Применение теста Тейлора для исследования динамических механических свойств высокопористого алюминиевого сплава

09, сентябрь 2012

DOI: 10.7463/0912.0442058

Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Пусев В.И., Овчинников А.Ф.,
Селиванов В.В., Сотский М.Ю.

УДК 620.171.313;620.178.7;539.4.019.1

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

belovg@yandex.ru

mva_2805@mail.ru

sm4-2009@mail.ru

vicsel@list.ru

msotsky.bmstu@mail.ru

Введение

Известно [1], что тест (цилиндр) Тейлора является одним из экспериментально-расчетных методов [2, 3] по исследованию динамических механических свойств материалов. Основанный на ударе цилиндрического образца о жесткую стенку, он занимает важное место в исследовании высокоскоростного деформирования материалов, а также используется для тестирования новых численных методов, разрабатываемых для решения соответствующих задач [4-10]. В настоящее время тест Тейлора стали применять для исследования динамических свойств пористых материалов полученных методами порошковой металлургии, таких как пористая бронза, содержащая 10 % титана, и пористое железо [11, 12].

Следует отметить, что при экспериментальных исследованиях механических свойств высокопористых металлов могут применяться объемно-перфорированные образцы (рисунок 1а [13]), а результаты исследований используются для тестирования

численных конечно-элементных методов (рисунок 1б [14]). Под высокопористыми металлами в соответствии с [15] понимаются пористые металлы с начальной пористостью α_0 (отношение плотности матрицы или сплошного металла к средней плотности пористого металла) от 1,2 до 8,0.

Целью данной работы является исследование динамических механических свойств высокопористого объемно-перфорированного алюминиевого сплава на основе Д16Т с применением теста Тейлора, как в экспериментальных исследованиях, так и в численном моделировании.

Рисунок 1 – Экспериментальные образцы (а)) и конечно-элементная модель высокопористого металла, полученного перфорированием (б))

1. Экспериментальные исследования

В данной работе используется объемно-перфорированный образец на основе алюминиевого сплава Д16Т, полученный сверлением заготовки в форме параллелепипеда в ортогональных направлениях – ортогонально-перфорированные образцы (рисунок 2 [15, 16]).

Рисунок 2 – Схема (а)) и поперечное сечение (б)) объемно-перфорированного образца для испытаний в тесте Тейлора

В связи с тем, что ортогонально-перфорированные образцы вырезались из различных частей заготовки в форме параллелепипеда, их внешний вид мог несколько отличаться (рисунок 3).

Рисунок 3 – Внешний вид объемно-перфорированных образцов из алюминиевого сплава Д16Т, вырезанных из различных частей заготовки в форме параллелепипеда (а) - г))

Испытания высокопористых объемно-перфорированных образцов из Д16Т на удар о жесткую стенку проводились на образцах с отношением длины к диаметру 2,5 при скоростях удара до 150 м/с. Использование высокоскоростной оптической съемки позволило получить кинограммы замедления и деформирования этих образцов (рисунок 4, где обозначено: V_0 – скорость удара; α_0 – начальная пористость образца).

Рисунок 4 – Кинограмма испытания ортогонально-перфорированного образца на удар о жесткую стенку ($V_0=95$ м/с; $\alpha_0=2,86$): а) – полет со скоростью 95 м/с; (б) – г)) – замедление и деформирование

2. Численное моделирование сжатия и уплотнения объемно-перфорированных образцов

Путем численного моделирования с применением пакетов прикладных программ LS-DYNA и ANSYS AUTODYN решались следующие задачи:

- определение квазистатических и динамических характеристик деформирования объемно-перфорированных образцов в условиях одноосного напряженного состояния;

- моделирование теста Тейлора для объемно-перфорированных образцов при прямом геометрическом способе задания пористости;
- моделирование теста Тейлора для образцов с гомогенной моделью физико-механического поведения, построенной по данным одноосного сжатия.

Пористость для моделей образцов рассчитывалась на основании геометрии одной элементарной ячейки. При вырезании цилиндрического образца из ортогонально-перфорированного массива результирующая пористость может несколько отличаться от пористости, рассчитанной по одной ячейке, а также варьироваться в зависимости от расположения отверстий в цилиндре. Максимальная погрешность в определении пористости могла достигать 5 %. В экспериментальных исследованиях пористость образцов определялась путем взвешивания. В расчетах, в соответствии с [17], плотность матричного алюминиевого сплава Д16Т задавалась равной 2780 кг/м^3 . Расчетные модели образцов при прямом моделировании пористости представлены на рисунке 5, где обозначено: d – диаметр отверстий; z – расстояние между центрами отверстий; α_0 – начальная пористость образца.

