

УДК 621.762.4

*д.т.н. Рябичева Л. А.**(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, ryabic@gmail.com),**к.т.н. Коробко Т. Б.**(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, korobko.tamara@rambler.ru),**Бабич И. Н.**(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, nev123lg@gmail.com)*

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ РКУ-ПРЕССОВАНИИ

*Исследовано изменение гидростатического давления, плотности и микроструктуры порошковых пористых заготовок при РКУ-прессовании с различной скоростью деформации. Максимальную плотность порошковой заготовки пористостью 40 % можно получить только за четыре прохода, пористостью 10 % — за один проход. При этом при пористости заготовки 40 % сначала появляется очаг уплотнения, затем с ростом гидростатического давления он трансформируется в очаг деформации. При пористости заготовки 10 % величина гидростатического давления обеспечивает образование очага деформации высокой плотности. Увеличение скорости деформации приводит к увеличению гидростатического давления и достижению большей плотности за меньшее количество проходов.*

**Ключевые слова:** *равноканальное угловое прессование, сдвиговая деформация, плотность, микроструктура, величина зерна, скорость деформации.*

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Эффективными способами производства материалов с заданными свойствами являются различные методы интенсивной пластической деформации, к которым относится равноканальное угловое прессование (РКУП). РКУП позволяет получить высокоплотные порошковые материалы с ультрамелкодисперсной структурой, в результате чего качественно изменяются их свойства [1, 2]. В настоящее время эта проблема решается в рамках производства длинномерных заготовок [3, 4].

**Постановка задачи.** Известно, что с помощью РКУП пористых заготовок при наличии противодействия можно достичь максимальной плотности при большой величине начальной пористости образца. Очевидно, при больших скоростях деформирования можно получить высокую плотность пористых заготовок и ультрамелкодисперсную структуру. Увеличение числа проходов при РКУП обеспечивает измельчение микроструктуры исходного крупнокристалли-

ческого состояния. Первых четырёх проходов, как правило, достаточно для формирования ультрамелкодисперсной структуры. При дальнейшем увеличении числа проходов происходит совершенствование структуры границ зёрен, растёт доля высокоугловых границ за счёт малоугловых. При этом размер зёрен практически не изменяется. В известных работах исследуется изменение напряжённо-деформированного состояния и структуры при статических скоростях нагружения. В то же время динамическое деформационное поведение порошковых металлических материалов до настоящего времени исследовано в значительно меньшей степени.

В связи с этим **целью** данной работы является исследование влияния условий РКУП на изменение гидростатического давления и плотности порошковой заготовки при различных скоростях деформации.

**Объект исследования** — равноканальное угловое прессование порошковых материалов.

**Предмет исследования** — изменение гидростатического давления и плотности при РКУ-прессовании порошковых материалов.

**Задачи исследования:**

– оценка гидростатического давления по длине заготовки с различной начальной пористостью и различными скоростями деформации;

– оценка изменения плотности по длине заготовки с различной начальной пористостью и различными скоростями деформации;

– анализ микроструктуры порошкового материала после РКУ-прессования.

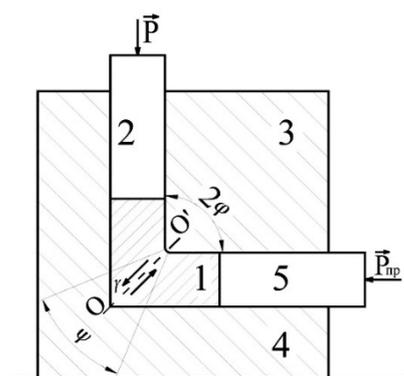
**Методика исследования.** Анализ РКУ-прессования медной порошковой заготовки призматической формы сечением  $15 \times 15$  мм, длиной 30 мм, начальной пористостью 40 % и 10 % выполнен методом конечных элементов. Прессование заготовки осуществляется за счёт перемещения пуансона. Для моделирования заготовки применяли упругопластическую модель материала. При моделировании использована модель трения по Кулону. Рассматривали изменение гидростатического давления при двух скоростях деформации  $10 \text{ с}^{-1}$  и  $0,1 \text{ с}^{-1}$  на установившейся стадии течения металла.

