

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИЮ ФРОНТА УПЛОТНЕНИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ*

В.В. ЧЕРНОМАС, доктор техн. наук, профессор

Н.А. БОГДАНОВА, аспирант

Г.М. СЕВАСТЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук

А.А. СОСНИН, канд. техн. наук

(ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре)

Поступила 17 марта 2014

Рецензирование 24 апреля 2014

Принята к печати 5 мая 2014

Черномас В.В. – 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Metallургов, 1,
Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН,
e-mail: mail@imim.ru

Исследовано влияние размера отверстий перфорированной пластины на параметры процесса ее осадки в закрытом штампе. Представлены кривые, характеризующие усилие деформирования и эволюцию фронта уплотнения при различных степенях деформации. Усилие возрастает с уплотнением материала и существенно зависит от скорости движения инструмента и параметров контакта заготовки со штампом. С ростом скорости деформирования увеличивается относительная толщина полностью уплотненного слоя материала. Выявлено, что геометрический размер пор при одной степени пористости не оказывает существенного влияния на характеристики распространения фронта уплотнения и энергосиловые параметры процесса деформирования.

Ключевые слова: осадка, деформация, фронт уплотнения, перфорированная пластина.

Введение

Современное развитие машиностроительных отраслей производства характеризуется широким внедрением композиционных (структурно неоднородных) материалов для изготовления деталей со специфическими теплофизическими и физико-механическими свойствами, позволяющими значительно уменьшить массу конструкции в целом [1–5]. Примером таких материалов являются пенометаллы, и в частности, пено-

алюминий [6–8]. Получение изделий из пеноалюминиевых заготовок методами пластического деформирования является одним из перспективных направлений развития теории и практики обработки материалов давлением. Энергосиловые параметры процесса деформирования и эволюция структуры таких заготовок существенно различаются в технологиях объемной штамповки и технологиях получения металлоизделий из традиционных (кристаллических) материалов. Это требует уточнения существующих и разра-

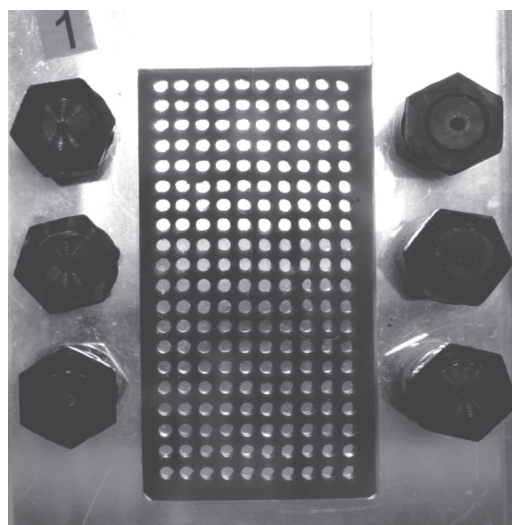
* Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН 12-I-ОЭММПУ-06 «Экспериментальное моделирование процессов, протекающих при деформации гетерогенных сред в условиях сложного нагружения» и 12-I-П25-02 «Экспериментальное и теоретическое исследование процессов, протекающих в системе «инструмент – деформируемый металл» в условиях различных контактных взаимодействий при изготовлении металлоизделий на установках непрерывного литья и деформации металла».

ботки новых моделей, описывающих формирование напряженно-деформированного состояния в системе «заготовка–инструмент деформации». Необходимость решения теоретических задач, связанных с деформированием структурно неоднородных материалов, привела к созданию в конце XX века нового раздела механики деформируемого твердого тела – механики композитов. Развитие механики композитов в СССР и России связано с именами Ю.Н. Работнова, Б.Е. Победря, Ю.М. Тарнопольского; зарубежом – Р. Кристенсена и др. [9–12]. В большинстве работ при моделировании поведения разнородного материала используется принцип эквивалентной гомогенности, при котором неоднородный материал рассматривается как некий абстрактный однородный материал с усредненными теплофизическими, реологическими и физико-механическими свойствами. При этом усреднение характеристик проводится преимущественно посредством решения краевых задач механики для представительного объема, содержащего неоднородность [13, 14]. Наряду с построением теоретических моделей процессов деформирования и разрушения неоднородных материалов проводятся и экспериментальные исследования, результаты которых служат как для верификации созданных моделей, так и для инженерных расчетов технологических параметров процессов обработки металлов давлением [15, 16]. Однако несмотря на наличие существенного числа работ по механике пористых сред, посвященных