Рисунок 5 – Расчетные модели объемно-перфорированных образцов при прямом моделировании пористости для тестов Тэйлора: а) $d=2,0 \text{ мм}$, $z=4,1 \text{ мм}$, $\alpha_0=2,16$;

б) $d=2,0 \text{ мм}$, $z=4,3 \text{ мм}$, $\alpha_0=2,59$; в) $d=2,0 \text{ мм}$, $z=4,8 \text{ мм}$, $\alpha_0=3,77$;

г) $d=2,0 \text{ мм}$, $z=5,2 \text{ мм}$, $\alpha_0=4,83$

Определение расчетных диаграмм деформирования в условиях одноосного напряженного состояния осуществлялось при сжатии образцов, опирающихся на жесткую поверхность, жестким штампом, движущимся с постоянной скоростью. В процессе деформирования вычислялась контактная сила F между штампом и образцом, а также радиальное расширение образцов в зависимости от перемещения жесткого штампа.

Линейная деформация e_x при этом вычислялась через изменение длины $e_x = \frac{l - l_0}{l_0}$,

где l и l_0 – текущая и начальная длина образца. Объемная деформация

$e_v = e_x \frac{S - S_0}{S_0}$ определяется с учетом изменения площади поперечного сечения S .

Влияние динамических эффектов может быть оценено по усредненной скорости

деформации $\dot{\varepsilon}_0 = \frac{v_x}{l_0}$, где v_x – скорость движения жесткого штампа. В расчетных

моделях, для ускорения счета при явной схеме интегрирования, квазистатическое деформирование рассчитывалось при $\dot{\varepsilon}_0 \approx 50 \text{ с}^{-1}$ и исключении эффектов скорости деформации в модели пластичности Джонсона-Кука, которая использовалась для матричного алюминиевого сплава Д16Т. Динамическое деформирование рассчитывалось при условии усредненной скорости деформации $\sim 2000 \text{ с}^{-1}$. В качестве примера на рисунке 6 представлены расчетные квазистатическая, динамическая и статическая экспериментальная диаграммы сжатия объемно-перфорированного образца в координатах: напряжение (F/S_0), линейная деформация (e_x).

Рисунок 6 – Сравнение удельной силы сжатия в зависимости от линейной деформации в расчете и эксперименте для ортогонально-перфорированного образца с параметрами $d = 2,0$ мм, $z = 4,3$ мм

Предлагаемая модель физических соотношений для пористого материала для условий динамического деформирования, являясь достаточно простой, строилась как модель упругопластической среды с пределом текучести, зависящим от объемной деформации $\sigma_y = \sigma_y(e_v)$, и баротропной зависимостью давления от объемной деформации $p = p(e_v)$ с эффектами необратимого уплотнения на участке компактирования [18].

Опорные зависимости вычислялись непосредственно из идеализированных диаграмм сжатия образцов в координатах: осевое напряжение $\sigma_x = \frac{F}{S}$, объемная деформация e_v (рисунок 7), полученных для определенного диапазона скоростей деформаций. В предположении, что в процессе деформирования напряженно-деформированное состояние пористого материала остается одноосным, осевое напряжение будет являться пределом текучести: $\sigma_y = \sigma_x(e_v)$, а гидростатическое

давление можно вычислить как $p = \frac{1}{3} \sigma_x(e_v)$. В зоне, близкой к состоянию полностью уплотненного материала, предел текучести ограничивался достигнутой величиной, а гидростатическое давление, рассчитывалось по характеристикам сжимаемости матричного материала. В модели возможно введение ограничения отрицательных напряжений, однако их определение требует дополнительных исследований.

