

PACS: 81.40.Vw

О.В. Михайлов¹, Я.Е. Бейгельзимер², М.Б. Штерн¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК

¹Институт проблем материаловедения НАН Украины

²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины

Статья поступила в редакцию 26 октября 2015 года

Исследован процесс винтовой экструзии (ВЭ) порошковых заготовок. Рассмотрено влияние параметров процесса (противодавление, наличие оболочки из компактного металла, количество проходов) на распределение пористости и накопленной деформации материала твердой фазы. Установлено, что наличие противодавления позволяет предотвратить рост пористости и повысить равномерность ее распределения. С увеличением количества проходов происходит рост плотности и величины накопленной деформации. Одновременно с этим происходит выравнивание распределения свойств по объему изделия. Оболочка создает дополнительное гидростатическое давление. В то же время наличие оболочки не изменяет качественный вид распределения пористости по объему заготовки.

Ключевые слова: винтовая экструзия, интенсивная пластическая деформация, порошковый материал, плотность, математическое моделирование

Досліджено процес гвинтової екструзії (ГЕ) порошкових заготовок. Розглянуто вплив параметрів процесу (протитиск, наявність оболонки з компактного металу, кількість проходів) на розподіл пористості та накопленої деформації матеріалу твердої фази. Встановлено, що наявність протитиску дозволяє запобігти зростанню пористості та підвищити рівномірність її розподілу. Зі збільшенням кількості проходів відбувається зростання щільності й величини накопленої деформації. Одночасно з цим відбувається вирівнювання розподілу властивостей по об'єму виробу. Оболонка створює додатковий гідростатичний тиск. У той же час наявність оболонки не змінює якісний вид розподілу пористості по об'єму заготовки.

Ключові слова: гвинтова екструзія, інтенсивна пластична деформація, порошkový матеріал, щільність, математичне моделювання

Введение

В настоящее время актуальной задачей современного материаловедения является получение так называемых объемных ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов. Свойства последних и их поведение обычно значительно

отличаются от свойств материалов, подвергнутых обычной деформационной обработке [1].

Ультрамелкозернистую структуру материала можно получить, в частности, путем интенсивных пластических деформаций металлических заготовок методом ВЭ. При этом в результате больших пластических деформаций размеры кристаллитов уменьшаются и достигают субмикроструктурных значений [2].

Сильнодеформированные металлы приобретают качественно новые свойства, многие из которых представляют практический интерес. В частности, они обладают аномально-высокой пластичностью в сочетании с большой прочностью, значительной усталостью и вязкостью, повышенными диффузионными свойствами и способностью к формообразованию, а также улучшенными магнитными свойствами и рядом других характеристик [1].

При использовании ВЭ наблюдается различие структуры материала в разных частях изделий. Повышение равномерности свойств достигается за счет многократной обработки [2].

Дополнительные и очень широкие возможности открывает обработка порошковых заготовок. Применение порошковой технологии позволяет снизить энергосиловые параметры процесса получения субмикроструктурного материала, повысить стойкость деформирующего инструмента, значительно расширить спектр материалов и структур [2,3].

Реализация процессов интенсивных пластических деформаций связана с риском повышения темпа накопления повреждений и роста пористости [4]. В связи с этим исследование закономерностей поведения порошковых заготовок при ВЭ представляет безусловный интерес. Решение поставленной задачи выполнено методом компьютерного моделирования.

Схема деформирования

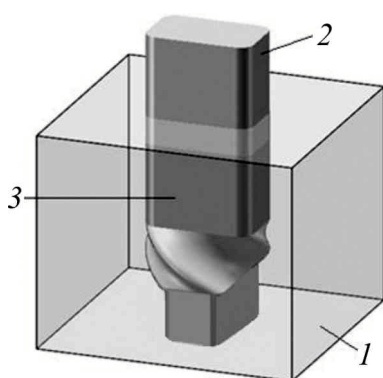


Рис. 1. Схема винтовой экструзии: 1 – матрица, 2 – пуансон, 3 – порошковая заготовка

Схема ВЭ порошковой пористой заготовки приведена на рис. 1. Форма заготовки призматическая. Канал винтовой матрицы состоит из трех участков: заходного, винтового и калибрующего. Поперечные сечения всех участков одинаковы. Указанные особенности геометрии канала приводят к тому, что при выдавливании через него форма заготовки не изменяется. Это позволяет осуществлять многократную экструзию с целью накопления деформаций. В результате такой деформационной обработки происходит изменение структуры и свойств заготовки при сохранении идентичности начальной и конечной ее формы.