**Изложение материала и его результаты.** При РКУП образец с помощью пуансона проталкивается из рабочего канала пресс-формы в пересекающий его под заданным углом боковой канал такого же сечения. Схема действующих при этом напряжений показана на рисунке 1.

В момент пересечения плоскости соприкосновения входного вертикального и выходного горизонтального каналов  $OO'$  (рис. 1), наклон которой определяется углом  $\varphi$ , деформируемая порошковая пористая заготовка испытывает значительную сдвиговую деформацию [4]:

$$\gamma = 2ctg\varphi. \quad (1)$$

При значении  $\varphi = 45^\circ$ , величина произведённой сдвигом деформации  $\gamma = 2$ .



1 — заготовка; 2 — пуансон; 3 — верхняя полуматрица; 4 — нижняя полуматрица; 5 — контрпуансон

Рисунок 1 Схема РКУ-прессования

При образовании во внешнем углу матрицы мёртвой зоны с углом  $\psi$  величина произведённой деформации будет меньше [5]:

$$\gamma = 2[(\varphi + \psi) + \psi \operatorname{cosec}(\varphi + \psi)]. \quad (2)$$

Для закрытия пор при угловом прессовании необходимо, чтобы величина сдвиговой деформации удовлетворяла условию [5]:

$$\gamma(\theta) = \theta[(\ln \theta - 1)^2 + 1]. \quad (3)$$

При подстановке значений пористости  $\theta = 0,4, 0,2$  и  $0,1$  в выражение (3) сдвиговая деформация  $\gamma$  составит 1,87, 1,56 и 1,19. Отсюда следует, что условие (2) выполняется даже при максимальном значении  $\psi = \pi/4$ , когда внешний радиус закругления каналов матрицы равен нулю.

Поскольку величина сдвиговой деформации при РКУП велика, то для сохранения сплошности материала необходимо, чтобы на элементарный объём, находящийся в плоскости сдвига, действовало высокое гидростатическое давление  $\sigma^o$ . Для того чтобы поры не раскрывались, соотношение действующих на их поверхности величин гидростатического давления и сдвиговой прочности материала  $\tau$  должны удовлетворять условию [4, 6]

$$\frac{\sigma^o}{\tau} = c^2 \theta \frac{(\ln \theta - 1)^2 + 1}{\sqrt{3} \gamma}, \quad (4)$$

где  $c=0,25$  для сферических и  $c=0,33$  для цилиндрических пор.

На плоскости сдвига  $OO'$ , расположенной под углом  $45^\circ$  к направлению течения материала при  $\gamma = 2$ , это соотношение выполняется практически при любой пористости. Таким образом, в пористом материале при РКУ-прессовании должно происходить полное закрытие пор путём пластического формоизменения при гидростатическом давлении, удовлетворяющем условию (4). Отметим, что при уплотнении чисто гидростатическим давлением для полного закрытия малых пор нужны очень большие давления [3]:

$$\theta = \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{c} \cdot \frac{\sigma^o}{\tau}\right). \quad (5)$$

