

Рост величины противодействия приводит к росту напряжений как в очаге деформации, так и вне его, однако неравномерность напряжений уменьшается. Полученные данные по распределению интенсивностей деформаций, скоростей деформаций и напряжений по сечению образца свидетельствуют о том, что противодействие 95 МПа обеспечивает получение качественного образца с наименьшей неравномерностью напряженно-деформированного состояния и с достаточной плотностью.

**Список литературы:** 1. Головин В.А. Технология холодной штамповки выдавливанием / В.А. Головин, А.М. Митькин, 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 інститут, 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 Харьк.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 Sinergic 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 Восточнoукраинского национального университета им. В. Даля, г. Луганск  
**СМОЛЯК В.В.** аспирант, Восточнoукраинский 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 микротвердості після РКК-пресування. Отримано беспористий матеріал після першого проходу. Показано розподіл інтенсивності зсувної деформації і микротвердості.

Ключеві слова: рівноканальне кутове пресування, інтенсивність деформацій, щільність, микротвердсть.

The strain state and density changing of powder porous samples with initial porosity of 42% have been investigated by coordinate grid method and microhardness after ECAE-pressing. The pore-free material has been obtained after first pass. The distribution of shear strain intensity and microhardness are presented.

Key words: equal-channel angular extrusion, strain intensity, density, microhardness.

Процесс равноканального углового прессования (РКУ-прессования) является одним из способов обработки металлов давлением (ОМД), при выполнении которого материал испытывает интенсивные пластические деформации [1]. В отличие от традиционных способов ОМД основной целью такой обработки является накопление деформации в материале без изменения его формы. Схема простого сдвига обеспечивает возможность многократного деформирования путем изменения направления действия касательных напряжений, за счет чего во всем объеме заготовки происходит равномерное измельчение структуры [2]. Несмотря на все свои преимущества, процесс РКУ-прессования до сих пор не реализован в промышленных масштабах, и его исследования носят сугубо лабораторный характер. При этом каждая установка для данного способа ОМД сама по себе уникальна. Подавляющее большинство исследований в этой области направлены на изучение структуры и свойств обрабатываемого материала. Результаты исследований механических аспектов этого процесса носят разрозненный характер. Малоизучен характер течения металла в канале, особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) [3]. Решение таких вопросов позволит разработать требования к формообразующему инструменту и практически реализовать технологический процесс РКУ-прессования.

Целью данной работы является экспериментальное исследование деформированного состояния порошковых пористых образцов при РКУ-прессовании с помощью метода координатных сеток и микротвердости.

Заготовки для РКУ-прессования призматической формы сечением 15x15 мм, длиной 59 мм, исходной пористостью 40% изготавливали из стабилизированного медного порошка марки ПМС-1 ГОСТ 4960-75 двусторонним прессованием на гидравлическом прессе модели ПД-476 силой 1600 кН. Спекание осуществляли в среде синтез-газа по ступенчатому режиму. После спекания образцы имели пористость 42%. Для исследования деформированного состояния исходные прессовки разрезали и на продольном сечении наносили координатную сетку размером 3x3 мм на координатно-расточном станке.

Деформирование выполняли в специальной установке для РКУ-прессования (рис. 1). Матрица имеет четыре канала, пересекающихся под углом 90°, с одинаковыми размерами поперечных сечений, что обеспечивает непрерывное деформирование образцов без извлечения их из штампа. Матрица имеет внутренний радиус закругления 1,5 мм, внешний равен 0. В качестве смазки применяли дисульфид молибдена, который наносили на всю поверхность образца и матрицы. Деформирование осуществляли за два прохода. После первого прохода матрицу поворачивали на 90° и осуществляли повторное деформирование. Давление прессования на первом проходе составило 890 МПа,

на втором – 1330 МПа, величина противодействия – 90 МПа и 150 МПа соответственно. Противодействие регулировали силой, создаваемой вдавливанием свинца через отверстие матрицы.

После деформирования сетку измеряли с помощью инструментального микроскопа. Поле деформаций рассчитывали по методике И.П. Рене [4]. Величину напряжений оценивали по изменению микротвердости по продольному сечению образца на микротвердомере ПМТ-3. Плотность исследовали методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 25281-82. Для выполнения расчетов использован стандартный программный пакет «Mathematica 5.0».