Методика моделирования

Моделирование выполнено методом конечных элементов. Для описания поведения порошкового материала использовали соотношения теории пластичности пористого тела [4–7].

Уравнение поверхности нагружения имеет вид

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

где p_0 – значение гидростатического давления, при котором не происходит изменение объема.

Величина p -полуоси эллипсоидального контура зависит 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 φ , ψ и p_0 определяются по следующим формулам:

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

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

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

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

Параметрами модели являются: пористость θ , приведенное напряжение течения твердой фазы τ_s , а также a и m , которые изменяются в диапазонах $0 \leq a \leq 1$, $0 \leq m \leq 1$. Параметр a характеризует несимметричность формы контура нагружения, а параметр m – величину смещения этого контура относительно гидростатической оси.

Результаты моделирования

Целью моделирования являлось исследование особенностей пластического течения пористой заготовки в процессе ее продавливания через винтовую матрицу. Изучали распределение остаточной пористости и накопленной деформации в материале твердой фазы. Указанные факторы исследовали в зависимости от отсутствия или наличия противодействия. Учитывали влияние внешнего трения заготовки о матрицу. Анализ носил сравнительный характер и был направлен главным образом на оценку роли противодействия в процессе ВЭ. Кроме того, расчеты проводили для различных моментов де-

формирования, что давало возможность отследить некоторые закономерности формирования искомым полем при наличии или отсутствии противодействия.

Считали, что исходная пористость заготовки равна 0.3, а ее неоднородным распределением в начале ВЭ можно пренебречь. При проведении расчетов полагали, что на границе заготовка–матрица справедлив закон трения Кулона. Коэффициент трения предполагался равным 0.15, что соответствует применению смазки.

Рассматривали два варианта приложения противодействия. В первом случае учет противодействия проводили в предположении, что все точки подпятника (нижняя поверхность заготовки) подвержены действию равномерно приложенного нормального к его поверхности напряжения. Во втором случае противодействие осуществляли за счет применения дополнительной заготовки из компактного металла («фальш-заготовка»), которую помещали в матрицу перед порошковой заготовкой (рис. 2).

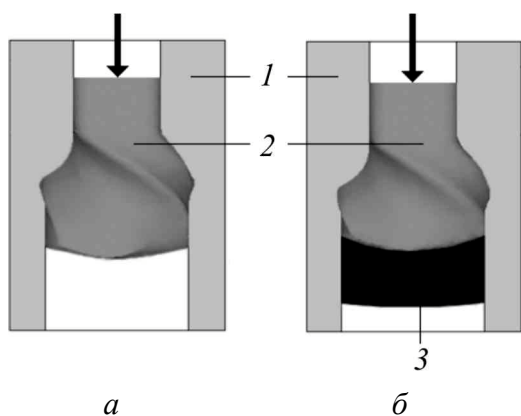


Рис. 2. Винтовая экструзия в отсутствии (а) и при наличии (б) противодействия: 1 – матрица, 2 – порошковая заготовка, 3 – «фальш-заготовка»

Наличие противодействия приводит к уменьшению пористости (увеличению относительной плотности) получаемых изделий. Наименее плотным участком является область, примыкающая к подпятнику. В отсутствии противодействия относительная пористость в ней составляет 0.309. Наличие противодействия препятствует процессу разрыхления и снижает относительную пористость в данной области до величины 0.136 (рис. 3).

Величины пористости у оси порошковой заготовки и около ее боковых поверхностей отличаются. Области, расположенные у оси заготовки, уплотняются менее интенсивно.

Рассмотрим распределение накопленной деформации твердой фазы (рис. 4). Наличие противодействия при ВЭ является фактором, связывающим течение пористого материала, поскольку налагает на поле скоростей кинематическое

При совместной ВЭ вначале деформируется заготовка из компактного металла, что приводит к возникновению противодействия, действующего на пористую заготовку. Происходит уплотнение пористой заготовки. После выхода «фальш-заготовки» из винтового участка канала матрицы начинается процесс экструзии уплотненной порошковой заготовки.

Как показали результаты моделирования, в обоих случаях влияние противодействия на процесс деформирования пористой порошковой заготовки было аналогичным.

