

DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.01

УДК 539.37

**А.М. Авдеенко, Ю.А. Крупин, Н.А. Пименова**Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСиС», Москва, Россия**РОТАЦИОННЫЕ МОДЫ ДЕФОРМАЦИИ  
ПОРИСТЫХ СТРУКТУР**

Рассматривается процесс деформации и потери устойчивости течения при деформации пористой структуры на основе алюминия с высокой концентрацией пор. Исходным материалом служил порошок из сплава АМг6 с размером частиц менее 1 мм. Проводились испытания на сжатие со средней скоростью 1 мм/мин. Нагружение при температуре  $T = 293\text{K}$  осуществлялось до определенной деформации, затем испытания останавливались, и образец фотографировался. Анализируются ротационные моды пластического течения и их связь с началом процесса разрушения. Для этого выделяются реперные точки – стыки пор и определяется их траектория в процессе нагружения. Была установлена важная роль неоднородного поворота, связанного с сильной неоднородностью пористой структуры. Неоднородный поворот в окрестности крупной центральной поры ведет к схлопыванию двух соседних пор и последующему разрушению. Феноменология процесса такова: неоднородный поворот в окрестности крупной центральной поры приводит к схлопыванию двух крупных и одной поры среднего размера. Это вращение «тянет» за собой перемещение смежных с ними двух мелких пор и т.д. Концентрация крупных пор (в 3–5 раз больше среднего размера) мала  $\sim 10^{-2}$ ; их статистика лежит на так называемых «хвостах распределений» – областях, где статистические методы малоэффективны: не выполняются предельные неравенства и теоремы теории вероятности. Эти области определяют в конечном счете момент потери устойчивости и разрушения пористой структуры. Наличие малого количества крупных пор снижает предельную деформацию на 10–15 % и энергоёмкость структур на 25–35 %.

**Ключевые слова:** процесс деформации, пористые структуры, ротационные моды, неоднородный поворот, сильная неоднородность, разрушение, хвосты распределения, энергоёмкость деформации, реперные точки, неустойчивость течения

**A.M. Avdeenko, Y.A. Krupin, N.A. Pimenova**National University of Science and Technology “MISIS”,  
Moscow, Russian Federation**ROTATIONAL DEFORMATION MODE  
OF POROUS STRUCTURES**

We consider the process of deformation and buckling of flow during compression of the porous structure on the basis of aluminum with a high concentration of pores. The starting material is AMg6 alloy powder having a particle size of less than 1 mm. Compression tests are performed at an average rate of 1 mm / min. Loading at a temperature  $T = 293\text{ K}$  was carried out to a certain strain, then the test sample was photographed and stayed. The authors analyzed rotary modes of plastic flow and their

relationship with the beginning of the fracture process. In order to do this, we allocated reference points – the joints and then determined their trajectory in the process of loading. We established the important role of nonuniform rotation associated with strong heterogeneity of the porous structure. Nonuniform rotation in the vicinity of large central pores lead to a collapse of the two neighboring pores and subsequent destruction. Phenomenology process was as follows: inhomogeneous rotation in the vicinity of large central pores lead to a collapse of two large and one medium-sized pores. This rotation "pulled" the displacement of two small pores related to them, etc. The concentration of large pores (3–5 times larger than the average size) was small  $\sim 10^{-2}$ ; their statistics lied on the so-called "tail of the distribution" areas where statistical methods were ineffective, i.e. limit inequalities and theorems of probability theory were not executed. These areas ultimately determined moment buckling and fracture of the porous structure. Having a small number of large pores reduced the ultimate strain of 10–15 % and power consumption of the structures 25–35 %.

**Keywords:** process of deformation, porous structure, rotary modes, fracture process, nonuniform rotation, strong heterogeneity, destruction, tails of distribution, energy intensity of deformation, reference points, flow instability.