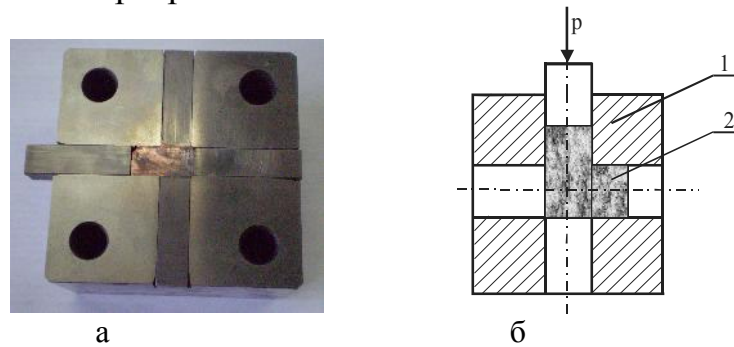


Рис. 1. Установка для РКУ-прессования: фото матрицы – а; эскиз штампа – б: 1 – матрица; 2 – образец

Распределение плотности по длине образца после первого прохода более неравномерно, чем после двух проходов (рис. 2). В первой зоне, находящейся в горизонтальном канале матрицы, со стороны противодействия, образец доуплотнился в меньшей степени. После первого прохода плотность составила 8,53 г/см<sup>3</sup> и после второго прохода 8,72 г/см<sup>3</sup>. Во второй зоне, в очаге деформации, получена наиболее высокая плотность равная после первого прохода 8,82 г/см<sup>3</sup> и после второго прохода 8,88 г/см<sup>3</sup>. В третьей зоне, находящейся под пуансоном, в вертикальном канале матрицы, плотность составила 8,77 г/см<sup>3</sup> после первого и 8,85 г/см<sup>3</sup> после второго проходов. Предварительное уплотнение на первом проходе и рост противодействия на втором обеспечило получение в двух зонах образца высокой плотности при плотности компактной меди 8,89 г/см<sup>3</sup>.

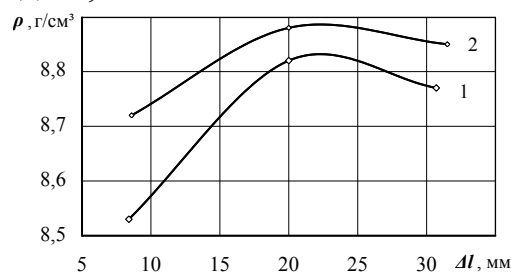


Рис. 2. Распределение плотности по длине образца после первого (1) и второго (2) проходов

Математическая обработка сетки, искаженной деформацией, позволила проанализировать течение материала и оценить очаг пластической деформации (рис. 3). По компонентам тензора деформации рассчитывали интенсивность сдвиговой деформации по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + 6(\gamma_{xy} + \gamma_{yz} + \gamma_{zx})},$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  - линейные деформации;

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  - сдвиговые деформации.

По полученным данным строили распределение интенсивности деформаций по продольному сечению образцов (рис. 4).

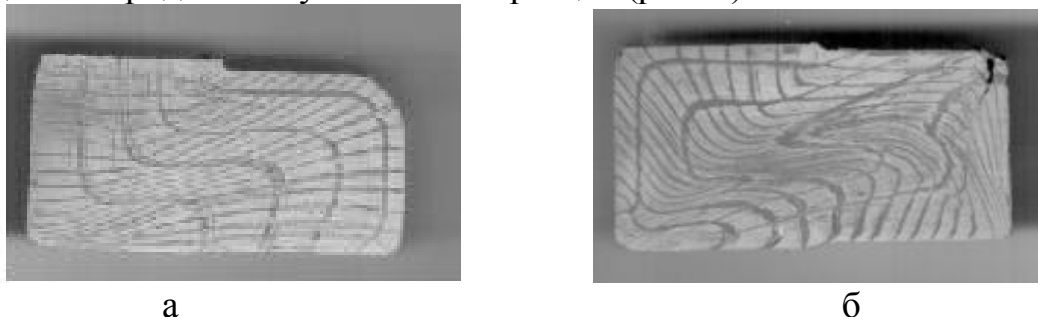


Рис. 3. Вид координатной сетки на образцах: а – после первого прохода; б – после второго прохода

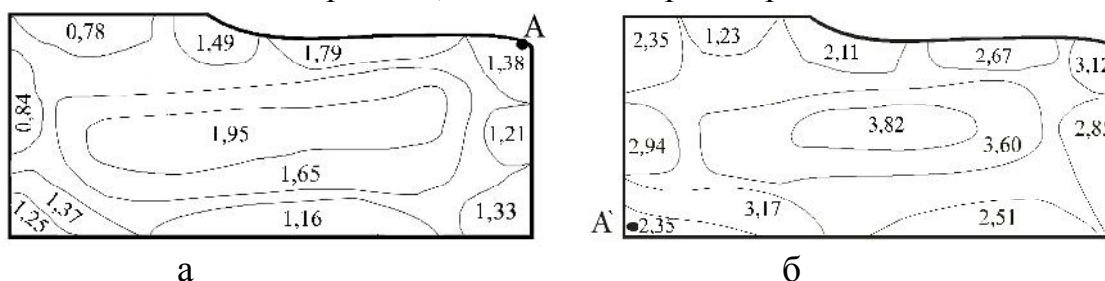


Рис. 4. Распределение интенсивности сдвиговой деформации: а – после первого прохода; б – после второго прохода

Величина накопленной деформации, рассчитанная по методике [1], составила на первом проходе 1,73, на втором – 3,46.

