

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

DYNAMIC STRENGTH OF MATERIALS AND STRUCTURES

ВОПРОСЫ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПОРИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

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

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В настоящей работе представлены результаты расчетно-экспериментальных работ по определению обобщенных физико-механических характеристик высокопористых алюминиевых сплавов периодической структуры. В соответствии с [1], к высокопористым можно отнести материалы, имеющие начальную пористость α_0 , лежащую в пределах от 1,2 до 8. Начальная пористость $\alpha_0 = \rho_s / \rho_0$ определяется отношением плотности материала матрицы ρ_s к средней плотности образца ρ_0 . Ввиду того, что пористые структуры, зачастую являющиеся частью сложных технических устройств, при прямом описании пористости представляют собой чрезвычайно трудоемкую задачу для исследования, представляется важным создание гомогенной эквивалентной модели на основе информации о геометрической структуре и механических свойствах матричного материала.

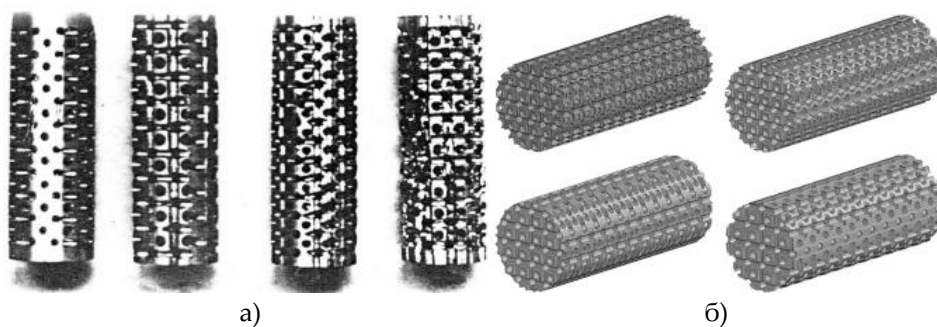


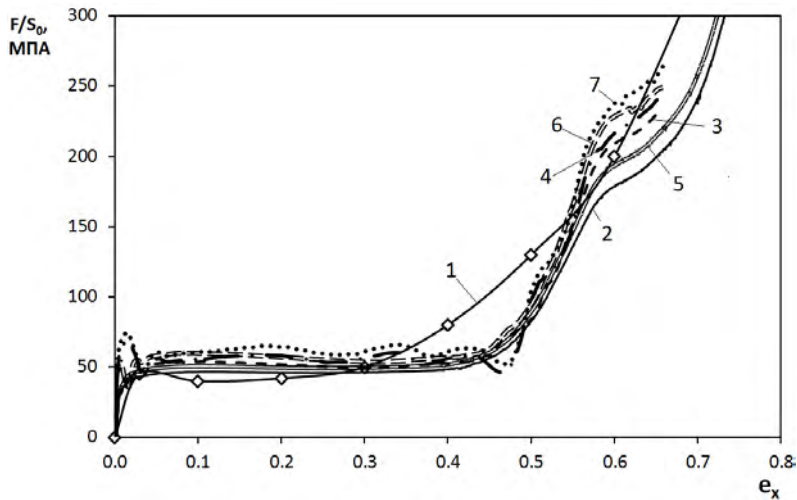
Рисунок 1. Внешний вид натуральных образцов а) и расчетных конечно элементных моделей при прямом моделировании пористости б)

Наиболее простой конфигурацией пористой среды регулярной структуры с точки зрения технологии изготовления являются ортогонально-перфорированные образцы, полученные методом сверления (рис. 1а). В работе использовались результаты натуральных испытаний цилиндрических образцов из алюминиевого сплава Д16Т. Результаты экспериментов по статическому одноосному сжатию цилиндрических образцов, а также динамические испытания по методу теста Тейлора, использовались для верификации гомогенной модели, построенной непосредственно по результатам численных экспериментов с конечно-элементными моделями при прямом моделировании пористости (рис. 1б).