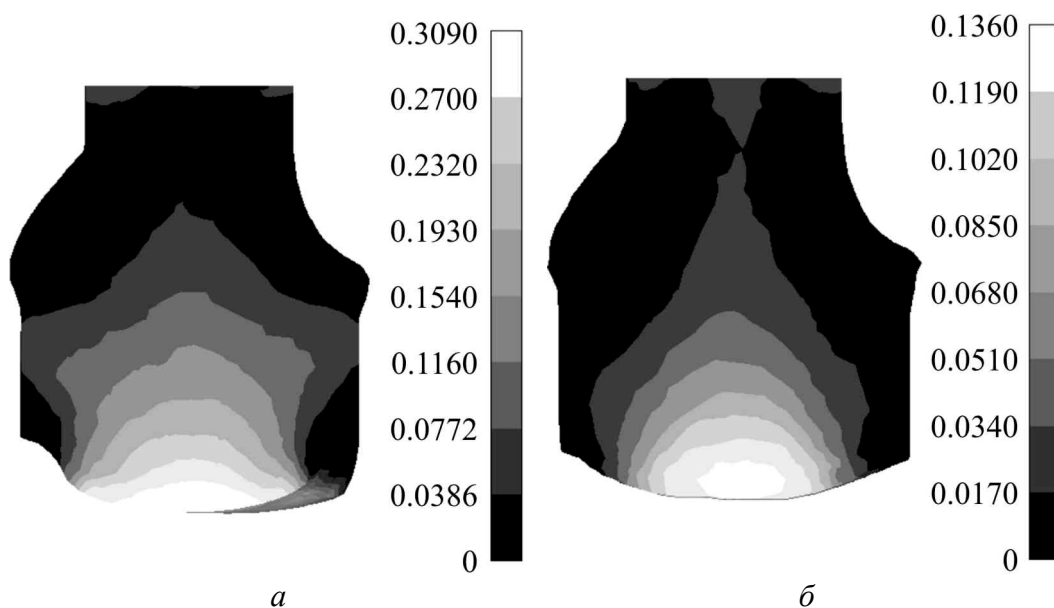


Рис. 3. Распределение пористости по сечению заготовки в отсутствии (*а*) и при наличии (*б*) противодействия

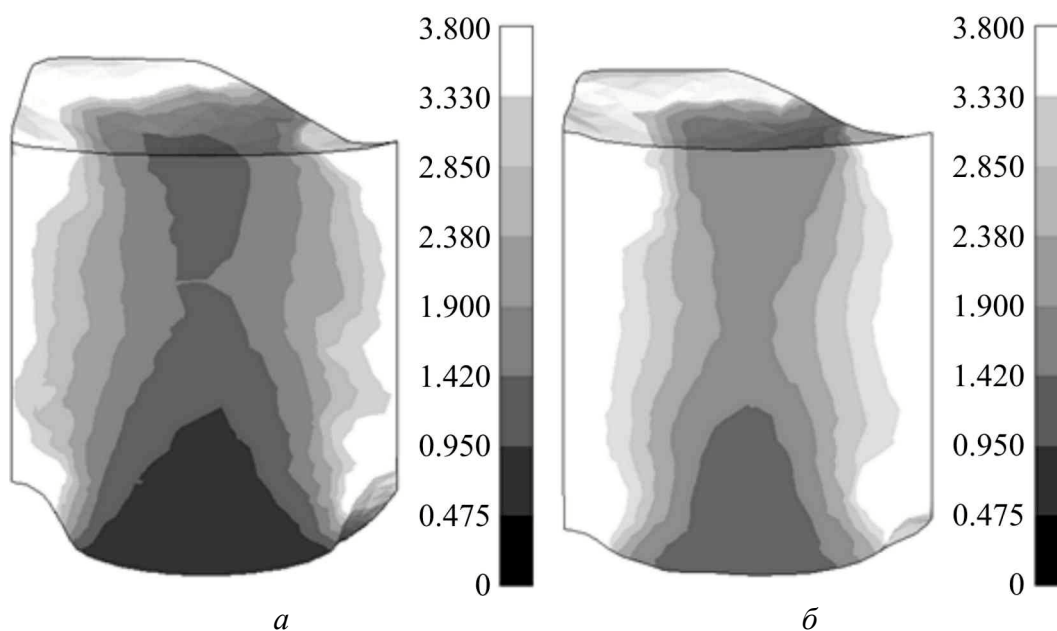


Рис. 4. Распределение накопленной деформации твердой фазы по сечению заготовки в отсутствии (*а*) и при наличии (*б*) противодействия

ограничение: выдавливание материала происходит с меньшей скоростью, чем это имеет место в отсутствие противодействия. С другой стороны, приложенное противодействие приводит к росту накопленной деформации твердой фазы, обусловленному процессом изменения объема.

