

УДК 539.381

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ РАЗНОМОДУЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ СО СТРУКТУРОЙ В ВИДЕ ЗАСТЫВШЕЙ ПЕНЫ

М. А. Леган, А. В. Мирошниченко

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: legan@ngs.ru, alfkxd@bk.ru

Проведен анализ структуры пеноматериалов. Отмечено, что диаграммы деформирования пеноматериалов при одноосных растяжении и сжатии различаются. Предложена упрощенная физическая модель разномодульного пеноматериала, представляющая собой стальное кольцо. Модель исследована на испытательной машине Walter + Bai AG LFM-L-1. С использованием программного пакета ANSYS Workbench проведен анализ деформирования модели с учетом контактного взаимодействия ее элементов. Выполнено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: разномодульность, экспериментальное исследование, контактная задача, метод конечных элементов.

DOI: 10.15372/PMTF20220621

Введение. В настоящее время пеноматериалы имеют широкое применение, что обусловлено их меньшей плотностью по сравнению с плотностью традиционных материалов, на основе которых они изготовлены, и приемлемыми механическими свойствами. Пенопласты используются в трехслойных конструкциях с наполнителем, пенометаллы — в качестве сэндвич-панелей и корпусных деталей. Отличие механических характеристик пеноматериалов от характеристик исходных материалов обусловлено их структурой в виде застывшей пены.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению структурной модели пеноматериалов. Структура большинства таких материалов представляет собой совокупность сфер, спекшихся в областях соприкосновений, причем площадка их контакта практически плоская, поэтому сферы становятся подобными тетрадекаэдрам [1]. Пеноматериалы являются разномодульными материалами. Разномодульность материалов объясняется различием диаграмм деформирования при одноосных растяжении и сжатии [2]. Многие полимерные материалы обладают свойством разномодульности, однако невозможно утверждать, что модули упругости при растяжении всегда меньше модулей упругости при сжатии, и наоборот [3]. Несмотря на то что задачи моделирования разномодульных материалов рассматривались во многих работах (см. [3–5] и др.), в настоящее время отсутствуют модели, объясняющие анизотропное поведение материала в рамках единого подхода к описанию процессов деформирования пеноматериалов при различных сценариях нагружения. Поэтому требуется рассматривать каждый тип нагружения отдельно и использовать законы хорошо разработанной механики сплошных сред, вводя определенные поправки в характеристики данных материалов [3, 5–7]. В работе [8] отмечено, что модуль

упругости при растяжении пенопласта ПС-1 в 1,5 раза больше, чем при его сжатии. В [9] представлены результаты экспериментов по деформированию и разрушению образцов из пенополистирола ПСБ-25 в условиях растяжения, сжатия и изгиба и отмечено, что модуль Юнга при их сжатии в шесть раз меньше, чем при растяжении. Работа [2] посвящена экспериментальному исследованию особенностей деформирования и разрушения пенополиуретанов при растяжении, сжатии, чистом сдвиге, кручении и трехточечном изгибе. Результаты экспериментов показали, что пенополиуретан имеет анизотропные свойства, причем модули Юнга при растяжении были больше, чем при сжатии. Следует отметить, что модуль Юнга пеноматериала при растяжении может превышать модуль Юнга при сжатии только до момента схлопывания пор. При дальнейшем сжатии происходит увеличение жесткостных и прочностных характеристик материала вследствие уплотнения его клеточной структуры [10, 11].

Пеноматериалы часто используются в качестве заполнителя в трехслойных конструкциях, работающих на изгиб. В условиях изгиба различие модулей упругости материала при растяжении и сжатии приводит к смещению нейтральной линии изгибаемой конструкции. Анализ задач об изгибе пластин с учетом различия сопротивлений растяжению и сжатию проведен в работах [7, 12].