Рисунок 7 – Расчетные и идеализированные диаграммы динамического деформирования объемно-перфорированных образцов при $\dot{\epsilon}_0 \approx 2000 \text{ с}^{-1}$ (α - начальная пористость образцов)

3. Численное моделирование замедления и деформирования объемно-перфорированных образцов в тесте Тейлора

Сравнительный анализ результатов теста Тейлора для моделей с прямым введением пористости на уровне геометрии и эквивалентной гомогенной моделью, построенной по диаграммам динамического сжатия, показали достаточно хорошее совпадение по критерию остаточной длины стержней при скоростях соударения до 250 м/с (рисунки 8, 9). Для гомогенной модели отмечается чрезмерное увеличение диаметра стержня в зоне контакта со стенкой, свидетельствующее о том, что в областях, близких к образующей цилиндра, деформирование материала происходит преимущественно по сдвиговому механизму, тогда как в моделях с прямым моделированием пористости преобладают объемные деформации. Этот эффект можно объяснить несовершенством принятой модели пластичности и связанными с этим погрешностями в вычислении дилатансии.

Рисунок 8 – Остаточные деформации стержней для расчетных моделей прямого моделирования пористости и эквивалентной гомогенной модели (градиентные поля соответствуют изменению пористости для каждого типа образца)

Рисунок 9 – Остаточная относительная длина стержней в зависимости от скорости соударения

Заклучение

Сравнение расчетов с экспериментальными данными по относительной остаточной длине стержня, в целом, показывает достаточно хорошее качественное соответствие во всем диапазоне пористости. Для начальной пористости, близкой к 3,8 и 4,9, наблюдается удовлетворительное количественное соответствие. Бóльшие количественные различия для меньших значений пористости в расчетах и экспериментах можно объяснить неточностями в принятой расчетной диаграмме деформационного упрочнения материала, а также возможным проявлением масштабного эффекта, связанного с тем, что в расчетах и экспериментах модели с одинаковой пористостью могли иметь место разные конструктивные исполнения по диаметру и шагу перфорации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-01222а).

Литература

1. Николас Т. Поведение материалов при высоких скоростях деформации // Динамика удара / пер. с англ. под ред. С.С. Григоряна. М.: Мир. 1985. С. 198-256.
2. Taylor G.I. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress. I. Theoretical considerations // Proc. R. Soc. Lond. 1948. V. A194. N 1038. P. 289-299.
3. Whiffin A.C. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress. II. Tests on various metallic materials // Proc. R. Soc. Lond. 1948. Vol. A194. N 1038. P. 300-322.
4. Уилкинс М.Л., Гуинан М.У. Удар цилиндра по жесткой стенке // Механика (сб. перев.) 1973. №3. С. 112-128.
5. Богомолов А.Н., Горельский В.А., Зелепугин С.А., Хореев И.Е. Поведение тел вращения при динамическом контакте с жесткой стенкой // Прикладная механика и техническая физика. 1986. №1. С. 161-163.
6. Баландин В.В., Брагов А.М., Подгорнова Т.Д., Садырин А.И. Анализ процесса деформирования стержня при соударении его с жесткой преградой // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюзн. межвуз. сб. Горький: ГГУ. 1987. Вып. 36. С. 100-109.
7. Woodward R.L., Burman N.M., Bexter B.J. An experimental and analytical study of the Taylor impact test // Int. J. Imp. Engng. 1994. Vol.15. N 4. P. 407-416.
8. Grantham S.G., Braithwaite C.H., Proud W.G., Williamson D.M. Displacement maps in Taylor impact using speckle radiography // Shoc Compressive of Condensed Matter / Ed. By M.D. Furrish et al. American Inst. of Phys. 2006. P. 1333-1336.
9. Eakis D., Thadhani N.N. Analysis of dynamic mechanical behavior of reverse Taylor anvil-on-rod impact tests // Int. J. Imp. Engng. 2007. Vol. 34. № 11. P. 1821-1834.
10. Xiao X., Zhang W., Wei G., Mu Z. Effect of projectile hardness on deformation and fracture behavior in the Taylor impact test // Mat. And. Des. 2010. Vol.31. N 10. P. 4913-4920.
11. Lu G., Wang B., Zhang T. Taylor impact test for ductile porous materials – Part 1: theory // Int. J. Imp. Engng. 2001. Vol. 25. N 10. P. 981-991.
12. Wang B., Zhang T., Lu G. Taylor impact test for ductile porous materials – Part 2: experiments // Int. J. Imp. Engng. 2003. Vol. 28. N 5. P. 499-511.
13. Öchner A., Kuhn G., Gracio J. Investigation of cellular solids under biaxial stress states // Exp. Mech. 2005. Vol. 45. N 4. P. 325-330.