## **Введение**

Гиперпористые структуры на основе легких металлов представляют существенный интерес как конструкционные материалы, обладающие комплексом уникальных свойств: легкостью, жесткостью, коррозионной стойкостью, низкой теплопроводностью и относительной дешевизной производства. Они могут использоваться как конструкционные элементы в автомобильной промышленности, звукопоглощающие панели, элементы строительных конструкций, демпферы высокоэнергетических воздействий, амортизационные платформы и т.д.

Свойства структур определяются такими параметрами, как массовая плотность (обычно ниже  $1 \text{ г/см}^3$ ), размеры и степень неоднородности пористой структуры [1, 2], химический состав, способ получения и термообработки, макрогеометрия (панели, трубы) и т.д.

При этом существенной проблемой является установление связи между структурой – пористостью (в том числе неоднородностью) – и конечными механическими свойствами. Кроме того, особенности производства (например, вспенивание с наполнителем) зачастую не дают статистически воспроизводимых структур и, как следствие, механических свойств.

Наконец, сама деформация структуры под нагрузкой существенно неоднородна как в масштабах самих пор [1–4], так и на следующем масштабном уровне – в материале стенок пор. В последнем случае локальные деформации в стенках пор во много раз превосходят среднюю деформацию структуры. Потеря устойчивости стенок пор (арочная модель [2]) может приводить к мгновенному разрушению конструкции в макромасштабах.

Сложность математического описания течения пористой структуры состоит в существенной неоднородности материала: размеры пор, толщина стенок могут сильно меняться в пределах одной средней пористости; локальная диаграмма деформации в масштабах среднего размера пор сильно отличается от средней деформации, причем в процессе нагружения происходит уплотнение материала и, как следствие, возникает необходимость перенормировки диаграммы на новую локальную плотность. Один из вариантов подобного описания предложен в работах [6–8].

Другая проблема при математическом описании деформации пористой структуры заключается в большой величине локальных деформаций, и поэтому невозможно ограничиться лишь тензором деформации [9–11, 12].

Необходимо учитывать тензор полной дисторсии и отдельно рассматривать его несимметричную часть – псевдовектор поворота или ротационные моды деформации.

Именно ротационные моды течения пористых структур и определяют, по мнению авторов, макронеустойчивость и разрушение (для пористых структур потерю несущей способности) пористых материалов. Цель предлагаемой работы – исследование возникновения и развития ротационных неустойчивостей течения пористых структур и их связь с зарождением разрушения.

### **1. Материал и методика эксперимента**

Для анализа ротационных мод деформации пористых структур использовались образцы пеноалюминия. Исходным материалом служил порошок из сплава АМг6 с размером частиц менее 1 мм. Порошковая смесь сплава и порофора  $TiH_2$  перемешивалась в планетарном активаторе без ПАВ в атмосфере аргона и компактировалась при 300–450 °С (консолидация). Консолидированные заготовки цилиндрической формы диаметром 25 мм и высотой 30 мм – прекурсоры – вспенивались в стальной цилиндрической форме при температурах 800 и 1000 °С. После вспенивания высота образцов достигала 50 мм.

На электроискровой установке вырезались образцы правильной формы высотой 15 мм и основанием 17×16 мм.

Проводились испытания на сжатие на универсальной машине ZWICK/ROELL Z250 со средней скоростью 1 мм/мин. Нагружение осуществлялось до определенной деформации, затем испытания останавливались и образец фотографировался (рис. 1).

Информация вводилась в компьютер и обрабатывалась с помощью программы Adobe Photoshop. На обработанной фотографии образца фиксировались тройные стыки пор (ячеек) и определялись их координаты.

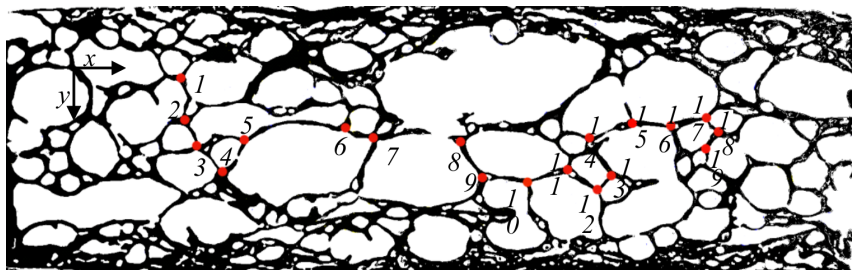


Рис. 1. Схема идентификации характерных точек

Далее на фотографиях проверялось соответствие всех стыков при каждой степени деформации и определялись их координаты.

