

В. Г. Баженов, М. Н. Жестков

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ И ПОСТРОЕНИЕ ИХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород,
Россия*

Аннотация. С использованием принципа трехмерного подобия напряженно-деформированного состояния в структурных элементах конструкции осуществлено численное моделирование статического сжатия образцов из пористого алюминия. Принцип позволяет учесть неоднородность распределения напряжений и деформаций, вызванных наличием пор, и варьировать количеством структурных элементов (представительных объемов) при сохранении коэффициента пористости и характерных размеров образца. Расчетно-экспериментальным методом осуществлена идентификация диаграмма деформирования материала основы пористого алюминия. На основании сравнения численных и экспериментальных данных о сжатии пористых образцов оценена эффективность применения принципа трехмерного подобия для этого класса задач.

Ключевые слова: пористый металл, принцип трехмерного подобия, метод конечных элементов, сжатие, диаграмма деформирования.

DOI: 10.37972/chgpu.2020.58.44.005

УДК: 539.3

Введение

В современной технике все большее применение находят пористые металлы, которые, сохраняя достоинства материала основы, обладают малым весом, низкой тепло-

© Баженов В. Г., Жестков М. Н., 2020

Баженов Валентин Георгиевич

e-mail: bazhenov@mech.unn.ru, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия,

Жестков Максим Николаевич

e-mail: mnzhestkov@yandex.ru, младший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-08-00667-а).

Поступила 23.06.2020

и электропроводностью и имеют отличные демпфирующие свойства. Определение напряженно-деформированного состояния является актуальной задачей при проектировании конструкций из пористых металлов. На механические свойства пористых материалов в основном влияют коэффициент пористости [1–3], форма полостей [4–6] и характеристики материала основы [7, 8]. На практике влияние этих факторов учитывают посредством усреднения механических свойств и переходят к рассмотрению сплошного материала [9]. В этом случае не учитывается неоднородность напряженно-деформированного состояния в представительном объеме. Использование точной геометрической структуры пористого материала позволяет численно смоделировать особенности распределения напряжений и деформаций [10], но подобный расчет требует огромного количества вычислительных ресурсов. Неоднородность напряженно-деформированного состояния при наличии пор можно оценить при помощи принципа трехмерного подобия, сформулированного следующим образом: при деформировании в подобных условиях нагружения геометрически подобных тел из одинакового материала напряжения и деформации, возникающие в конструкции, идентичны. Этот принцип позволяет заменить набор одинаковых представительных объемов на один геометрически подобный им структурный элемент, в котором при моделировании реализуется среднее по этому набору напряженно-деформированное состояние. Такой подход учитывает неоднородность напряженно-деформированного состояния в структурном элементе при сохранении величины пористости и характерных размеров деформируемого тела. Появляется возможность управлять объемом вычислительных ресурсов посредством варьирования количеством структурных элементов. В работах [11, 12] показана эффективность принципа двумерного подобия при численном моделировании упругопластического изгиба и устойчивости густо перфорированных пластин и оболочек. В данной работе описан экспериментально расчетный метод идентификации диаграммы деформирования основы пористого материала и представлены результаты исследования эффективности принципа трехмерного подобия для задач статического сжатия пористых образцов.

Идентификация диаграммы деформирования материала основы

Восстановление диаграммы деформирования материала основы осуществляется на базе экспериментальных данных о статическом сжатии пористого образца в жесткой обойме. При испытании использовался цилиндрический образец диаметром 30 мм и высотой 20 мм. Начальная пористость образца в эксперименте составляла 0,64. Максимальные значения условной деформации образца при сжатии достигали 45%. При этом контактного взаимодействия берегов пор не наблюдалось. Восстановление диаграммы деформирования материала основы осуществлялось посредством методики, предложенной в работе [13]. Пористый алюминий из-за наличия полостей имеет геометрически сложную внутреннюю структуру, и вследствие этого — переменное поперечное сечение, как в недеформированном состоянии, так и в процессе сжатия. Построение истинной диаграммы деформирования материала основы производилось итерационным путем. В каждой итерации осуществлялась коррекция зависимости интенсивности истинных напряжений σ_i от интенсивности логарифмических деформаций e_i таким образом, чтобы удовлетворить с заданной точностью экспериментальной зависимости сжимающей силы от перемещения захватного приспособления испытательной машины. С этой целью строится корректировочная функция $\alpha(e) = \frac{F_3(e)}{F_{\text{чм}}(e)}$, $F_3(e)$, $F_{\text{чм}}(e)$ — экспериментальная и численно полученная зависимости сжимающей