В процессе деформирования координатная сетка меняет размеры и форму ячеек. На установившейся стадии течения после первого прохода очаг деформации заполнен и сформирован передний конец образца при противодействии 90 МПа (рис. 4,а). Деформированное состояние срединной части образца соответствует простому сдвигу – исходные квадратные элементы превратились в параллелограммы. Элементы координатной сетки,двигающиеся вдоль стенок канала, испытывают действие сил трения и деформируются не только сдвигом, но и за счет удлинения и укорочения. Вдоль наружной стенки канала обнаруживается немонотонность деформирования: в вертикальной канале происходит деформация сжатием, в горизонтальном – растяжением. Вдоль внутренней стенки эта немонотонность выражена в меньшей степени. На внутреннем радиусе слои металла движутся с большей скоростью, на внешнем угле пересечения вертикального и горизонтального каналов скорость движения металла замедляется. Это объясняется существенной разницей в расстояниях, которые надо пройти слоям металла, что приводит к искажению поля деформаций и интенсивность сдвиговой деформации не является равномерной. В условия противодействия равного 90 МПа происходит заполнение угла горизонтального канала. На образце наблюдается утяжина, возникающая

вследствие роста интенсивности сдвиговой деформации. Средний уровень интенсивности сдвиговых деформаций на участках, удаленных от поверхности канала, соответствует данным, полученным В.М. Сегалом методом линий скольжения [1]. Очевидно, равномерность поля деформаций будет зависеть от протяженности горизонтального участка.

После второго прохода с противодавлением 150 МПа наблюдается рост интенсивности сдвиговой деформации во всех зонах образца (рис. 4,б). Для очага деформации характерно образование вихревого поля смещений элементов сетки, что свидетельствует об интенсивном образовании высокоугловых границ в процессе пластической деформации [5].

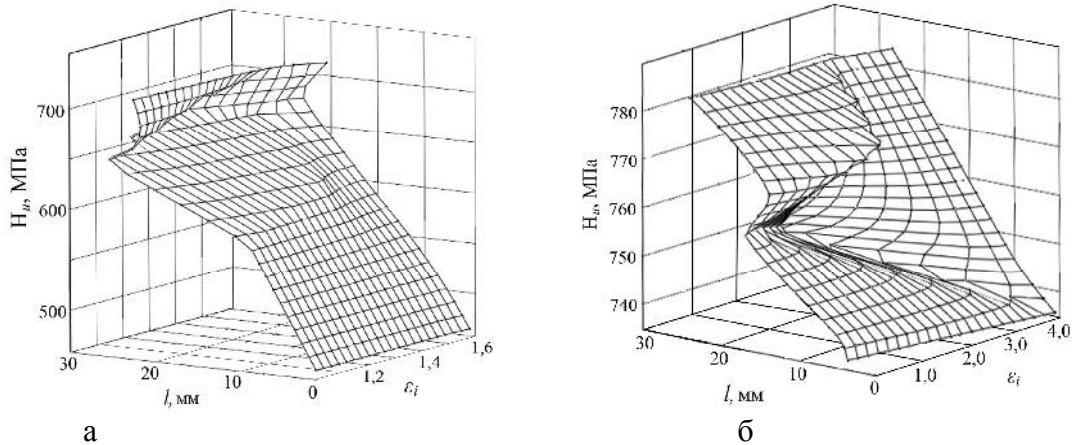


Рис. 5. Изменение микротвердости после первого прохода – а, после второго прохода – б

Для оценки упрочнения материала измеряли микротвердость, количество измерений на одну точку составляло 16. Нагрузка составляла 25 г, погрешность измерений 8-10%. Наблюдается немонотонное изменение микротвердости по сечению образца. В очаге деформации, как после первого, так и после второго проходов получена максимальная микротвердость. Таким образом, экспериментально рассмотрена установившаяся стадия порошкового пористого материала при одном и двух проходах РКУ-прессования. На основе полученных полей интенсивности сдвиговой деформации и микротвердости исследован характер формоизменения. С помощью РКУ-прессования получен компактный материал из образца с исходной пористостью 42%.

**Список литературы:** 1. Сегал В.М. Процессы пластического структурообразования металлов / В.М.Сегал, В.И.Резников, В.И.Копылов // Минск:Наука и техника, 1994. –232 с. 2. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров // М.: Логос, 2000. – 272 с. 3. Периг А.В. Численное математическое моделирование основных показателей качества при равноканальном угловом прессовании на основе решения уравнения переноса вихря / А.В. Периг, Н.Н. Голоденко, А.М. Лаптев [и др.] // Обработка материалов давлением, 2010, №1 (22). – С . 70-76. 4. 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. 5. Бейгельзимер Я.Е. Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью / Я.Е. Бейгельзимер // Физика и техника высоких давлений, 2008, Т.18, №4 – с. 77-87.