Наиболее интенсивно деформируются области, прилегающие к поверхностям трения, расположенным около боковой поверхности заготовки. Ближе к оси заготовки наблюдаются резкое снижение темпа накопления деформации.



Рис. 5. Контейнер для винтовой экструзии порошковых заготовок

ции и фактическая ее локализация в указанных периферийных областях. Наличие противодействия повышает общий уровень накопленной деформации твердой фазы пористого тела и приводит к более равномерному ее распределению по объему изделия. При этом повышается уровень накопленной деформации в областях, расположенных у оси заготовки.

При ВЭ используют два вида порошковых заготовок: с оболочкой из компактного металла и без оболочки. Оболочка-контейнер (рис. 5) применяется также при ВЭ неспеченного порошка.

На рис. 6 приведено распределение пористости для двух заготовок характерных сечений (горизонтального и вертикального), одна из которых была без оболочки, а вторая находилась в оболочке из компактного металла. Противодействие отсутствовало.

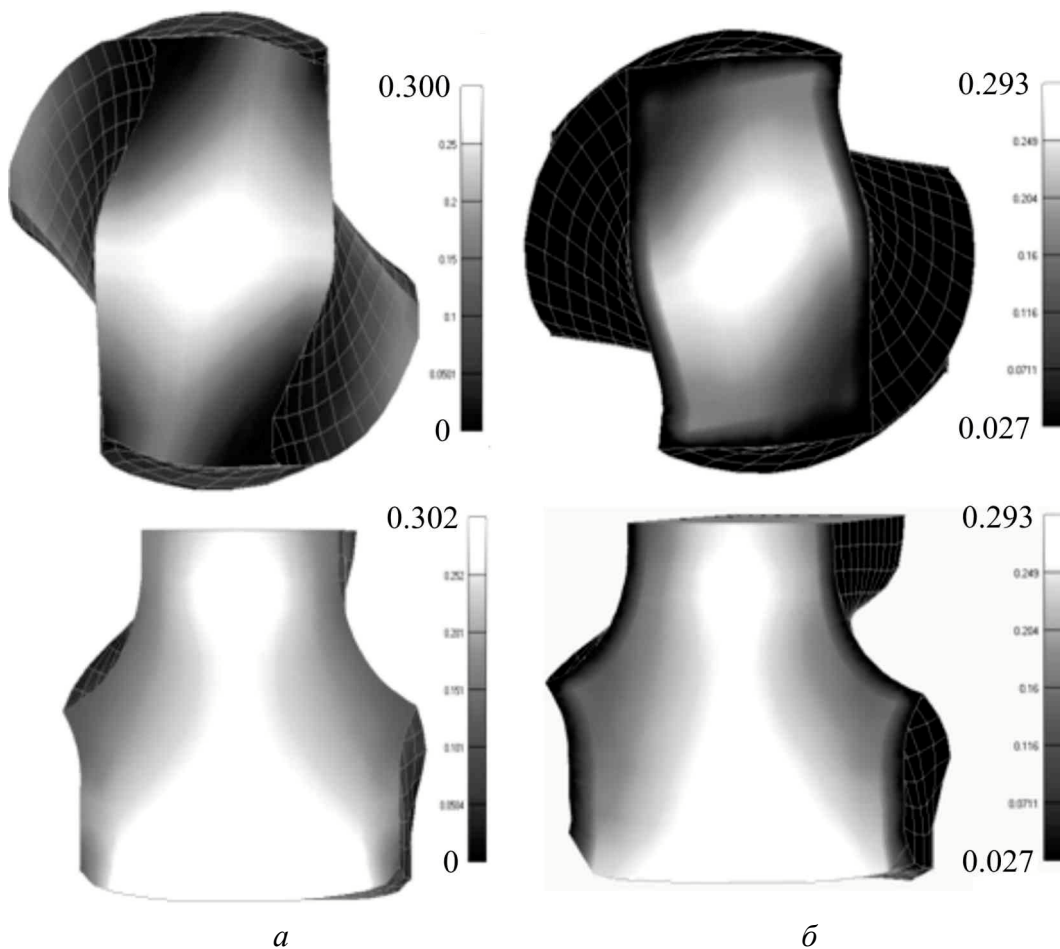


Рис. 6. Распределение пористости при винтовой экструзии без оболочки (а) и с оболочкой (б) из компактного металла

Оболочка создает дополнительное гидростатическое давление и тем самым препятствует разуплотнению и последующему разрушению изделий. В то же время, как показали результаты моделирования, характер распределения величины пористости по объему заготовки остается качественно одинаковым.