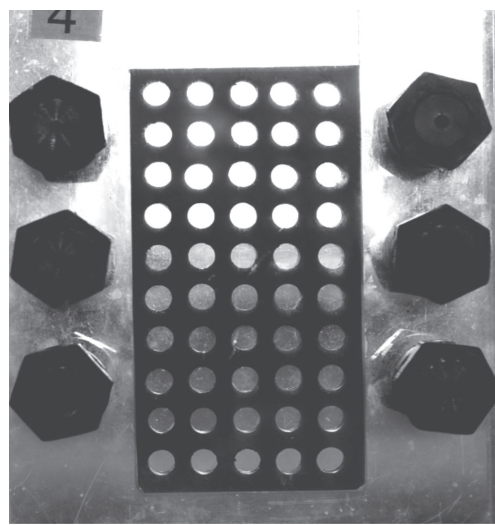
влиянию характеристик материала матрицы и объемного содержания пор (степени пористости) на энергосиловые параметры и эволюцию структуры при деформировании неоднородного материала, неизученным остается влияние геометрических характеристик пор на эти параметры. Ранее авторами статьи были предложены экспериментальный стенд и методика для определения энергосиловых параметров и эволюции структуры неоднородной пластины (с регулярной пористостью) [17]. Настоящая работа посвящена исследованию влияния геометрических размеров пор (при одной и той же степени пористости материала образцов) на параметры процесса осадки неоднородного материала в закрытом штампе.

1. Методика проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований по деформированию пористых материалов разработан стенд, включающий в себя закрытую матрицу, выполненную под прямоугольные пластины малой толщины, модельный материал – пластопарафиновые перфорированные пластины заданной степени пористости (с различными радиусами пор), инструмент деформирования (пресс) с комплексом измерительного оборудования и видеорегистрирующей аппаратуры [18]. Внешний вид штампа с двумя вариантами образцов изображен на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Внешний вид матрицы (штампа) с образцом:
а – диаметр пор 4 мм; б – диаметр пор 8 мм

В рамках данного исследования осадке подвергали образцы перфорированных пластин со степенью пористости 0,25 (эквивалентной плотностью 75 % от плотности материала матрицы – пластопарафина) толщиной 10,5 мм и размерами 140×70 мм с диаметром отверстий перфорации 4 и 8 мм. Деформирующее усилие приложено с меньшего торца. Перемещение инструмента равномерное, со скоростями в пределах от 0,5 до 5 мм/с.

2. Результаты исследований

Данные эксперименты направлены на моделирование процесса изготовления металлоизделий из пенометаллов и порошков. При характерных температурах прессования порошков (свыше 0,5 от температуры плавления металла) материал основы проявляет выраженные пластические свойства. При этом дисперсная среда в целом подвержена необратимым пластическим изменениям объема. Сам материал основы при расчетах традиционно принимается пластически несжимаемым (пластическое изменение объема происходит только за счет закрытия и перераспределения пор в объеме штамповки). Эти же свойства проявляет и выбранный для моделирования перфорированный пластопарафин, что позволяет перенести выявленные в ходе физического моделирования качественные особенности формирования и эволюции фронта уплотнения на порошковые металлы; при этом качественная картина кривой усилия деформирования также должна проявлять подобие.

Здесь и далее под фронтом уплотнения понимается нестационарная линия полного закрытия пор, ограничивающая вместе с линией контакта и жесткими границами матрицы объем материала с единичной относительной плотностью. Распространение этого фронта в формируемом изделии является одной из наиболее важных характеристик процесса прессования пенометаллов и порошковых металлов, так как создание в изготавливаемой детали полностью уплотненного поверхностного слоя определенной толщины является необходимым условием ее дальнейшей эксплуатации. Толщина этого слоя определяет величину предельно допустимой нагрузки на деталь, ее жесткость; с другой стороны, равномерность толщины этого слоя по поверхности