Эксперимент. В качестве физической модели, объясняющей различие модулей упругости пеноматериалов при растяжении и сжатии, рассмотрим тонкое стальное кольцо (рис. 1). Будем исследовать два случая нагружения — растяжение и сжатие. Сжатие кольца осуществляется стальными пластинами, прилегающими к внешней поверхности кольца, а растяжение — с помощью стальных цилиндрических стержней, примыкающих к внутренней поверхности кольца. Такой способ нагружения кольца позволяет моделировать деформирование спекшихся структурных ячеек пеноматериала, в случае если спекание произошло на малых участках поверхности ячеек.

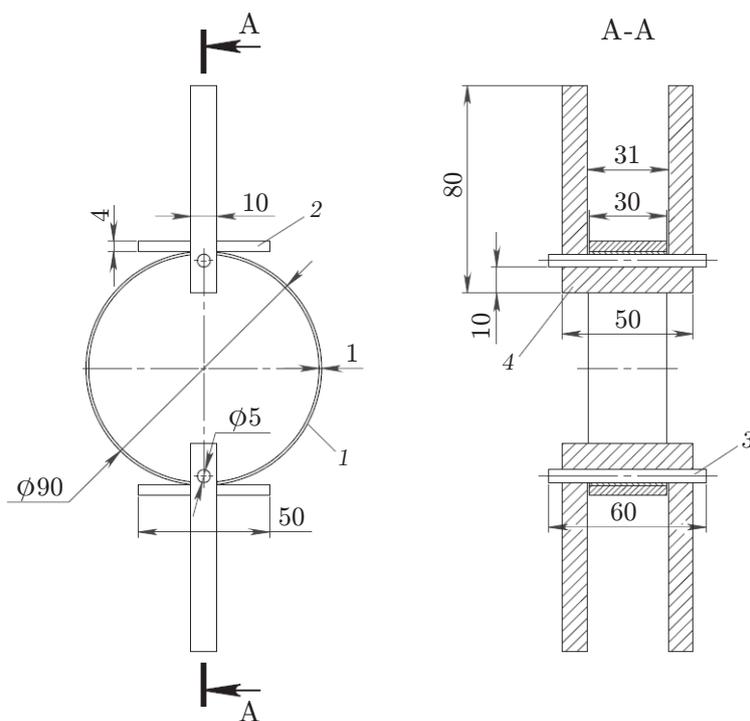


Рис. 1. Физическая модель, испытываемая на растяжение и сжатие:

1 — кольцо, 2 — пластина, 3 — стержень, 4 — “серьги” для захватов испытательной машины

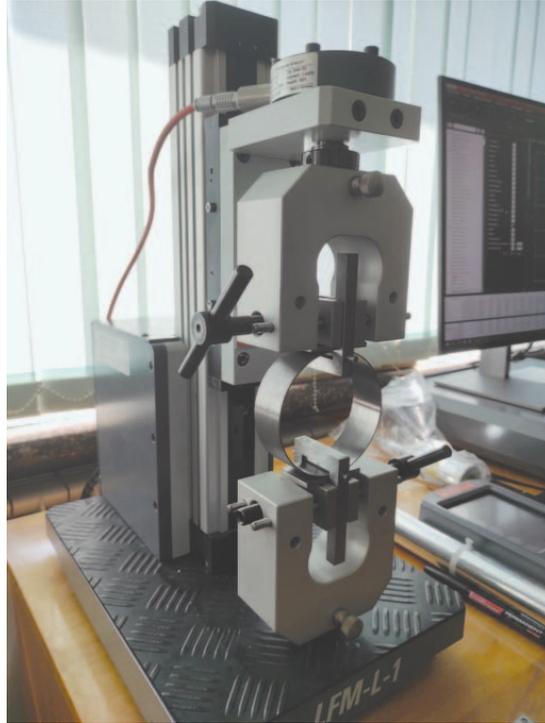


Рис. 2. Испытание модели

Таблица 1

Результаты экспериментов

Номер эксперимента	U , мм	F_p , Н	F_c , Н	K_p , Н/м	K_c , Н/м	K_p/K_c
1	6	277	225	46 132	37 552	1,23
2	6	258	232	43 014	38 838	1,11
3	6	262	229	43 699	38 294	1,14
Среднее значение	6	266	229	44 282	38 228	1,16

Испытания на растяжение и сжатие проведены в Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН на испытательной машине Walter + Bai AG LFM-L-1 (рис. 2), максимальное усилие которой не превышает 1000 Н. В качестве нагрузки задавалось перемещение траверсы на 6 мм. Было проведено три испытания. В ходе испытаний регистрировались сила F и перемещение U активного захвата машины (рис. 3). Следует отметить, что различие углов наклона касательной к диаграмме деформирования при растяжении и сжатии проявляется даже при малых нагрузках.