Количество проходов ВЭ оказывает влияние на свойства получаемых изделий. На рис. 7 приведены данные по распределению величины накопленной деформации твердой фазы пористого тела после первого и второго проходов ВЭ. Можно отметить, что с увеличением количества проходов общий уровень накопленной деформации повышается. Кроме того, возрастает величина деформации внутренней части заготовки. Одновременно происходит выравнивание распределения относительной плотности по объему изделия.

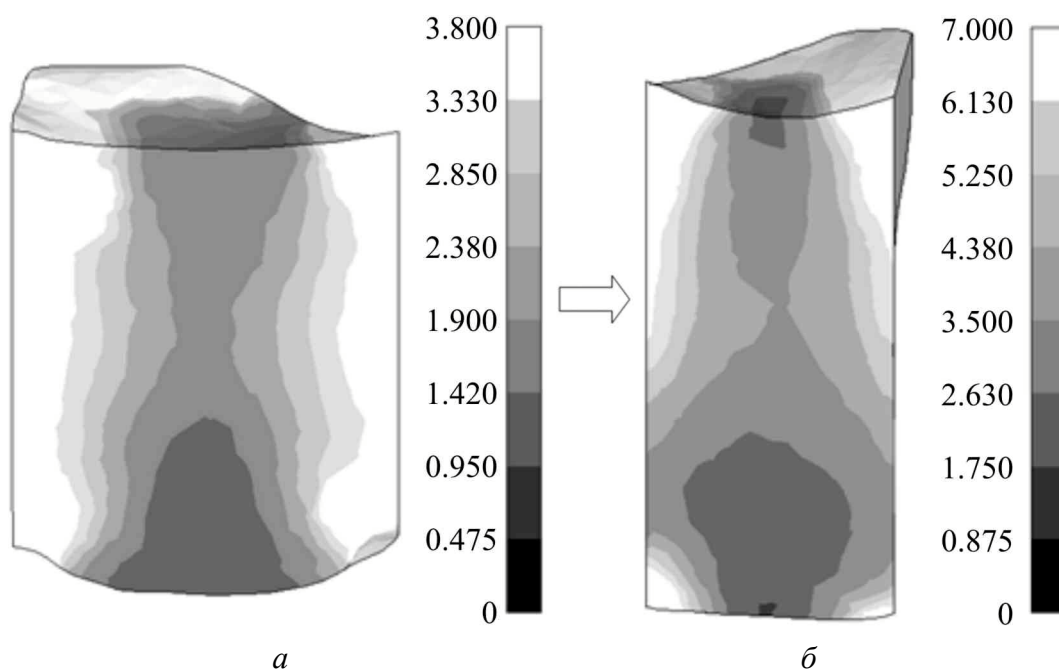


Рис. 7. Распределение величины накопленной пластической деформации по сечению заготовки (расчет): *а* – первый проход, *б* – второй проход

Результаты моделирования подтверждают данные экспериментов, проведенных в ДонФТИ НАН Украины¹. Было установлено, что при ВЭ при температуре 200°C порошковой меди марки ПМ0Б уже после первого прохода можно получить образцы, обладающие почти максимальной плотностью (таблица). Однако данные по электропроводности и фотографии структуры (рис. 8) свидетельствуют об отсутствии связей между частицами порошка.

¹ Эксперимент выполнен к.т.н. А.С. Сынковым

Результаты измерения плотности и электропроводности
порошковых заготовок после ВЭ

Деформация	Относительная электропроводность	Относительная плотность
	%	
Подпрессовка	–	69
1 проход ВЭ	82	99.2
2 прохода ВЭ	99.6	99.6