В качестве основной опорной зависимости для описания физико-механических характеристик были использованы диаграммы одноосного сжатия цилиндрических образцов в виде удельная сила сопротивления – линейная деформация, представленные на рис. 2. В натуральных экспериментах образцы подвергались сжатию в статических условиях, а для расчетных моделей предлагалась схема сжатия, обеспечивающая постоянную среднюю скорость деформации на всем протяжении процесса деформирования. Для задания постоянной скорости деформации $\dot{\epsilon}_1$ образца с начальной длиной L_0 необходимо обеспечивать закон перемещения одной из его границ $u(t)$, согласно формуле:

$$u(t) = L_0 \dot{\epsilon}_1 e^{-L_0 \dot{\epsilon}_1 t}$$

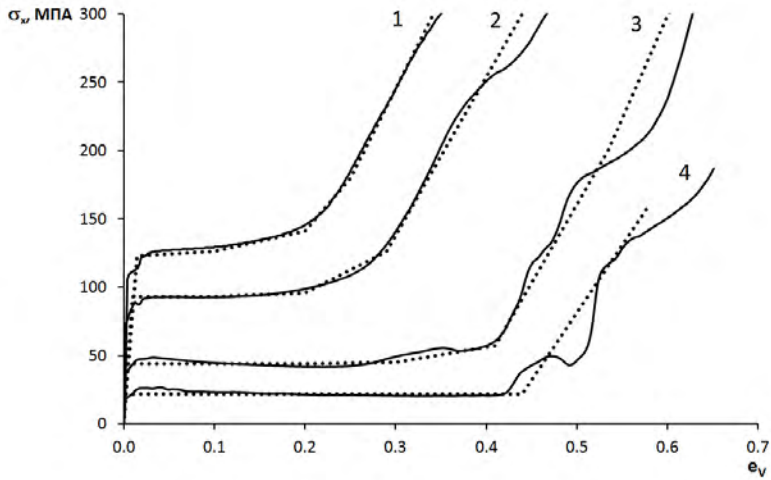
В данной работе диапазон средних скоростей деформации образцов составлял от 100 до 10000 c^{-1} .



1 – эксперимент; расчет, матричный материал без учета эффектов скоростей деформации:
2 - $\dot{\epsilon}_1=500 \text{ c}^{-1}$, 3 - $\dot{\epsilon}_1=5000 \text{ c}^{-1}$, 4 - $\dot{\epsilon}_1=10000 \text{ c}^{-1}$; расчет, матричный материал с учетом эффектов скоростей деформации: 5 - $\dot{\epsilon}_1=500 \text{ c}^{-1}$, 6 - $\dot{\epsilon}_1=5000 \text{ c}^{-1}$, 7 - $\dot{\epsilon}_1=10000 \text{ c}^{-1}$

Рисунок 2. Экспериментальные и расчетные (при прямом моделировании пористости) диаграммы сжатия объемно-перфорированного образца с начальной пористостью $\alpha_0 = 3.77$

При обработке исходных данных в виде зависимостей удельной силы сопротивления F/S_0 от линейной деформации ϵ_x , а также закона изменения площади поперечного сечения S в процессе деформации в боковом направлении, вводилась объемная деформация образца $\epsilon_v = \epsilon_x \frac{S-S_0}{S_0}$ и истинное напряжение в осевом направлении, с учетом увеличения площади поперечного сечения: $\sigma_x = \frac{F}{S}$. Расчетные диаграммы деформирования $\sigma_x = \sigma_x(\epsilon_v)$ объемно-перфорированных образцов с различной начальной пористостью при прямом моделировании гетерогенной структуры, полученные методами численного моделирования для средней скорости деформации 500 c^{-1} , представлены на рис. 3.



— - расчетные диаграммы, ••• - идеализированные диаграммы,
1 - $\alpha_0 = 2.16$, 2 - $\alpha_0 = 2.59$, 3 - $\alpha_0 = 3.77$, 4 - $\alpha_0 = 4.83$

Рисунок 3. Расчетные диаграммы динамического деформирования объемно-перфорированных образцов при различных значениях пористости