Вычислялись средние значения параметров нагружения и определялась величина жесткости K как тангенс угла наклона касательной к диаграмме деформирования. Результаты сравнения значений жесткости при растяжении и сжатии приведены в табл. 1 (F_p — растягивающая сила, F_c — сжимающая сила, K_p , K_c — жесткость при растяжении и сжатии соответственно).

Компьютерное моделирование. Численное моделирование проводилось в программном пакете ANSYS Workbench. Вместо исходной задачи (рис. 4) рассматривались две задачи о контакте структурного элемента пеноматериала с пластинами в случае сжатия (рис. 5, *а*) и с цилиндрическими стержнями в случае растяжения (рис. 5, *б*). Полагалось, что все детали выполнены из стали (модуль Юнга равен 200 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,3).

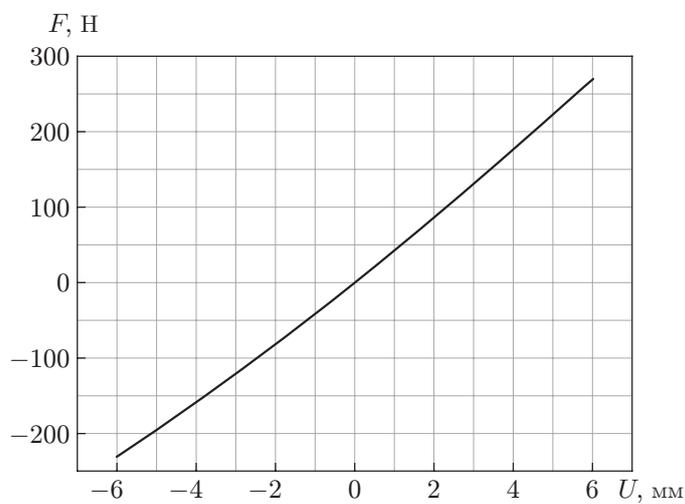


Рис. 3. Экспериментальная диаграмма деформирования модели

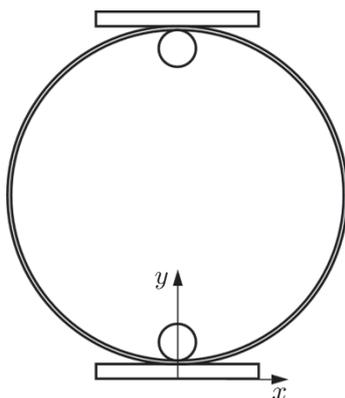


Рис. 4. Схема задачи

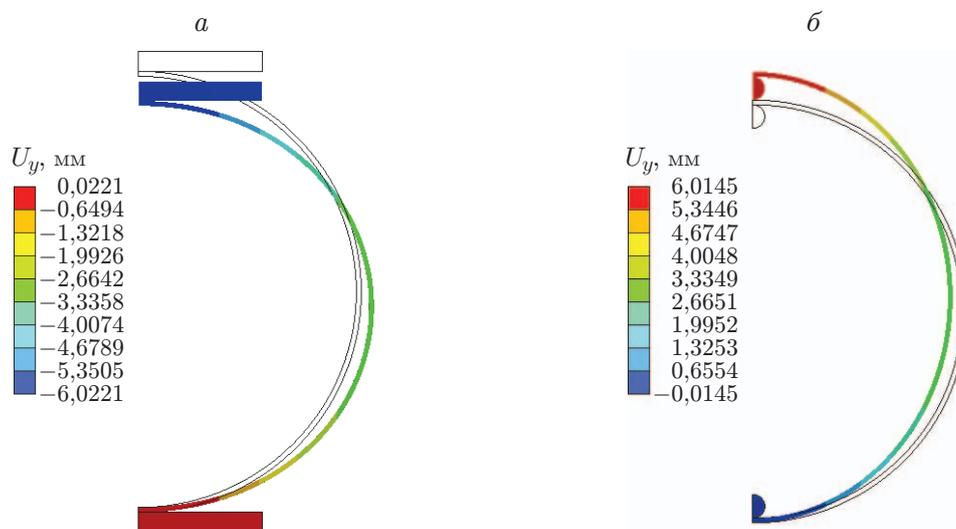


Рис. 5. Перемещения по оси y в моделях в случаях сжатия (а) и растяжения (б)

Таблица 2

Результаты расчета и экспериментальные данные

Источник данных	F_p , Н	F_c , Н	K_p , Н/м	K_c , Н/м	K_p/K_c
Эксперимент	266	229	44 282	38 228	1,16
Расчет	274	222	45 591	36 944	1,23

на — 0,3). В задачах имеется две плоскости симметрии, поэтому рассматривалась 1/4 модели. На отсеченных поверхностях перемещения из плоскости сечений полагались равными нулю, контакт тел рассматривался как контакт без трения.

Граничные условия задавались следующим образом. В случае сжатия смещения нижней поверхности нижней пластины U_x , U_y , U_z равны нулю. Сила реакции $R_N \leq 0$ (при $R_N = 0$ контакт отсутствует, при $R_N < 0$ тела находятся в контакте). При контакте тел размер зазора $g = 0$, при отсутствии контакта $g > 0$.

В случае растяжения смещения цилиндрической поверхности нижнего стержня U_x , U_y , U_z равны нулю. Сила реакции $R_N \leq 0$. Размер зазора $g \geq 0$.