Для оценки ротационных мод использовался вектор поворота  $\tilde{\omega}$ , характеризующий вращение элементарного объема (ячейки) и вычисляемый по выражению

$$\omega(n, \varepsilon_k) = \frac{1}{2} (E_{12}(n, \varepsilon_k) - E_{21}(n, \varepsilon_k)),$$

где  $n$  – номер характерной точки – тройного стыка;  $\varepsilon_k$  – средняя деформация.

Величина  $E_{i,j}$  – дисторсия в характерных точках при всех степенях деформации, определяемая из соотношения

$$E_{ij} = \frac{A_i(n+1, \varepsilon_k) - A_i(n, \varepsilon_k)}{x_j(n+1) - x_j(n)},$$

где  $A_i(n+1, \varepsilon_k)$  – смещение точек  $(n+1)$  при средней деформации  $\varepsilon_k$ ;  $A_i(n, \varepsilon_k)$  – смещение точек  $n$  при средней деформации  $\varepsilon_k$ ;  $x_i(n+1)$ ,  $x_i(n)$  – координаты точек  $(n+1)$  и  $n$  в исходном состоянии при  $\varepsilon=0$ .

## 2. Обсуждение результатов

Полученные результаты представлены на рис. 2–4 (для некоторых выбранных точек).

Из рис. 2 и 3 видно, что вектор поворота для точек, характеризующих положение крупных пор, нарастает при увеличении деформа-

ции гораздо интенсивнее, чем для точек мелких пор. Соответствующие кривые  $\Phi(\varepsilon)$  строились методом наименьших квадратов с использованием аппроксимирующих полиномов не выше второго порядка.

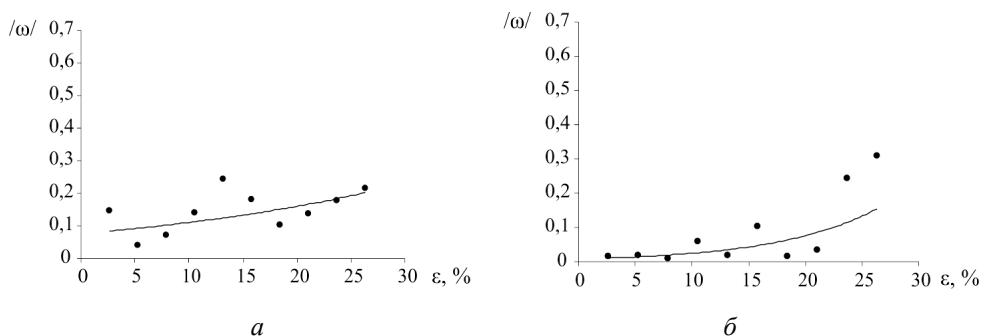


Рис. 2. Зависимость модуля вектора поворота от средней деформации для точек, характеризующих положение мелких пор: *a* – для торцевой части образца; *б* – для противоположной стороны образца

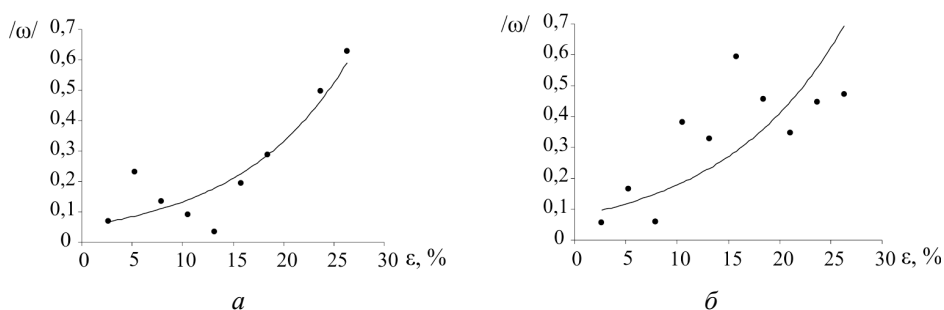


Рис. 3. Зависимость модуля вектора поворота от средней деформации для точек, характеризующих положение крупных пор: *a* – для торцевой части образца; *б* – для противоположной стороны образца