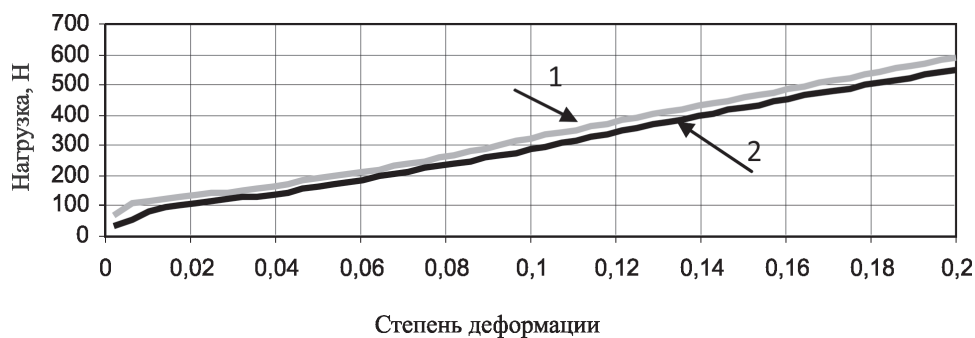
детали также сказывается на ее эксплуатационных качествах, особенно в случае быстро движущихся деталей машин и механизмов.

Процесс деформирования образцов на экспериментальном стенде фиксировался посредством видеосъемки. Результаты по эволюции фронта уплотнения получены посредством кадровой обработки видеоматериалов средствами компьютерной инженерной графики. На рис. 2 приведены кривые, характеризующие эволюцию усилия деформирования с ростом степени деформации образца при различных скоростях инструмента и характере контакта на границах «матрица – материал» (наличие или отсутствие смазки на контактных поверхностях). Данные на графиках – усредненные результаты серии экспериментов. Максимальное отклонение нагрузки – в пределах 5 % от среднего значения по серии.

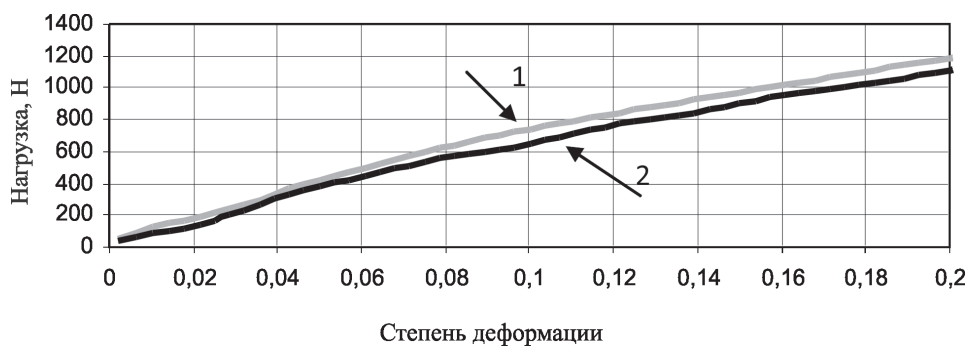
Видно, что при одной и той же степени пористости физический размер пор не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на усилие деформирования (по крайней мере, в диапазонах параметров процесса, охваченных в эксперименте). Это позволяет заключить, что с точки зрения энергосиловых характеристик деформирования дисперсная среда может быть описана всего одним параметром – относительной плотностью. Отметим, что усилие деформации независимо от наличия или отсутствия смазки на контактных поверхностях существенно зависит от скорости деформирования, что связано с проявлениями вязкостных свойств материала основы (влияние вязкости будет также существенно для цветных порошковых металлов).

3. Обсуждение результатов

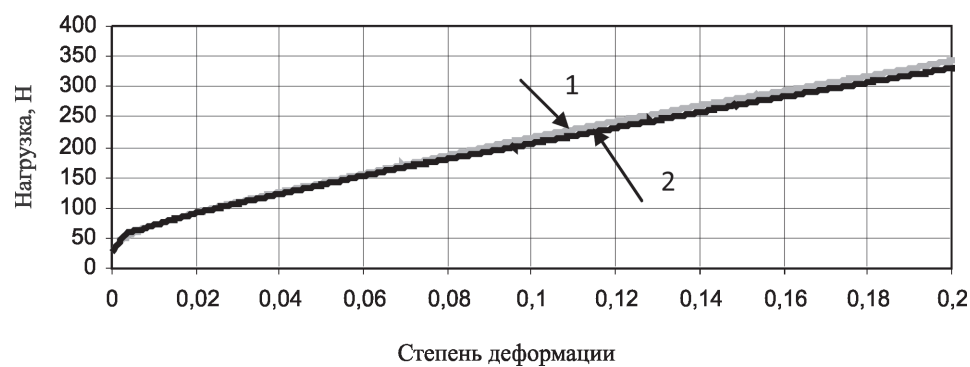
Положения кривой фронта уплотнения определяются как перемещениями пор в материале, так и величинами полуосей эллиптических пор и углами их поворотов относительно начального положения в текущий момент времени, при этом углы поворота эллипсов как раз характеризуют кривизну поверхности уплотнения. Положения фронта уплотнения (безразмерные величины, приведенные в долях текущей высоты образца), восстановленные по результатам постобработки изображений, показаны на рис. 3 для образцов, деформированных без смазки. По оси абсцисс –



