. При этом происходит увеличение высоты выдавленной стенки изделия. В случае несимметричности контура нагружения (рис.5,в) при  $a > 0.5$  процесс разуплотнения материала заготовки может усиливаться.

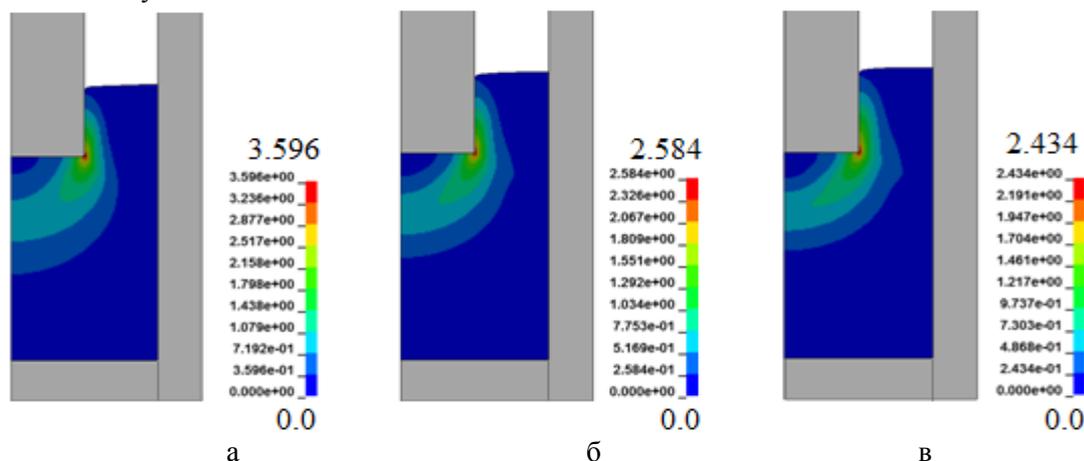


Рис. 6. Распределение накопленной деформации твердой фазы при различных значениях материальных параметров: а -  $a=0.5, m=0.0$ ; б -  $a=0.5, m=0.5$ ; в -  $a=0.55, m=0.5$

Наличие несовершенных контактов влияет на величину накопленной пластической деформации материала пористого тела - она становится меньше (рис.6,б). Несимметричность контура нагружения обуславливает еще большее ее уменьшение.

**Выводы.** Процесс обратного выдавливания спеченных порошковых заготовок происходит в несколько этапов. На начальном этапе происходит осадка и уплотнение пористой заготовки, а затем начинает преобладать процесс выдавливания.

Распределения величин остаточной пористости и накопленной пластической деформации материала по объему изделия неравномерны. Минимальные относительная плотность и накопленная деформация соответствуют области у свободной от нагрузки поверхности. В области затрудненной деформации под пуансоном также наблюдается уменьшение относительной плотности и накопленной деформации.

Наличие несовершенных контактов приводит к появлению зон разуплотнения порошкового материала и уменьшению величины накопленной пластической деформации. Несимметричность контура нагружения порошкового материала также оказывает влияние на распределение этих параметров.

#### Список использованной литературы.

1. Петросян Г. Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. - М.: Металлургия, 1988. – 152 с.
2. Рябичева Л. А. Анализ напряженно-деформированного состояния при радиально - прямом выдавливании порошковых заготовок / Л. А. Рябичева, К. В. Любич // Сб. науч. тр. "Вестник НТУ "ХПИ": Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. – № 43. – С. 56-63
3. Горохов В. М. Объемная штамповка порошковых материалов / В. М. Горохов, Е. А. Дорошкевич, А. М. Ефимов, Е. В. Звонарев // Минск: «Навука і техника», 1993. – 272 с.
4. Штерн М. Б. Модифицированные модели деформирования порошковых материалов на основе пластичных и труднодеформируемых порошков / М. Б. Штерн, О. В. Михайлов // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія Машинобудування. – № 62. – 2011. - С. 13-19
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
6. Штерн М. Б. Развитие теории прессования порошков и теории пластичности пористых тел // Порошковая металлургия, 1992. – № 9. - С.12 - 25
7. Рудь В. Д. Експериментальна механіка структурно - неоднорідних матеріалів: Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2010. – 272 с.
8. Штерн М. Б., Рудь В. Д. Механічні та комп'ютерні моделі консолідації гранульованих середовищ, Київ – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2010. – 232 с.
9. S. Shima and M. Oyane: "Plasticity Theory for Porous Materials", *Int. J. Mech. Sci.*, 1976, vol. 18, pp. 285–291
10. R. J. Green, "A Plasticity Theory for Porous Materials", *Int. J. Mech. Sci.*, 1972, vol. 14, pp. 215–224
11. I. F. Martynova and M. B. Shtern "Plasticity Equation for Plasticity of Porous Bodies", *Poroshkovaya Metallurgiya*, 1978, No. 1 (181), pp. 23–29

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019