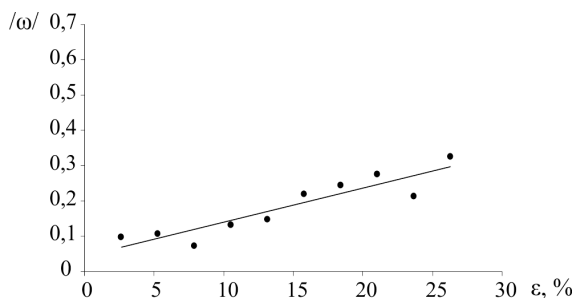


Рис. 4. Зависимость среднего по модулю поворота от средней деформации

Можно сказать, что уже на начальном этапе нагружения деформируются и вращаются поры всех размеров, но наибольший вклад в ротационные моды пластической деформации пористых структур вносят крупные поры.

Иными словами возникает неоднородный поворот, мера которого тензор полного изгиб-кручения  $\chi_{ij} = -\frac{1}{2}e_{ijk}\varpi_k$ . В области максимальных  $\chi_{ij}$  материал теряет устойчивость течения и разрушается.

Феноменология процесса такова: неоднородный поворот в окрестности крупной центральной поры (рис. 5) провоцирует схлопывание двух крупных и одной поры среднего размера (рис. 5, в), т.е. локальное разрушение.

Это вращение «тянет» за собой перемещение смежных с ними мелких пор. Схематически вращение крупных пор и перемещение связанных с ними мелких пор представлено на рис. 6. Разрушение каркаса заканчивается при напряжениях, в 1,5 раза превышающих значение, при котором наблюдается потеря устойчивости материала, обусловленная ротацией (для данного материала примерно 13 МПа).

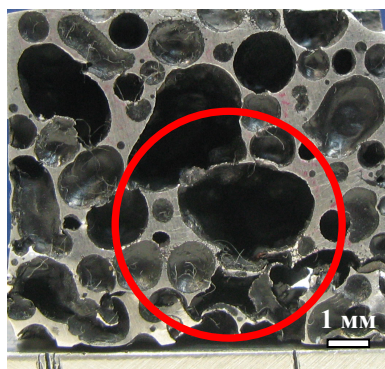
Схлопывание и последующее разрушение за счет неоднородного поворота в окрестности крупной поры затрудняют построение статистической модели потери устойчивости течения и разрушения пористых сред.

Концентрация крупных пор (в 3–5 раз больше среднего размера) мала,  $\sim 10^{-2}$ ; их статистика лежит на так называемых «хвостах распределений» – областях, где статистические методы малоэффективны: не выполняются предельные неравенства и теоремы теории вероятности.

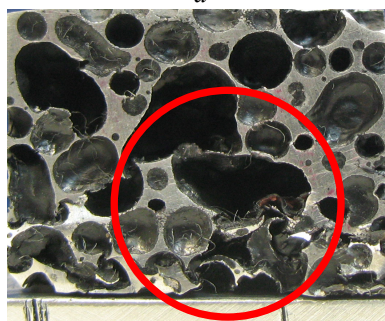
Но именно эти области и определяют в конечном счете момент потери устойчивости и разрушения пористой структуры. В частности, наличие малого количества (в пределе всего одной-двух) крупных пор снижает предельную деформацию на 10–15 % и энергоемкость структур на 25–35 % [14–15].

Отсюда следует невозможность построения рациональной теории неустойчивого течения и разрушения пористых структур на основе только классических статистических моделей: свойства как функция тех или иных локальных или нелокальных моментов структур: концентраций, высших моментов корреляционных функций различного порядка и т.д.