силы от относительного изменения длины образца. По результатам численного моделирования определяется зависимость максимального значения интенсивности деформаций $e_i^{max}(e)$ от относительного изменения длины образца. Корректировка истинной диаграммы деформирования осуществляется по формуле: $\bar{\sigma}_i(e_i^{max}) = \alpha(e)\sigma_i(e_i^{max})$. Итерационный процесс корректировки продолжается до тех пор, пока зависимости $F_3(e)$ и $F_{чм}(e)$ не совпадут с точностью 5%. Для первой итерации корректировки можно использовать любую выпуклую диаграмму деформирования упрочняющегося материала [13]. В данном исследовании в качестве начальной была принята диаграмма деформирования для пористого образца, полученная из экспериментальных данных в предположении, что образец состоит из сплошного материала. Для численного моделирования выбран кубический структурный элемент с шаровидной порой внутри. Коэффициент пористости определялся, как отношение объемов полости и куба, ограничивающего структурный элемент. При испытаниях на сжатие начальная пористость образца составляла 0,64. Необходимого значения пористости возможно достичь, если взять полость в виде куба со скругленными ребрами и вершинами. На рисунке 1 представлена геометрическая модель структурного элемента, которая позволяет учесть возможную локальную потерю устойчивости в перегородках между порами.

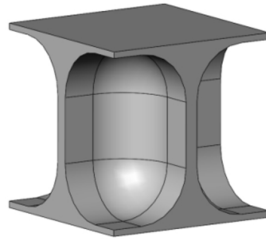


Рис. 1. Структурный элемент

При моделировании статического сжатия пористого образца в жесткой обойме предполагалось, что все структурные элементы деформируются одинаково. Поэтому для проведения вычислений использовался один столбец высотой 20 мм, состоящий из пяти представительных объёмов. Моделирование сжатия пористой структуры осуществлено методом конечных элементов с использованием программного комплекса Abaqus [14]. Конечно-элементная модель одного структурного элемента состояла из 14240 расчетных ячеек. Для моделирования использован лагранжев конечный элемент с восемью узлами. В программном комплексе Abaqus такой тип конечного элемента имеет обозначение C3D8R. На нижнем торце рассмотренного столбца из структурных элементов задавалось нулевое значение вертикальных перемещений, на верхнем торце — постоянная скорость вертикальных перемещений. Величина скорости сжатия равнялась 1 мм/с, что позволяло пренебречь нестационарными эффектами. В расчёте на боковых поверхностях задавались нулевые значения нормальных перемещений и касательных напряжений. При интегрировании по времени использована явная схема типа «крест».

Используемая методика позволила за 4 итерации получить истинную диаграмму деформирования материала основы с точностью менее 5%. Описанный способ позволяет осуществлять идентификацию диаграммы деформирования материала основы

для пористых образцов первоначально однородной структуры при больших деформациях и неоднородном напряженно-деформированном состоянии различного вида (растяжение, сжатие, сдвиг).

Для проверки достаточной точности построенной диаграммы деформирования с использованием 5 структурных элементов было проведено численное моделирование сжатия столбцов высотой 20 мм из 10 и 20 представительных объемов. Связь между истинными напряжениями и деформациями в материале основы описывалась восстановленной диаграммой деформирования. Постановка задачи численного моделирования аналогична постановке для столбца из 5 структурных элементов в жесткой обойме. Расчеты показали, что результаты для 5, 10 и 20 структурных элементов различаются менее чем на 1%, при этом отличие усилий не превышает 5% от экспериментальных данных. Таким образом, для восстановления диаграммы деформирования материала основы достаточно столбца из 5 структурных элементов. При моделировании сжатия напряженно-деформированное состояние во всех структурных элементах одинаково кроме граничных, в которых нарушается принцип трехмерного подобия из-за задания на их торцах постоянных скоростей перемещения. В представительных объемах происходит локальная потеря устойчивости перегородок между порами при относительном перемещении подвижного торца 0,1. Локальная потеря устойчивости происходит во всех внутренних структурных элементах одновременно.