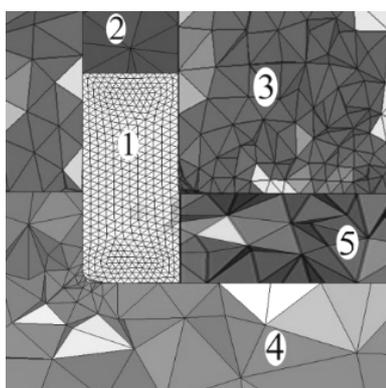
В сырой прессовке частицы связаны между собой только механически [7]. Тогда в зоне пересечения каналов отношение  $\sigma^o/\tau$  будет определять прижимающее частицы усилие и силу, стремящуюся их сместить относительно друг друга. Величина этих сил зависит от размеров частиц, ориентации площадки их контакта и скорости деформирования [8]. В свою очередь, формоизменение порошковых материалов по проходам РКУП влечёт увеличение площади их контакта и появление новых ювенильных поверхностей. Между площадями контакта можно ожидать увеличения схватывания, прочность которого определится степенью механоактивации материала, прижимающим усилием и, как показано в работе [6], увеличением скорости деформации. Следовательно, по мере вытягивания частиц при прохождении зоны пластического сдвига скорость деформации должна привести к увеличению плотности прессовок и схватывания частиц. Скорость деформации в очаге уплотнения определяли по методике А. В. Боткина [8].

Анализ РКУ-прессования заготовки (сечение  $15 \times 15$  мм, длина 30 мм) был выполнен методом конечных элементов при начальной пористости 40 % и 10 %. Конечно-элементная модель РКУ-прессования представлена на рисунке 2,а. Входной и выходной каналы матрицы пересекаются под углом  $90^\circ$ . Внутренний радиус закругления каналов матрицы составляет 1,5 мм, а внешний равен нулю. Модель заготовки представлена сеткой из 40280 элементов с характерным размером элемента 1 мм, содержащей 10070 узловых точек. Характерный размер конечного элемента при разбиении модели инструмента равен 8 мм. При построении сетки в области сопряжения рабочих поверхностей инструмента характерный размер конечного элемента составил половину радиуса закругления. Общее количество конечных элементов модели составило 59200, количество узловых точек — 14800. Противодействие  $P_{np}$  принимали равным 130 МПа. Оснастка представлена абсолютно жёсткими телами. Упругие свойства материала: модуль упругости 124000 МПа, коэффициент Пуассона 0,3. Зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций построена по результатам испытаний на сжатие пористого тела и представлена таблицей в массиве исходных данных. Величина коэффициента трения составила 0,05. Представлены данные по трём сечениям параллельно горизонтальной оси: на расстоянии 3 мм от нижней поверхности матрицы (сечение 1–1, рис. 2, б), по центру образца (сечение 2–2, рис. 2, б) и на расстоянии 3 мм от верхней поверхности заготовки (сечение 3–3, рис. 2, б).

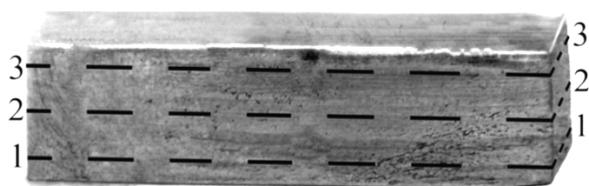
Гидростатическое давление является шаровой компонентой тензора напряжений и характеризует жёсткость схемы напряжённого состояния в исследуемой точке. Если гидростатическое давление больше нуля, то схема считается жёсткой, способной к образованию дефектов при деформировании металла, уменьшая его ресурс пластичности [9]. При всех значениях пористости на установившейся стадии

прессования все материальные точки образца находятся в состоянии гидростатического сжатия, которое обусловлено действующей силой прессования, величиной противодействия и действием сил контактного трения.

При величине пористости 40 % и скорости деформации  $0,1 \text{ с}^{-1}$  во всех сечениях образца получены минимальные значения гидростатического давления (рис. 3, а). При таком значении пористости в большей степени развита структурная деформация, направленная на создание очага уплотнения. Наименьшие величины гидростатического давления наблюдаются в сечении 1–1, что объясняется проскальзыванием металла при выходе из входного канала матрицы, превосходящим сдвиговую деформацию, и кратковременным отрывом металла от нижней поверхности матрицы в последний момент установившегося течения.