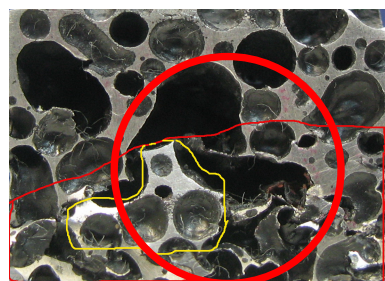
Кстати, подобная проблема возникает и при построении разумных моделей вязкого разрушения сплошных сред. Разрушение определяется не средними свойствами дефектной структуры, а малым количеством «плохих мест» – областей зарождения микротрещин.



*a*

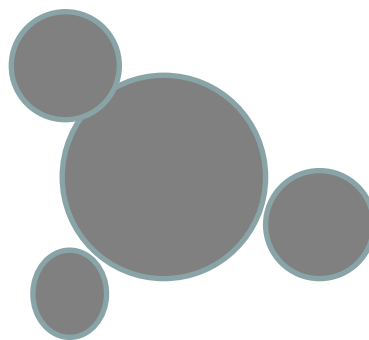


*б*

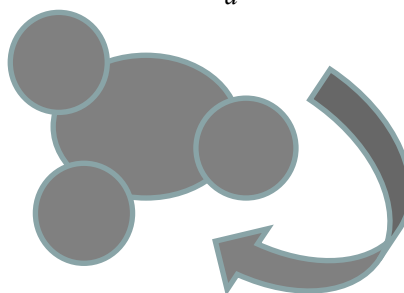


*в*

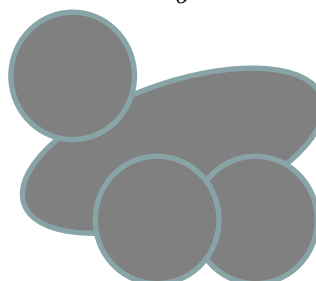
Рис. 5. Динамика локализации течения в окрестности крупной поры; средняя деформация: *a* – 18 %; *б* – 23 %; *в* – 27 %



*a*



*б*



*в*

Рис. 6. Схематическое представление ротационной потери устойчивости течения пористой структуры: *a* – исходное состояние; *б* – ротация крупной поры в процессе деформации; *в* – структура после деформации

### **Заключение**

Разрушение пористых структур определяется не средними свойствами дефектной структуры, а малым количеством «плохих мест» – областей зарождения микротрещин, поэтому построение рациональной теории их неустойчивого течения и разрушения на основе только классических статистических моделей невозможно.

Зарождение микротрещин связано с неоднородным поворотом в окрестности крупных пор, провоцирующим их собственное «схлопывание» и аналогичное взаимодействие со смежными порами, т.е. локальное разрушение.

Мерой неоднородного поворота является тензор полного изгиба-кручения. В области максимальных значений его компонентов материал теряет устойчивость течения и разрушается.

### **Библиографический список**

1. Microcalcifications of breast cancer and atypical cystic lobules associated with infiltration of foam cells expressing osteopontin / T. Oyama, T. Sano, T. Hikino, Q. Xue // *Virchows Arch.* – 2002. – Bd. 440. – P. 267–273.

2. Andrews E., Sanders W., Gibson L.J. Compressive and tensile behaviour of aluminium foams // *Material Science and Engineering A.* – 1999. – Vol. 270. – P. 113–124.

3. Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results / E.W. Andrews, G. Gioux, P. Onck, L.J. Gibson // *International Journal of Mechanical Sciences.* – 2001. – Bd. 43. – P. 701–713.

4. Gupta N., Dung D. Luong, Cho Kyu Magnesium Matrix Composite Foams–Density // *Mechanical Properties and Applications Metals.* – 2012. – Vol. 2. – P. 238–252.

5. Compressive characteristics of A356 fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique / P.K. Rohatgi, J.K. Kim, N. Gupta, S. Alaraj, A. Daoud // *Compos. A. Appl. Sci. Manuf.* – 2006. – Vol. 37. – P. 430–437.