Для моделирования сжатия пористого образца в жесткой обойме с учетом реального размера структурного элемента, который равнялся 0,3 мм, понадобилось бы рассмотреть столбец из 67 структурных элементов. Применение принципа трехмерного подобия для пористого материала позволило осуществить процедуру идентификации диаграммы деформирования материала основы с использованием столбца из 5 структурных элементов.

Использование принципа трехмерного подобия при моделировании сжатия пористых образцов со свободными боковыми поверхностями

При экспериментальном исследовании статического сжатия пористого тела со свободными боковыми поверхностями использовался цилиндрический образец высотой 20 мм и диаметром 70 мм. С использованием принципа трехмерного подобия и восстановленной диаграммы деформирования материала основы исследовано статическое сжатие пористого образца со свободными боковыми поверхностями. В качестве геометрических моделей рассмотрены параллелепипеды с одним и пятью представительными объёмами по высоте и с различным количеством структурных элементов в горизонтальной плоскости. На рисунке 2 продемонстрированы геометрические модели пористого образца. Для снижения вычислительных затрат учтена геометрическая симметрия сжимаемой структуры и рассмотрена $\frac{1}{4}$ часть конструкции. На поверхностях, вырезающих $\frac{1}{4}$ часть расчетной области, задавалось равенство нулю нормальных перемещений и касательных напряжений.

Как и в задаче сжатия пористого образца в жесткой обойме, на нижнем торце задавалось нулевое значение вертикальных перемещений, на верхнем торце — скорость вертикальных перемещений, равная 1 мм/с.

На рисунке 3 представлена зависимость сжимающей силы, приведенной к площади поперечного сечения экспериментального образца, от относительного перемещения верхнего торца и количества структурных элементов.

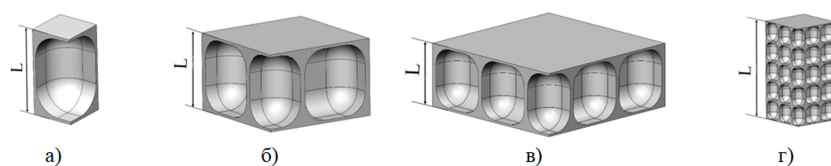


Рис. 2. Геометрические модели пористой структуры: а — 1 элемент, б — 9 элементов, в — 25 элементов, г — 125 элементов

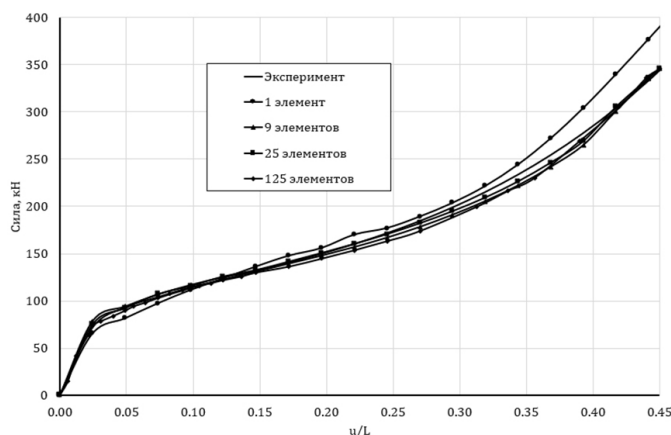


Рис. 3. Изменение сжимающей силы от относительного перемещения верхнего торца образца в зависимости от количества структурных элементов

Максимальные погрешности наблюдаются для одного структурного элемента при относительном перемещении верхнего торца более 0,4. Связано это с тем, что осреднение одним структурным элементом неоднородных вдоль радиуса напряженно-деформированных состояний в структурных элементах недостаточно для получения результатов с приемлемой точностью. Численное моделирование показало, что для геометрических моделей с 9, 25 и 125 представительными объемами наблюдаются различия напряженно-деформированного состояния в структурных элементах по мере удаления от центра геометрической модели. Локальная потеря устойчивости в перегородках происходит при относительном перемещении подвижного торца 0,06. Сначала теряют устойчивость перегородки в структурных элементах, прилежащих к боковым свободным поверхностям. При дальнейшем сжатии образца наблюдается потеря устойчивости во внутренних структурных элементах. В последний момент теряют устойчивость перегородки в структурных элементах, расположенных в центре геометрической модели. Результаты расчетов с 9, 25 и 125 структурными элементами различаются менее чем на 1%, при этом отличие усилий от экспериментальных данных не превышает 6%.