Ввиду того, что область интересов в большей степени связана с исследованием поведения пористых структур в процессе уплотнения, т.е. пластическими свойствами, в данной работе вводилось предположение, что среда, описывающая объемно-перфорированную структуру, является изотропной. Тогда упругие свойства в виде постоянного модуля сдвига G могут быть получены непосредственно из данных испытаний на одноосное сжатие на упругом участке. В таком случае основными физическими соотношениями для гомогенной модели будут являться зависимости предела текучести σ_T и гидростатического давления p от объемной деформации: $\sigma_T = \sigma_T(\varepsilon_v)$ и $p = p(\varepsilon_v)$. Как показано на рис. 4, при построении модели диаграмма деформирования разбивалась на 3 характерных участка. Первый участок - упругий, до достижения характерного условного предела текучести σ_T^* и соответствующей ей деформации ε_T^* . Второй - зона необратимого уплотнения до полного схлопывания пор и достижения плотности матричного материала и соответствующей ей объемной деформации ε_{vk} . Третий - упругопластическое деформирование полностью уплотненного материала.

Для условий одноосного напряженного состояния предел текучести для условия пластичности будет соответствовать осевому напряжению: $\sigma_T = \sigma_x(\varepsilon_v)$ и гидростатическое давление для условий нагружения, как $p = \frac{1}{3} \sigma_x(\varepsilon_v)$. Для условий разгрузки на участке уплотнения модуль объемного сжатия вычислялся интерполяцией начального упругого модуля объемного сжатия и модуля объемного сжатия полностью уплотненного материала. Соотношения для предела текучести σ_T , полученные обозначенным выше способом, имеют физический смысл только для 2 участка на стадии деформирования полностью уплотненного материала предел текучести становится постоянной величиной σ_T^{MAX} и в дальнейшем перестает зависеть от объемной деформации.

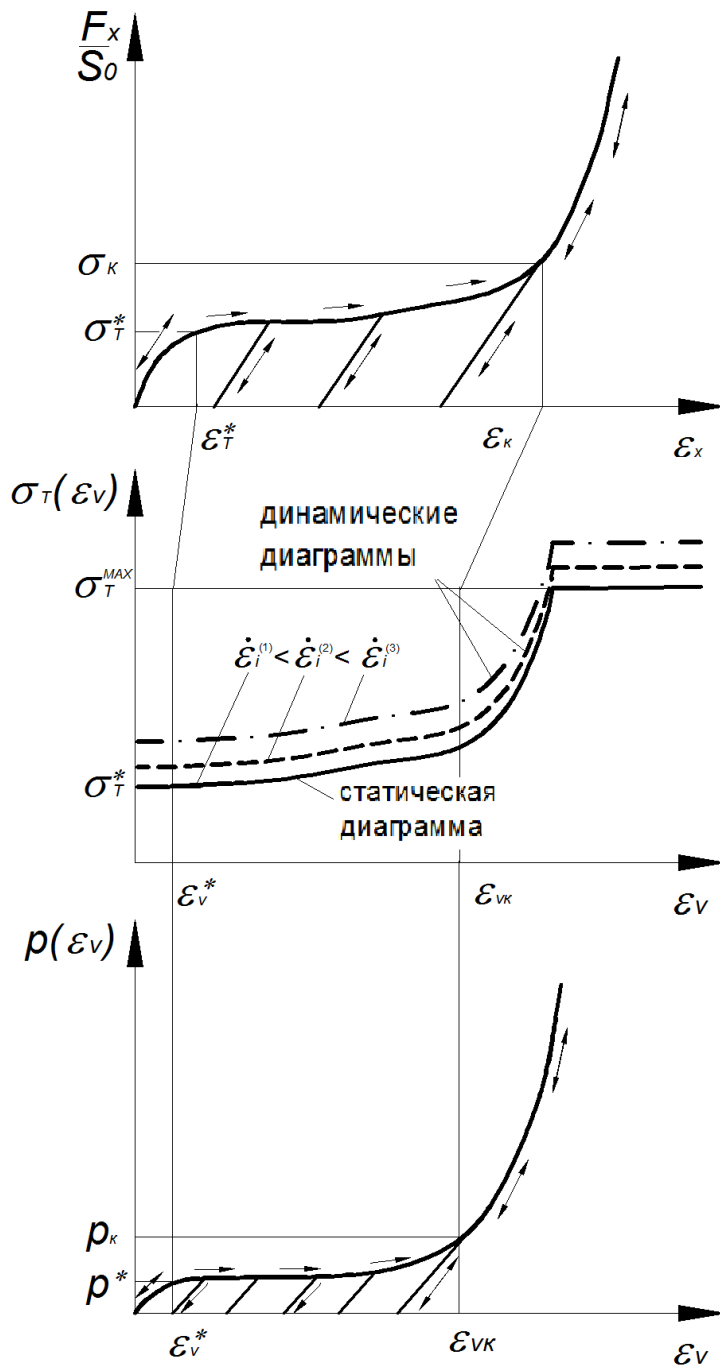


Рисунок 4. К выводу определяющих соотношений для гомогенной модели пористого материала по данным виртуальных испытаний