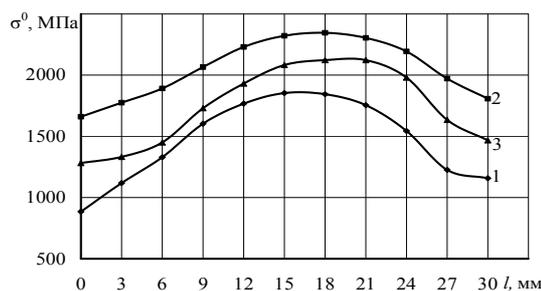
а



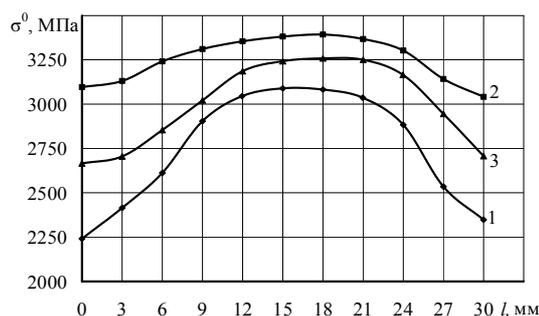
б

1 — заготовка; 2 — пуансон; 3 — верхняя полуматрица; 4 — нижняя полуматрица; 5 — контрпуансон

Рисунок 2 Конечно-элементная модель РКУ-прессования (а) и фото образца с исследуемыми сечениями (б)



а



б

1 — сечение 1–1; 2 — сечение 2–2;  
3 — сечение 3–3

Рисунок 3 Изменение гидростатического давления по длине образца при скорости деформации  $0,1 \text{ с}^{-1}$  при начальной пористости 40 % (а) и 10 % (б)

В сечении 3–3 величины гидростатического давления больше, что является следствием влияния контактного трения на течение металла. В центральном сечении, проходящем через очаг уплотнения, гидростатическое давление максимально. Следует отметить, что очаг уплотнения имеет незначительный объем и смещён к конечной части образца. Несоответствие максимумов кривых свидетельствует о сложной форме очага уплотнения, который начинается приблизительно в средней части образца и распространяется к выходу из канала с подъёмом концевой части к верхней поверхности матрицы.

С уменьшением пористости до 10 % величина гидростатического давления растёт, но характер кривых не изменяется (рис. 3, б). Однако уменьшается структурная деформация и растёт деформация твёрдой фазы. Можно отметить, что более интенсив-

но формируется очаг деформации. При пористости 10 % величина гидростатического давления наибольшая во всех трёх сечениях образца (рис. 3, б) и, соответственно, наибольшие размеры очага деформации.

Особенностью исследований является существование в основном очаге уплотнения при  $\theta_0 = 40\%$ , который при более низких значениях начальной пористости трансформируется в очаг деформации.

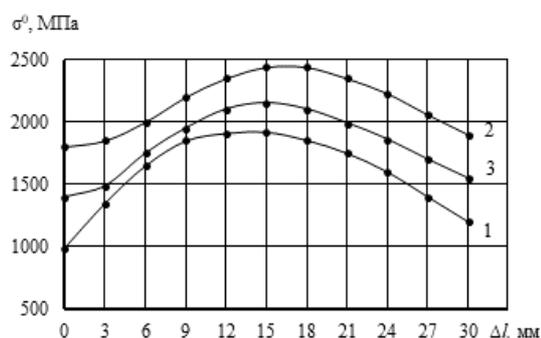
Скорость деформации является одним из важных параметров, определяющих деформационное поведение порошковых материалов. Первые исследования влияния скорости деформации на деформационное поведение чистой меди при уменьшении размера зерна были проведены Р. П. Каррекером-младшим и др. [10].

Показано, что увеличение скорости деформации приводит к росту предела текучести и скоростной чувствительности напряжения течения с уменьшением размера зерна. Однако отметим, что проведённые исследования фокусировались на относительно крупных зёрнах с размером не менее 12 мкм. Показано, что при увеличении скорости деформации растут напряжения, что приводит к достижению плотности при меньших напряжениях и, соответственно, меньших усилиях нагружения.