Для проведения численного расчета сжатия пористого образца со свободными боковыми поверхностями с учетом реального размера представительного объема, равного

0,3 мм, потребовалось бы порядка 187 тыс. структурных элементов. Принцип трехмерного подобия позволил смоделировать сжатие пористого образца со свободными боковыми поверхностями с использованием 9 структурных элементов.

Заключение

Исследована эффективность применения принципа трехмерного подобия при численном моделировании сжатия образцов из пористого алюминия. Данный принцип позволяет учесть неоднородность распределения напряжений, деформаций при наличии полостей и сократить объем вычислительных ресурсов путем варьирования количеством структурных элементов, сохраняя коэффициент пористости и характерные размеры конструкции. С использованием принципа трехмерного подобия разработан экспериментально–расчётный метод идентификации диаграммы деформирования материала основы пористого образца. При численном моделировании сжатия цилиндрического образца из пористого алюминия в жесткой обойме с использованием явной схемы интегрирования по времени применение принципа трехмерного подобия сократило на два порядка объем вычислительных ресурсов, а при моделировании сжатия образца со свободными боковыми поверхностями — на 5 порядков. Это позволило за 4 часа осуществить расчеты неоднородного напряженно–деформированного состояния образцов из пористого алюминия на локальном четырехъядерном персональном компьютере.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Черемской П. Г. Методы исследования пористости твердых тел. М.: Энергоатомиздат, 1985. 112 с.
- [2] Витязь А. А., Капцевич В. М., Косторнов А. Г. Формирование структуры и свойств пористых порошковых материалов. М.: Металлургия, 1993. 240 с.
- [3] Andrews E., Sanders W., Gibson L. G. Compressive and tensile behavior of aluminum foams // Materials Science and Engineering: A. 1999. Vol. 270. p. 113–124.
- [4] Поляков В.В., Головин А.А. Модули упругости пористых материалов // Физика Металлов и Металловедение. 1995. Т. 79. с. 57–60.
- [5] Bamhart J., Baumeister J. Deformation characteristics of metal foams // Journal of Mat. Science. 1998. Vol. 33. p. 1431–1440.
- [6] Compressive deformation and yielding mechanisms in cellular Al alloys determined using X-ray tomography and surface strain mapping / Bart-Smith, A. F. Bastawros, A. G. Evans et al. // Acta mat. 1998. Vol. 46. p. 3583–3592.
- [7] Kriszt B., Foroughi B., K. F. Behaviour of aluminium foam under uniaxial compression // Degischer Materials Science and Technology. 2000. Vol. 16, no. 7/8. p. 792–796.
- [8] ff vv ll, jj at al. // MetfoamVerlag MIT Publishing. 2003. p. 387.
- [9] Nakajima H. F. Mechanical and Physical Properties, and Its Application of Lotus-Type Porous Metals // Materials Transactions. 2019. Vol. 60, no. 12. p. 2481–2489.
- [10] Dorozhko M., Seweryn A. Finite Element Modeling of Anisotropic Deformation Behavior of the Porous Materials Based on Microtomographic Images // AIP Conference Proceedings. Vol. 1780. 2016. p. 060001.
- [11] Баженов В. Г., Жестков М. Н. Исследование применимости принципа подобия в задачах упругопластического изгиба и устойчивости при осевом сжатии густо перфорированных пластин и оболочек // Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018). 2018. с. 326–328.
- [12] Bazhenov V., Zhestkov M. About the applicability limits of the Tymoshenko model and the principle of two-dimensional similarities in problems of elastic plastic bending and stability of densely perforated plates and shells // Journal of physics: Conference series. 2019. Vol. 1158. p. 022022.
- [13] Экспериментально-расчетный метод исследования больших упругопластических деформаций цилиндрических оболочек при растяжении до разрыва и построение диаграмм деформирования при неоднородном напряженно–деформированном состоянии / В.Г. Баженов, В.К. Ломунов, С.Л. Осетров [и др.]. 2013. Т. 54, № 1. с. 116–124.
- [14] Abaqus Analysis User's Guide. Abaqus Theory Guide // Simulia Abaqus.