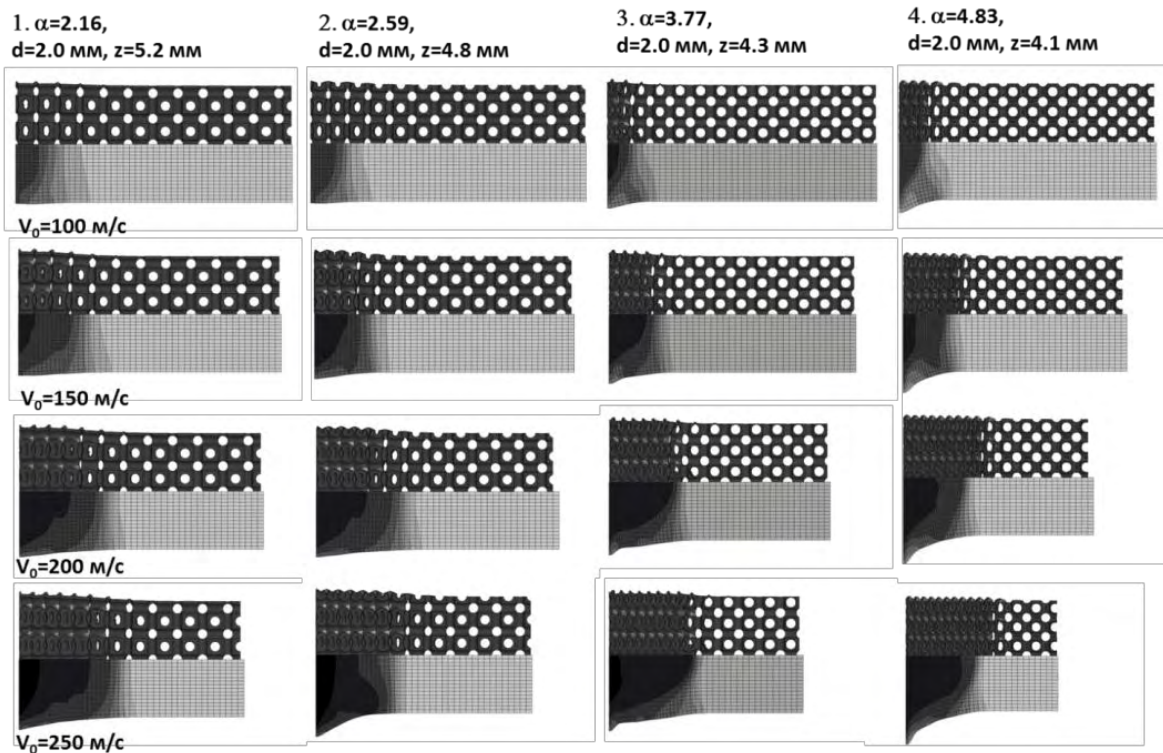
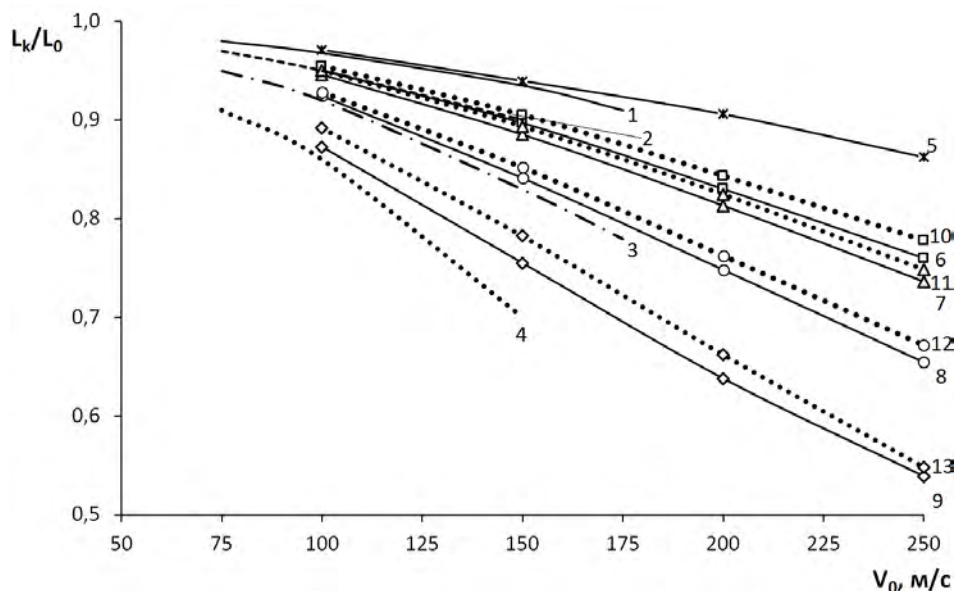