6. Digital Image Correlation technique applied to mechanical characterisation of aluminium foam / M. De Giorgia, S. Giancane, R. Nobile, F. Palano // *EPJ Web of Conferences* 6. – 2010. – 31004. – P. 1–8, available at: [http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2010/05/epjconf\\_ICEM14\\_31004.pdf](http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2010/05/epjconf_ICEM14_31004.pdf).



7. Finite Element Modelling of Orthopaedic Implants using Metal Foam / G.L. Manco, K. Dattab, J. Williamc, T. Momend, D. Umbrelloa, F. Gagliardia // SIMULIA Customer Conference – 2011. – P. 1–15, available at: <http://www.simulia.com/forms/world/pdf2011/Manco.pdf>.

8. Tagliavia G., Porfiri M., Gupta N. Elastic interaction of interfacial spherical-cap cracks in hollow particle filled composites // *Int. J. Solids Struct.* – 2011. – Vol. 48. – P. 1141–1153.

9. Marchi C.S., Mortensen A. Deformation of Open-Cell Aluminum Foam // *Acta Mechanica.* – 2001. – Vol. 49. – P. 3959–3969.

10. Kennedy A.R. The effect of TiH<sub>2</sub> heat treatment on gas release and foaming in Al–TiH<sub>2</sub> performs // *Scripta Materiali.* – 2002. – Vol. 47. – P. 763–767.

11. High strain rate compressive characterization of aluminum alloy/fly ash cenosphere composites / D. Luong, N. Gupta, A. Daoud, P. Rohatgi // *JOM.* – 2011. – Vol. 63. – P. 53–56.

12. Koudelka P., Jiroušek O., Valach J. Determination of mechanical properties of materials with complex inner structure using microstructural models // *MTM – Machines, Technologies, Materials. International virtual journal for science, technics and innovations for the industry.* – 2011. – Vol. 5. – P. 39–42, available at: <http://mech-ing.com/journal/3-2011.html>.

13. Xinzhu W., Guangtao Zh. The Static Compressive Behavior Of Aluminium Foam // *Rev. Adv. Mater. Sci.* – 2013. – Vol. 2. – P. 316–321.

14. Авдеенко А.М., Мельниченко А.С., Филиппова В.Б. Мезомеханика деформации пористых структур // *Физическая мезомеханика.* – 2003. – № 4. – С. 10–15.

15. Авдеенко А.М., Крупин Ю.А. Влияние статистических характеристик распределения армирующих частиц на условия разрушения композиционного материала // *Механика композиционных материалов и конструкций.* – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 97–102.

## References

1. Tetsunari Oyama, Takaaki Sano, Toshiaki Hikino, Qi Xue. Microcalcifications of breast cancer and atypical cystic lobules associated with infiltration of foam cells expressing osteopontin. *Virchows Arch.*, 2002, bd. 440, pp. 267-273.

2. Andrews E., Sanders W., Gibson L.J. Compressive and tensile behaviour of aluminium foams. *Material Science and Engineering A.*, 1999, vol. 270, pp. 113-124.

3. Andrews E.W., Gioux G., Onck P., Gibson L.J. Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, bd. 43, pp. 701-713.

4. Gupta N., Dung D. Luong, Kyu Cho Magnesium Matrix Composite Foams–Density. *Mechanical Properties and Applications Metals*, 2012, vol. 2, pp. 238-252.

5. Rohatgi P.K., Kim J.K., Gupta N., Alaraj S., Daoud A. Compressive characteristics of A356 fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique. *Compos. A. Appl. Sci. Manuf.*, 2006, vol. 37, pp. 430-437.

6. Giorgia M.De, Giancane S., Nobile R., Palano F. Digital Image Correlation technique applied to mechanical characterisation of aluminium foam. *EPJ Web of Conferences* 6 – 2010, 31004, pp. 1-8, available at: [http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2010/05/epjconf\\_ICEM14\\_31004.pdf](http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2010/05/epjconf_ICEM14_31004.pdf).