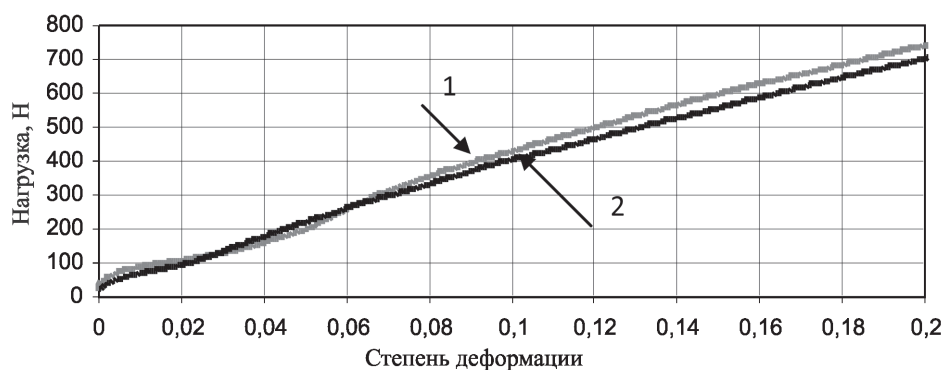
a



б



в



г

Рис. 2. Усилие деформации:

a – скорость инструмента 5 мм/с, со смазкой; *б* – скорость инструмента 5 мм/с, без смазки; *в* – скорость инструмента 0,5 мм/с, со смазкой; *г* – скорость инструмента 0,5 мм/с, без смазки; кривая 1 – диаметр пор 4 мм, кривая 2 – диаметр пор 8 мм