Рисунок 5. Остаточные деформации стержней для расчетных моделей прямого моделирования пористости и эквивалентной гомогенной модели (градиентные поля соответствуют изменению пористости для каждого типа образца)

В предлагаемой гомогенной модели пористой среды динамические эффекты, связанные с увеличением скоростей деформаций, учитывались повышением предела текучести через умножение статической диаграммы на $K_d(\dot{\epsilon}P)$, зависящий от интенсивности скорости деформации $\dot{\epsilon}P$. В первом приближении он может быть получен непосредственно в табличной форме по данным численного либо натурального эксперимента по сжатию образцов при разных скоростях деформации. Расчетные диаграммы, представленные на рис. 2, для двух различных типов матричных материалов: с учетом и без учета эффектов скоростей деформаций, показывают, что динамические эффекты при деформировании пористых сред могут быть обусловлены двумя составляющими: повышением предела текучести матричного материала и изменением механизмов деформирования.

Работоспособность эквивалентной модели, построенной по данным виртуальных испытаний образцов различной пористости для динамических условий деформирования, отличных от одноосного деформированного состояния, подтверждена сравнительным анализом результатов расчета удара стержня Тейлора в диапазонах скоростей 100-250 м/с с расчетами по моделям прямого геометрического учета пористости. Как показано, на рис. 5 и 6, эквивалентная модель показывает хорошее совпадение по критерию остаточной длины стержней.



Эксперименты: 1 – $\alpha_0=2.12$, 2 – $\alpha_0=3.31$, 3 – $\alpha_0=3.78$, 4 – $\alpha_0=4.91$; Расчеты для прямого моделирования пористости: 5 – $\alpha_0=1.0$ (сплошной стержень), 6 – $\alpha_0=2.16$, 7 – $\alpha_0=2.59$, 8 – $\alpha_0=3.77$, 9 – $\alpha_0=4.83$; Расчеты для эквивалентной гомогенной модели: 10 – $\alpha_0=2.16$, 11 – $\alpha_0=2.59$, 12 – $\alpha_0=3.77$, 13 – $\alpha_0=4.83$

Рисунок 6. Остаточная относительная длина стержней в зависимости от скорости соударения

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-007869-а).

Список литературы

1. Экспериментальная оценка определяющих уравнений высокопористых металлов / Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В. // Материалы XIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им А.Г. Горшкова. Ярополец, 18-22 Февраля 2008 г. М.: МАИ. 2008. С. 72-83.
2. Compressive properties of closed-cell aluminum foams as function of strain rate and temperature / C.M. Cady, G.T. Gray III, C. Liu, N.L. Lovoto, T. Nukai// Mat. Sci. and Engng.: A. 2009. Vol. 525. N1-2.
3. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. // 7th Intern. symposium on ballistics, Hague, Netherlands, 1983. P. 541-547.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Öchner A., Kuhn G., Gracio J. Investigation of cellular solids under biaxial stress states // Exp. Mech. 2005. Vol. 45. N 4. P. 325-330.