14. Fiedler T., Öchner A., Gracio J., Kuhn G. Structural modeling of the mechanical behavior of periodic cellular solids: open-cell structures // Mech. of Compos. Mat. 2005. Vol. 41. N 3. P. 277-290.
15. Экспериментальная оценка определяющих уравнений высокопористых металлов / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов // Материалы XIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярополец, 18-22 февраля 2008 г. Т.2. М: Изд. МАИ, 2008. С. 72-83.
16. Об исследовании динамических механических свойств высокопористого алюминиевого сплава / Г.В. Белов, А.П. Гусаров, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов // Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Ярополец, 14-18 февраля 2011 г.). Т. 2. М.: ООО «ТР-принт». 2011. С. 82-87.
17. Промышленные алюминиевые сплавы / Под ред. Ф.И. Квасова, И.Н. Фридляндера. М.: Металлургия. 1984. 528 с.
18. Исследование пластического деформирования и уплотнения пористого алюминиевого сплава / Г.В. Белов, В.А. Марков, Л.П. Орленко, В.И. Пусев, В.В. Селиванов // Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Ярополец, 14-18 февраля 2011 г.). Т. 2. М.: ООО «ТР-принт». 2011. С. 87-93.

Application of Taylor test for analysis of dynamic mechanical properties of a highly porous aluminum alloy

09, September 2012

DOI: 10.7463/0912.0442058

Belov G.V., Gusarov A.P., Markov V.A., Pusev V.A., Ovchinnikov A.F.,
Selivanov V.V., Sotskii M.Yu.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

belovg@yandex.ru

mva_2805@mail.ru

sm4-2009@mail.ru

vicse@list.ru

msotsky.bmstu@mail.ru

Application of the Taylor test (cylinder) allowed to obtain experimental data on dynamic behavior of volume-perforated samples of the aluminum alloy D16T at an impact velocity against a hard wall of up to 150 m/s. To calculate the impact, software packages LS-DYNA and ANSYS AUTODIN in two versions were used. The first variant included direct modeling of the structure of volume-perforated samples by the finite element method, and the second variant included using constitutive equations of porous elastoplastic medium based on a homogeneous model. For the second calculation variant the authors applied both experimental data in the form of a deformation curve obtained for uniaxial stress state and calculation data based on numerical simulation of deformation and compression of volume-perforated samples. The authors received a good qualitative agreement between the calculated and experimental data in the Taylor test, as well as a satisfactory quantitative agreement between the calculated and experimental results.

Publications with keywords: [Taylor test](#), [dynamic material properties](#), [highly porous aluminium alloy](#)

Publications with words: [Taylor test](#), [dynamic material properties](#), [highly porous aluminium alloy](#)

References

1. Zukas J.A., Nicholas T., Swift H.F., Greszczuk L.B., Curran D.R. *Impact dynamic*. New York, John Wiley & Sons. New York, 1982. (Russ. ed.: Nikolas T. Povedenie materialov pri vysokikh skorostiakh deformatsii. In: *Dinamika udara*. Moscow, Mir, 1985, pp. 198-256.).
2. Taylor G.I. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress. I. Theoretical considerations. *Proc. R. Soc. Lond.*, 1948, vol. A194, no. 1038, pp. 289-299.