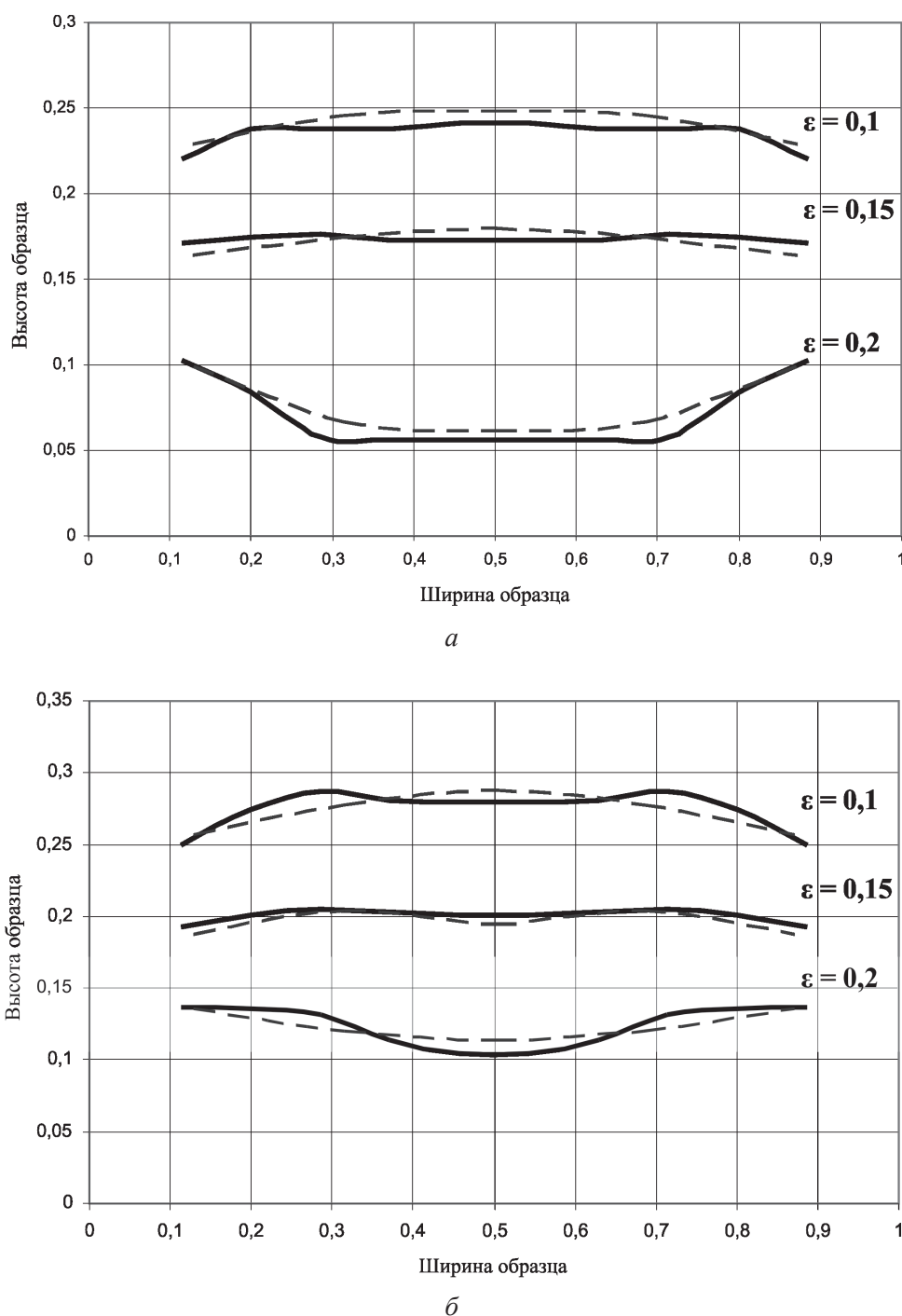


Рис. 3. Кривые фронта уплотнения на различных стадиях процесса:

a – скорость деформирования 0,5 мм/с; *б* – скорость деформирования 5 мм/с; пунктирные линии – диаметр отверстий 8 мм; сплошные линии – диаметр отверстий 4 мм; ε – степень деформации

безразмерная ширина. Отметим, что при наличии смазки окончательного закрытия пор не наблюдается при исследованных степенях деформации.

Физический размер пор не оказывает заметного влияния на скорость распространения и форму фронта уплотнения. Отметим, что с увеличением скорости деформирования увеличивается относительная скорость распространения

фронта уплотнения в материале. То есть для создания большей толщины полностью уплотненного слоя под инструментом деформации следует повышать скорость перемещения инструмента.

Интересно отметить, что кривая фронта уплотнения в процессе деформирования меняет знак вогнутости – при малых степенях деформации фронт уплотнения глубже проникает в

материал образца у краев (вблизи зоны контакта со стенками матрицы), далее при некотором пороговом значении степени деформации кривая фактически переходит в прямую линию и в дальнейшем фронт уплотнения выгнут вниз (см. рис. 3). Это наблюдение может объясняться перестройкой механизма трения на контактных поверхностях. В начале процесса нормальная к стенке матрицы нагрузка достаточно мала и реализуется трение типа Кулона–Амонтона, которое с ростом нагрузки переходит в трение Прандтля, когда сила трения достигает предела текучести материала на сдвиг.

Выводы

Результаты натурных экспериментов показали, что в достаточно широком диапазоне физический размер включений не оказывает существенного влияния ни на силовые параметры прессования дисперсных материалов, ни на характеристики распространения фронта уплотнения (скорость, форма кривой), что, вообще говоря, не являлось очевидным до испытаний. Таким образом, полученные в [18] авторами настоящей работы аппроксимации параметров деформированного состояния пористой среды при динамическом нагружении не нуждаются в обобщении на различные геометрические характеристики пористости за исключением одного безразмерного параметра – относительной плотности дисперсного материала.