V. G. Bazhenov, M. N. Zhestkov

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF LARGE DEFORMATIONS FOR POROUS METALS AND DEFINITION OF THEIRS STRESS-STRAIN DIAGRAMS

National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russia

Abstract. Using the principle of three-dimensional similarity of the stress-strain state in structural elements of the construction, a numerical simulation of static compression of specimen made of porous aluminum was performed. The principle allows us to take into account the heterogeneity of the distribution of stresses and deformations caused by the presence of pores, and to vary the number of structural elements (representative volumes) while maintaining the porosity coefficient and the characteristic size of the specimen. The numerical and experimental method was used to identify the stress-strain diagram of the carcass material. Based on the comparison of numerical and experimental data on the compression of porous specimen, the effectiveness of applying the three-dimensional similarity principle for this class of problems is estimated.

Keywords: porous metals, three-dimensional similarity principle, finite element method, compression, strain diagram.

REFERENCES

- [1] Cheremskoy P. Methods for studying the porosity of solids. M.: Energoatomizdat, 1985. 112 p.
- [2] Vityaz A. A., Kaptsevich V. M., Kostornov A. G. Formation of the structure and properties of porous powder materials. M.: Metallurgy, 1993. 240 p.
- [3] Andrews E., Sanders W., Gibson L. G. Compressive and tensile behavior of aluminum foams // Materials Science and Engineering: A. 1999. Vol. 270. p. 113–124.
- [4] Polyakov V., Golovin A. Modules of elasticity of porous materials // Physics of Metals and Metallurgy. 1995. Vol. 79. P. 57–60.
- [5] Bamhart J., Baumeister J. Deformation characteristics of metal foams // Journal of Mat. Science. 1998. Vol. 33. P. 1431–1440.
- [6] Compressive deformation and yielding mechanisms in cellular Al alloys determined using X - ray tomography and surface strain mapping / H. Bart-Smith, A. F. Bastawros, A. G. Evans et al. // Acta mat. 1998. Vol. 46. p. 3583–3592.
- [7] Kriszt B., Foroughi B., K. F. Behavior of aluminum foam under uniaxial compression // Degischer Materials Science and Technology. 2000. Vol. 16, no. 7/8. p. 792–796.
- [8] ff vv ll, jj at al. // MetfoamVerlag MIT Publishing. 2003. p. 387.
- [9] Nakajima H. F. Mechanical and Physical Properties, and Its Application of Lotus - Type Porous Metals // Materials Transactions. 2019. Vol. 60, no. 12. p. 2481–2489.
- [10] Dorozhko M., Seweryn A. Finite Element Modeling of Anisotropic Deformation Behavior of the Porous Materials Based on Microtomographic Images // AIP Conference Proceedings. Vol. 1780. 2016. p. 060001.
- [11] Bazhenov V. G., Zhestkov M. N. Investigation of the applicability of the principle of similarity in the problems of elastoplastic bending and stability under axial compression of densely perforated plates and shells // Proceedings of the XII International Conference on Applied Mathematics and Mechanics in the Aerospace Industry (NPNJ'2018). 2018. p. 326–328.

Bazhenov, Valentin Georgievich, Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Chief Researcher, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Research Institute of Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russia,

Zhestkov, Maksim Nikolaevich, Junior Researcher, Research Institute of Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russia.

- [12] Bazhenov V., Zhestkov M. About the applicability limits of the Tymoshenko model and the principle of two-dimensional similarities in problems of elastic plastic bending and stability of densely perforated plates and shells // Journal of physics: Conference series. 2019. Vol. 1158. p. 022022.
- [13] Experimental and computational method for studying large elastoplastic deformations of cylindrical shells under tension to rupture and plotting deformation diagrams in a nonuniform stress-strain state / V.G. Bazhenov, V.K. Lomunov, S.L. Osetrov [и др.]. 2013. Т. 54, № 1. с. 116–124.
- [14] Abaqus Analysis User's Guide. Abaqus Theory Guide // Simulia Abaqus.