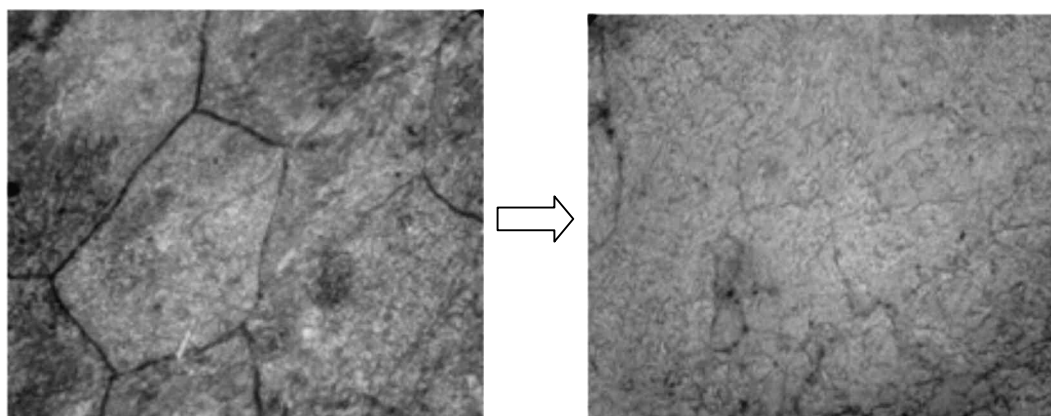


Рис. 8. Структура поперечного сечения образца (эксперимент): *a* – после первого прохода, *б* – после второго прохода

После второго прохода ВЭ электропроводность возрастает до значений монолитного материала. Фотографии структуры показывают отсутствие границ раздела между частицами.

Выводы

При ВЭ порошковых заготовок возможен рост пористости в области, расположенной у свободной от нагрузок поверхности. Наличие противодавления позволяет предотвратить этот рост и повысить равномерность распределения конечной плотности по объему изделий. Приложение противодавления повышает общий уровень накопленной деформации твердой фазы пористого тела и приводит к более равномерному ее распределению.

Оболочка из компактного металла создает дополнительное гидростатическое давление. В то же время наличие оболочки не изменяет качественный вид распределения пористости по объему заготовки.

С увеличением количества проходов общий уровень накопленной деформации повышается. Кроме того, возрастает величина деформации внутренней части заготовки. Одновременно с этим происходит выравнивание распределения относительной плотности по объему изделия.

1. *Р.З. Валиев, И.В. Александров*, Объемные наноструктурные металлические материалы. Получение, структура и свойства, Академкнига, Москва (2007).
2. *Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov*, Mater. Sci. Eng. **A503**, 14 (2009).
3. *Я.Е. Бейгельзимер, М.Б. Штерн, Т.А. Епифанцева, А.С. Сынков*, ФТВД **19**, № 3, 120 (2009).
4. *Y. Beygelzimer*, Mechanics of Materials **37**, 753 (2005).
5. *М.Б. Штерн, О.В. Михайлов*, Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія Машинобудування № 62, 13 (2011).
6. *О.В. Михайлов*, Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, ІПМ НАН України, Київ (2011).
7. *О.А. Розенберг, О.В. Михайлов, М.Б. Штерн*, Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»), Луцьк (2011), вип. 31, с. 306–313.

O.V. Mikhailov, Ya.E. Beygelsimer, M.B. Shtern

MODELING OF TWIST EXTRUSION OF POWDER BILLETS

The twist extrusion (TE) of porous billets is studied. The effect of processing and geometrical parameters (counterpressure, container sizes, number of passes) on the porosity distribution and the accumulated strain in solid phase is considered. It is shown that counterpressure allows the prevention of swelling and provides the uniformity of density distribution. The decrease in the number of passes leads to the growth of the mean density and the accumulated matrix strain. The given process is accompanied by the smoothing of density distribution. The container stipulates additional hydrostatic pressure within the volume of porous billet. It, nevertheless, does not change qualitative character of density distribution.

Keywords: twist extrusion, severe plastic deformation, powder materials, density, mathematical simulation

Fig. 1. Twist extrusion scheme: 1 – matrix, 2 – plunger, 3 – powder billet

Fig. 2. Twist extrusion without (a) and with counterpressure (b): 1 – matrix, 2 – powder billet, 3 – «false billet»

Fig. 3. Porosity distribution over the cross-section of the billet without (a) and with counterpressure (b)

Fig. 4. Accumulated strain distribution in the solid phase over the cross-section of the billet without (a) and with counterpressure (b)

Fig. 5. Container for the twist extrusion of the powder billets

Fig. 6. Porosity distribution in the course of twist extrusion without a shell (a) and with a shell made of compact metal (b)

Fig. 7. Accumulated plastic strain distribution over the cross-section of the billet (calculation): a – the first pass, b – the second pass

Fig. 8. Structure of the cross-section of the sample (experiment): a – after the first pass, b – after the second pass