Список литературы

1. Shiomi M., Imagama S., Osakada K., Matsumoto R. Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming // *Journal of Materials Processing Technology*, 210:9 (2010), 1203–1208.
2. Banhart J. Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foams // *Progress in materials Science* 46:6 (2001), 559–632.
3. Neugebauer R., Hipke T. Machine tools with metal foams // *Advanced Engineering Materials*, 8:9 (2006), 858–863.
4. Stoebener K., Rausch G. Aluminium foam-polymer composites: processing and characteristics // *Journal of Material Science*, 44:6 (2009), 1506–1511.
5. Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., Kitahara A. ALPORAS Aluminium Foam: Production Process, Properties and Application // *Advanced Engineering Materials*, 2:4 (2000), 179–183.

6. Старовойтенко Е.И. Пеноалюминиевые гранулы – перспективы производства и промышленного применения нового пористого материала // *Технология легких сплавов*. – 2006. – № 1–2. – С. 218–221.

7. Арбузова Л.А., Старовойтенко Е.И., Трубкина Е.М. и др. Способ получения пористых полуфабрикатов из порошков алюминиевых сплавов. Патент на изобретение RUS 2138367, опубл. 27.07.1998.

8. Арбузова Л.А., Старовойтенко Е.И., Полькин И.С. и др. Способ получения пористых изделий из порошков алюминиевых сплавов. Патент на изобретение RUS 2139774, опубл. 18.11.1998.

9. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 336 с.

10. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: МГУ, 1984. – 336 с.

11. Тарнопольский Ю.М. Прикладная механика композитов. – М.: Мир, 1989. – 358 с.

12. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. – М.: Наука, 1987. – 80 с.

13. Краснощеков П.И., Федотов А.Ф. Упругие модули изотропных порошковых и пористых материалов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки»*. – 2006. – Т. 43. – С. 81–87.

14. Александров С.Е., Дружанов Б.А. Прессование уплотняемого пластического материала в закрытой матрице // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1990. – № 1. – С. 117–123.

15. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Максименко А.Е., Лысюк М.В. Исследование уплотнения при деформации пористых материалов // *Известия ТулГУ. Серия «Технические науки»*. – 2011. – Т. 3. № 1. – С. 440–448.

16. Власов А.В., Субич В.Н., Шестаков Н.А. Моделирование механических свойств пористых и композитных материалов // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2010. – № 3. – С. 31–35.

17. Черномас В.В., Ловизин Н.С., Богданова Н.А. Устройство для исследования плоской деформации модели пористого вещества. Положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение по заявке № 2012149651/28(079590) от 21.11.2012 г.

18. Богданова Н.А., Черномас В.В., Соснин А.А. Моделирование процесса деформации при осадке неоднородного материала в закрытом штампе // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 3. – С. 9–18.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 31–38

The influence of the geometrical factor on the force parameters of deformation and evolutions of the compression front of porous materials**Chernomas V.V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mail@imim.ru**Bogdanova N.A.**, Post-graduate Student,**Sevastyanov G.M.**, Ph.D. (Physics and Mathematics)**Sosnin A.A.**, Ph.D. (Engineering)

Institute of Machinery and Metallurgy, Russian Academy of Sciences (Far Eastern Branch), 1 Metallurgov st., Komsomolsk-on-Amur, 681005, Russian Federation

Abstract

The influence of geometric size of the holes of the perforated plate on the parameters of the process of its compression in an enclosed stamp is researched. The curves, characterizing the deforming force and the evolution of the compression front at different degrees of deformation are shown. Force increases as the compaction of material and essentially depends on the speed of the tool motion speed and parameters of contact between workpiece and instrument. The relative thickness of fully densified layer material increases with increasing of the strain rate. It was revealed that the geometric size of the pores with the same degree of porosity has no significant effect on the characteristics of the compression front propagation and force parameters of the deformation process.

Keywords:

compression, deformation, compression front, perforated plate.