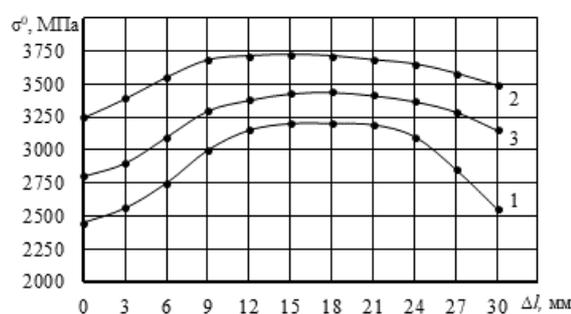
С увеличением скорости деформации до  $10 \text{ с}^{-1}$  очаг уплотнения трансформируется в очаг деформации уже после первого перехода (рис. 4). Его размер увеличивается, а также увеличивается гидростатическое давление. Наибольшая его величина получена в очаге деформации. Причём при малой начальной пористости 10 % величина гидростатического давления достигает 3750 МПа.

Рост гидростатического давления обеспечивает рост плотности в объёме образца. Эксперименты показали, что максимальная плотность достигается, если начальная пористость заготовки меньше и составляет 10 % при обеих скоростях деформации (рис. 5). При этом распределение плотности при всех начальных значениях пористости зависит от объёма очага уплотнения.

При высоких значениях начальной пористости очаг уплотнения имеет небольшой объём, который трансформируется в очаг деформации с увеличением количества переходов. При пористости 10 % и скорости деформации  $10 \text{ с}^{-1}$  на первом переходе уже появляется очаг деформации, в котором наблюдается непосредственно деформация частиц порошка, изменение плотности в очаге деформации находится в пределах ошибки.



а



б

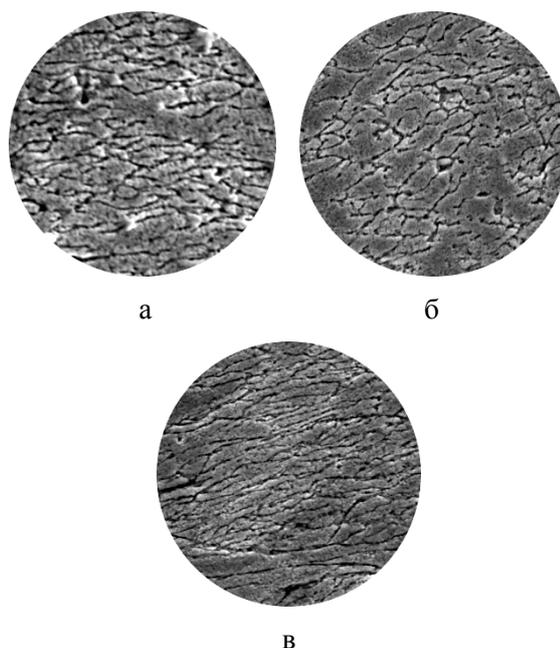
1 — сечение 1-1; 2 — сечение 2-2;  
3 — сечение 3-3

Рисунок 4 Изменение гидростатического давления по длине образца при скорости деформации  $10 \text{ с}^{-1}$  при начальной пористости 40 % (а) и 10 % (б)

Исследования микроструктуры очага уплотнения и деформации показывают, что при начальной пористости 40 % частицы порошка вытягиваются вдоль направления прессования, изменение направления оси частиц не происходит (рис. 6, а). Это указывает на большой объём структурной деформации и мень-