3. Whiffin A.C. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress. II. Tests on various metallic materials. *Proc. R. Soc. Lond.*, 1948, vol. A194, no. 1038, pp. 300-322.
4. Wilkins M.L., Guinan M.W. Impact of cylinders on a rigid boundary. *J. Appl. Phys.*, 1973, vol. 44, pp. 1200-1206. (Russ. ed.: Uilkins M.L., Guinan M.U. Udar tsilindra po zhestkoi stenke. *Mekhanika (sb. perev.)* [Mechanics (collection of translations)]. 1973, no. 3, pp. 112-128.).
5. Bogomolov A.N., Gorel'skii V.A., Zelepugin S.A., Khoreev I.E. Povedenie tel vrashcheniia pri dinamicheskom kontakte s zhestkoi stenкой [The behavior of bodies of rotation in the dynamic contact with a rigid wall]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], 1986, no. 1, pp.161-163.
6. Balandin V.V., Bragov A.M., Podgornova T.D., Sadyrin A.I. Analiz protsessa deformirovaniia sterzhnia pri soudarenii ego s zhestkoi pregradoi [The analysis of process of deformation of the rod while striking him with a rigid obstacle]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Vsesoiuzn. mezhvuz. sb.* [Applied problems of strength and plasticity. All-Union Interuniversity Collection]. Gor'kii, GGU Publ., 1987, Iss. 36, pp. 100-109.
7. Woodward R.L., Burman N.M., Bexter B.J. An experimental and analytical study of the Taylor impact test. *Int. J. Imp. Engng.*, 1994, vol.15, no. 4, pp. 407-416.
8. Grantham S.G., Braithwaite C.H., Proud W.G., Williamson D.M. Displacement maps in Taylor impact using speckle radiography. In: Furrish M.D., et al., Eds. *Shoc Compressive of Condensed Matter*. American Inst. of Phys., 2006, pp. 1333-1336.
9. Eakis D., Thadhani N.N. Analysis of dynamic mechanical behavior of reverse Taylor anvil-on-rod impact tests. *Int. J. Imp. Engng.*, 2007, vol. 34, no. 11, pp. 1821-1834.
10. Xiao X., Zhang W., Wei G., Mu Z. Effect of projectile hardness on deformation and fracture behavior in the Taylor impact test. *Mat. And. Des.*, 2010, vol.31, no. 10, pp. 4913-4920.
11. Lu G., Wang B., Zhang T. Taylor impact test for ductile porous materials. Part 1: Theory. *Int. J. Imp. Engng.*, 2001, vol. 25, no. 10, pp. 981-991.
12. Wang B., Zhang T., Lu G. Taylor impact test for ductile porous materials. Part 2: Experiments. *Int. J. Imp. Engng.*, 2003, vol. 28, no. 5, pp. 499-511.
13. Öchner A., Kuhn G., Gracio J. Investigation of cellular solids under biaxial stress states. *Exp. Mech.*, 2005, vol. 45, no. 4, pp. 325-330.
14. Fiedler T., Öchner A., Gracio J., Kuhn G. Structural modeling of the mechanical behavior of periodic cellular solids: open-cell structures. *Mech. of Compos. Mat.*, 2005, vol. 41, no. 3, pp. 277-290.
15. Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V. Eksperimental'naia otsenka opredeliushchikh uravnenii vysokoporistykh metallov [Experimental assessment of the determining equations of highly porous metals]. *Materialy 14 Mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktitsii i sploshnykh sred» im. A.G. Gorshkova* [Proc. of 14 International Symposium "Dynamic and technological problems of mechanics of constructions and continuous media"]

them. A.G. Gorshkov]. Iaropolets, 18-22 February 2008. Moscow, MAI Publ., 2008, vol. 2, pp. 72-83.

16. Belov G.V., Gusarov A.P., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V. Ob issledovanii dinamicheskikh mekhanicheskikh svoistv vysokoporistogo aliuminieвого сплава [About the study of dynamic mechanical properties of highly porous aluminum alloy]. *Materialy 17 Mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktssii i sploshnykh sred» im. A.G. Gorshkova* [Proc. of 17 International Symposium “Dynamic and technological problems of mechanics of constructions and continuous media” them. A.G. Gorshkov]. Iaropolets, 14-18 February 2011. Moscow, ООО «TR- Print», 2011, vol. 2, pp. 82-87.

17. Kvasov F.I., Fridliandera I.N., Eds. *Promyshlennyye aliuminievye splavy* [Industrial aluminium alloys]. Moscow, Metallurgiya, 1984. 528 p.

18. Belov G.V., Markov V.A., Orlenko L.P., Pusev V.I., Selivanov V.V. Issledovanie plasticheskogo deformirovaniia i uplotneniia poristogo aliuminieвого сплава [Study of plastic deformation and sealing of porous aluminum alloy]. *Materialy 17 Mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktssii i sploshnykh sred» im. A.G. Gorshkova* [Proc. of 17 International Symposium “Dynamic and technological problems of mechanics of constructions and continuous media” them. A.G. Gorshkov]. Iaropolets, 14-18 February 2011. Moscow, ООО «TR- Print», 2011, vol. 2, pp. 87-93.