References

1. Shiomi M., Imagama S., Osakada K., Matsumoto R. Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, Vol. 210, Issue 9, pp. 1203-1208.
2. Banhart J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 2001, Vol. 46, Issue 6, pp. 559–632.
3. Neugebauer R., Hipke T. Machine tools with metal foams. *Advanced Engineering Materials*, 2006, Vol. 8, Issue 9, pp. 858–863, doi: 10.1002/adem.200600095.
4. Stoebener, K., Rausch, G. Aluminium foam-polymer composites: processing and characteristics. *Journal of Material Science*, 2009, Vol. 44, Issue 6 pp. 1506–1511. doi: 10.1007/s10853-008-2786-8.
5. Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., Kitahara A. ALPORAS Aluminium Foam: Production Process, Properties and Application. *Advanced Engineering Materials*, 2000, Vol. 2, Issue 4, pp. 179–183, doi: 10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2:4<179::AID-ADEM179>3.0.CO;2-G.
6. Starovoitenko E.I. Penoaluminievye granuly – perspektivy proizvodstva i promyshlennogo primeneniia novogo poristogo materiala [Aluminum foam pellets – prospects of production and industrial application of new porous material.]. *Tekhnologiya legkikh splavov – Technology of light alloys*, 2006, no. 1–2, pp. 218–221.
7. Arbuzova L.A., Bondarev B.I., Rozhkov A.A., Shmakov Yu.V., Lashkov N.I., Talalaev V.D. *Sposob polucheniia poristykh polufabrikatov iz poroshkov aluminievyykh splavov* [A method of producing porous semi-finished aluminum alloy powder]. Patent RF, no. 2138367, 1998.
8. Arbuzova L.A., Starovoitenko E.I., Pol'kin I.S., Andreev D.A., Talalaev V.D., Ginzul A.V. *Sposob polucheniia poristykh izdelii iz poroshkov aluminievyykh splavov* [A method for producing porous articles from powders of aluminum alloys]. Patent RF, no. 2139774, 1998.
9. Christensen R.M. *Mechanics of Composite Materials*. Wiley-Interscience, New York, 1979, 348 p. (Russ. ed.: Trans. eng. Beil A.I., Zhmud' N.P. Edited by Tarnopol'skii Yu.M. *Vvedenie v mekhaniku kompozitov*. Moscow, Mir Publ, 1982. 336 p.).
10. Pobedria B.E. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials]. Moscow, MSU, 1984. 336 p.

11. Tarnopol'skii Yu.M. *Prikladnaia mekhanika kompozitov* [Applied Mechanics of Composites]. Moscow, Mir Publ., 1989. 358 p.
12. Rabotnov Yu.N. *Vvedenie v mekhaniku razrusheniia* [Introduction to fracture mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 80 p.
13. Krasnoshchekov P.I., Fedotov A.F. Uprugie moduli izotropnykh poroshkovykh i poristyykh materialov [The elastic moduli of isotropic porous materials and powder]. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki – Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2006, Vol. 43, pp. 81–87.
14. Aleksandrov S.E., Druyanov B.A. Pressovanie uplotniaemogo plasticheskogo materiala v zakrytoi matritse [Pressing of a compact plastic material]. *Zhurnal Prikladnoi Mekhaniki i Tekhnicheskoi Fiziki – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1990, no. 1, pp. 117–123.
15. Shestakov N.A., Subich V.N., Maksimenko A.E., Lysyk M.V. Issledovanie uplotneniia pri deformatsii poristyykh materialov [Consolidation research at deformation of porous materials]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Tula State University. Technical Sciences*, 2011, Vol. 3, no.1, pp. 440–448.
16. Vlasov A.V., Soubich V.N., Shestakov N.A. Modelirovanie mekhanicheskikh svoystv poristyykh i kompozitnykh materialov [Modelling of mechanical properties of porous and composite materials]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii - Blanking productions in mechanical engineering*, 2010, no. 3, pp. 31–35.
17. Chernomas V.V., Lovizin N.S., Bogdanova N.A. *Ustroistvo dlia issledovaniia ploskoi deformatsii modeli poristogo veshchestva* [An apparatus for the study of plane strain model of porous material]. Patent RF, no. 2012149651/28(079590), 2012.
18. Bogdanova N.A., Chernomas V.V., Sosnin A.A. Modelirovanie protsessa deformatsii pri osadke neodnorodnogo materiala v zakrytom shtampe [Simulation of heterogeneous material deformation process during shortening in the closed die]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 3, pp. 9–18.

Funding

This work was supported by grants FEBRAS No. 12-I-06-OEMMPU "Experimental modeling of processes occurring during the deformation heterogeneous mediums under complex loading" and No. 12-I-A25-02 "Experimental and theoretical study of the processes occurring in the "Tools – Deformable metal" in a different contact interactions in the manufacture of metal in a continuous casting and deformation of the metal."

Received 17 March 2014

Revised 24 April 2014

Accepted 5 May 2014