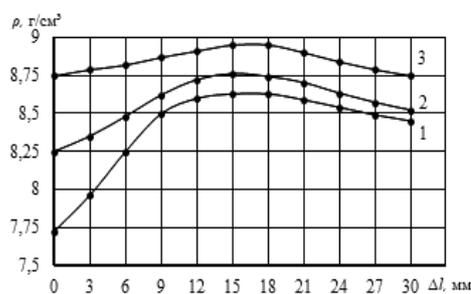
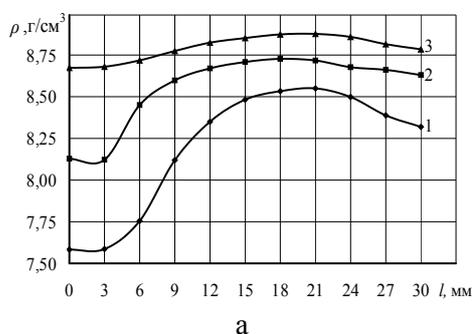
шую деформацию твёрдой фазы. В структуре наблюдается значительная пористость. При начальной пористости 10 % исходные частицы порошка вытягиваются вдоль оси, ориентированной под углом около  $30^\circ$  относительно продольной оси образца (рис. 6, б, в). Такая ориентация и форма частиц указывают, что деформация в очаге была однородной [4, 8].

Границы между частицами широкие и чётко выражены, что указывает на слабую металлическую связь между ними. Очевидно, при всех значениях начальной пористости после прессования плотность получена высокая, однако прочность материала недостаточна. Действительно, предел прочности на сжатие составил 225 МПа и 380 МПа при начальной пористости 40 % и 10 % соответственно. Только больших деформаций и высокого гидростатического давления недостаточно для образования прочных контактов на границах раздела частиц.



а — 40 %, б — 20 %, в — 10 %;  $\times 3000$

Рисунок 6 Микроструктура очага деформации образцов после РКУ-прессования с различной начальной пористостью



начальная пористость:  
1 — 40 %; 2 — 20 %; 3 — 10 %

Рисунок 5 Изменение плотности по длине образца при скорости деформации  $0,1 \text{ с}^{-1}$  (а) и  $10 \text{ с}^{-1}$  (б)

Вероятно, схватыванию порошков мешают также оксидные плёнки, поверхностные загрязнения и адсорбированные газы, которые не выносятся из зоны контакта [3].

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Таким образом, исследования показали, что максимальную плотность порошковой заготовки пористостью 40 % можно получить только за четыре прохода. При этом сначала появляется очаг уплотнения, затем с ростом гидростатического давления он трансформируется в очаг деформации. При пористости заготовки 10 % максимальная её плотность достигается за один проход, а величина гидростатического давления обеспечивает образование очага деформации высокой плотности.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку технологии использования РКУ-прессования для получения деталей машиностроения.

**Библиографический список**

1. Maydanyuk, A. Equal channel angular extrusion of porous billets : computer simulation and experimental study [Text] / A. Maydanyuk, M. Shtern, G. Bagluck, L. Ryabicheva // *The International congress and exhibition EURO PM 2010 proceedings*. — Florence, 2010. — Vol. 3. — P. 1206–1212.
2. Майданюк, А. П. Эволюция распределения плотности при равноканальном угловом прессовании пористых заготовок [Текст] / А. П. Майданюк, Л. А. Рябичева, М. Б. Штерн, Г. А. Баглюк // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. — Луганськ : СХУ ім. В. Даля, 2008. — № 3, ч. 2. — С. 213–216.
3. Рябичева, Л. А. Деформационное поведение порошковой пористой заготовки при РКУ-прессовании [Текст] / Л. А. Рябичева, В. В. Смоляк // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. — 2010. — № 43. — С. 22–26.
4. Valiev, R. Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation [Text] / R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov // *Progress in materials science*. — Ufa, 2000. — Vol. 45, no. 10. — P. 103–189.
5. Сегал, В. М. Процессы пластического структурообразования металлов [Текст] / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов и др. — Минск : Наука и техника, 1994. — 232 с.
6. Segal, V. M. Variation of the density of porous materials during plastic shaping [Text] / V. M. Segal, V. I. Reznikov, V. F. Malyshev // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. — 1979. — Vol. 18, Iss. 7. — P. 427–431.
7. Favrot, N. Modeling Sintering Deformations occurring After Cold Compaction, Qualitative Methods for the Mechanics of Compaction [Text] / N. Favrot, J. Besson, C. Colin, F. Delannay, Y. Bienvenu // *Proceedings of the International Workshop on Modeling of Metal Powder Forming Process*. — Grenoble, 1997. — P. 133–147.
8. Боткин, А. В. Моделирование термических и механических условий деформирования и разрушения металла в процессах ИПД [Текст] / А. В. Боткин, Р. З. Валиев, С. В. Дубинина // *Мавлютовские чтения : Сб. ст. V всероссийской науч.-техн. конф.* — Уфа : УГАТУ, 2011. — Т 3. — С. 30–35.
9. Сегал, В. М. Совместная деформация слоистых металлов при простом сдвиге [Текст] / В. М. Сегал, Д. А. Павлик // *Технология лёгких сплавов*. — 1981. — № 10. — С. 47–52.
10. Carreker Jr, R. P. Tensile deformation of high-purity copper as a function of temperature, strain rate, and grain size [Text] / R. P. Carreker Jr, W. R. Hibbard Jr // *Acta Metal*. — 1953. — Vol. 1. — P. 654–655, 657–663.