7. Mancoa G.L., Dattab K., Williamc J., Momend T., Umbrelloa D., Gagliardia F. Finite Element Modelling of Orthopaedic Implants using Metal Foam. *SIMULIA Customer Conference* – 2011, pp. 1-15, available at: <http://www.simulia.com/forms/world/pdf2011/Manco.pdf>.

8. Tagliavia G., Porfiri M., Gupta N. Elastic interaction of interfacial spherical-cap cracks in hollow particle filled composites. *Int. J. Solids Struct.*, 2011, vol. 48, pp. 1141-1153.

9. Marchi C.S., Mortensen A. Deformation of Open-Cell Aluminum Foam. *Acta Mechanica*, 2001, vol. 49, pp. 3959-3969.

10. Kennedy A.R. The effect of TiH<sub>2</sub> heat treatment on gas release and foaming in Al–TiH<sub>2</sub> preforms. *Scripta Materiali*, 2002, vol. 47, pp. 763-767.

11. Luong D., Gupta N., Daoud A., Rohatgi P. High strain rate compressive characterization of aluminum alloy/fly ash cenosphere composites. *JOM*, 2011, vol. 63, pp. 53-56.

12. Koudelka P., Jiroušek O., Valach J. Determination of mechanical properties of materials with complex inner structure using microstructural models. *MTM – Machines, Technologies, Materials. International virtual*

*journal for science, technics and innovations for the industry* (3), 2011, pp. 39-42, available at: <http://mech-ing.com/journal/3-2011.html>.

13. Xinzhu Wang, Guangtao Zhou. The Static Compressive Behavior Of Aluminium Foam. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 2013, vol. 2, pp. 316-321.

14. Avdeenko A.M., Mel'nichenko A.S., Filippova V.B. Mezomekhanika deformatsii poristyykh struktur [Mesomechanics deformation of porous structures]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2003, no. 4, pp. 10-15

15. Avdeenko A.M., Krupin Iu.A. Vliyanie statisticheskikh kharakteristik raspredeleniia armiruyuschikh chastits na usloviia razrusheniya kompozitsionnogo materiala [The influence of the statistical characteristics of the distribution of reinforcing particles in terms of fracture of composite material]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii*, 2002, no. 1, pp. 97-102.

### **Об авторах**

**Авдеенко Алексей Михайлович** (Москва, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр., 4, e-mail: [aleksei-avdeenko@mail.ru](mailto:aleksei-avdeenko@mail.ru)).

**Крупин Юрий Александрович** (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, профессор, профессор кафедры металловедения и физики прочности, профессор Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр., 4, e-mail: [krupin@misis.ru](mailto:krupin@misis.ru)).

**Пименова Наталья Александровна** (Москва, Россия) – аспирант, Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр., 4, e-mail: [rhegby29@yandex.ru](mailto:rhegby29@yandex.ru)).

### **About the authors**

**Aleksei M. Avdeenko** (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Physics, National Research Technological University (4, Leninsky av., 119934, Moscow, Russian Federation, e-mail: [aleksei-avdeenko@mail.ru](mailto:aleksei-avdeenko@mail.ru)).

**Yri A. Krupin** (Moscow, Russian Federation) – PhD in Physical Sciences, Professor, Department of Physics, National Research Technological University (4, Leninsky av., 119934, Moscow, Russian Federation, e-mail: rhegby29@yandex.ru).

**Natalija A. Pimenova** (Moscow, Russian Federation) – Doctoral Student, Department of Physics, National Research Technological University (4, Leninsky av., 119934, Moscow, Russian Federation, e-mail: rhegby29@yandex.ru).

Получено 10.06.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Авдеенко А.М., Крупин Ю.А., Пименова Н.А. Ротационные моды деформации пористых структур // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 3. – С. 5–16. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.01

Please cite this article in English as:

Avdeenko A.M., Krupin Y.A., Pimenova N.A. Rotational deformation mode of porous structures. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 3. Pp. 5-16. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.01