© Рябичева Л. А.© Коробко Т. Б.© Бабич И. Н.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. зав. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В.,  
д.т.н., проф., зав. каф. ПуХЛ ЛНУ им. В. Даля Гутько Ю. И.**

Статья поступила в редакцию 30.10.19.

**д.т.н. Рябичева Л. О.** (ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР, ryabic@gmail.com),

**к.т.н. Коробко Т. Б.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, korobko.tamara@rambler.ru),

**Бабіч І. М.** (ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР, nev123lg@gmail.com)

### **ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПОРОШКОВИХ ПОРИСТИХ ЗАГОТОВОК ПІД ЧАС РКК-ПРЕССУВАННЯ**

Досліджено зміну гідростатичного тиску, щільності і мікроструктури порошкових пористих заготовок при РКК-пресуванні з різною швидкістю деформації. Максимальну щільність порошкової заготовки пористістю 40 % отримано за чотири проходи, пористістю 10 % — за один прохід. При цьому при пористості заготовки 40 % спочатку з'являється середовище ущільнення, потім зі зростанням гідростатичного тиску воно трансформується в середовище деформації. При пори-

стості заготовки 10 % величина гідростатичного тиску забезпечує створення середовища деформації високої щільності. Зростання швидкості деформації приводить до збільшення гідростатичного тиску і досягнення більшої щільності за меншу кількість проходів.

**Ключові слова:** рівноканальне кутове пресування, зсувна деформація, щільність, мікроструктура, величина зерна, швидкість деформації.

**Doctor of Technical Sciences Ryabicheva L. A.** (LNU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, ryabic@gmail.com), **PhD in Engineering Korobko T. B.** (DonSTU, Alchevsk, LPR, korobko.tamara@rambler.ru), **Babich I. N.** (LNU named after V. Dahl, Lugansk, LPR)

#### **EFFECT OF DEFORMATION RATE ON THE STRESS-STRAIN STATE OF POWDER POROUS BLANKS DURING EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP)**

*There has been studied the change of hydrostatic pressure, density and microstructure of powder porous blanks during ECA-pressing with different deformation rate. The maximum density of powder blanks with a porosity of 40 % is obtainable only in four passes, with a porosity of 10 % — in one pass. At the same time, when the porosity of the blank is 40 %, first there is an area of firming, then with increasing of hydrostatic pressure it is transformed into a deformation zone. When the porosity of the blank is 10 %, the value of hydrostatic pressure provides the formation of a high-density deformation zone. Increasing of deformation rate leads to an increase in hydrostatic pressure and achieving greater density in fewer passes.*

**Key words:** equal channel angular pressing, shear deformation, density, microstructure, grain size.