Модели были разбиты приблизительно на 200 000 конечных элементов типа SOLID186 (твердотельные квадратичные трехмерные элементы, имеющие 20 узлов с тремя степенями свободы в каждом из них). На контактирующих поверхностях задавались поверхностные восьмиузловые элементы CONTA174 и TARGE170 для контактной и целевой поверхностей соответственно. При решении контактной задачи использовались метод штрафов и итерационный алгоритм Ньютона — Рафсона [13].

Получены следующие значения реакций опоры: $R_c = 55,416$ Н, $R_p = 68,387$ Н. Поскольку рассматривалась 1/4 модели, при вычислении реакций для всей модели полученный результат нужно умножить на четыре. Тогда значения реакций равны $R_c = 222$ Н, $R_p = 274$ Н. Жесткость при сжатии равна $K_c = 36 944$ Н/м, жесткость при растяжении $K_p = 45 591$ Н/м. Отношение жесткостей составляет $K_p/K_c = 1,23$.

Сравним жесткости, полученные с помощью метода конечных элементов, с жесткостями, полученными в эксперименте. Вычисления показывают, что различие жесткостей и их отношений не превышает 6 %. Наилучшее соответствие наблюдается между расчетными значениями и результатами первого эксперимента (табл. 2).

Заключение. Получены результаты, показывающие, что при деформировании конструкции, моделирующей сфероподобную структуру с участками контакта, жесткость при растяжении, когда область контакта мала, больше жесткости при сжатии, когда область контакта увеличивается с возрастанием нагрузки, и существенно больше области контакта при растяжении. Этот результат подтверждает характер деформирования некоторых разномодульных пеноматериалов, модуль упругости которых при растяжении больше, чем при сжатии.

Анализ предложенной упрощенной физической модели пеноматериала, изготовленной из стали с одним и тем же модулем упругости при растяжении и сжатии, показывает, что различие углов наклона касательной к диаграмме деформирования модели при растяжении и сжатии проявляется даже при малых нагрузках.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zhu Н. X.** Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells. Birmingham: Elsevier, 1996.
2. **Kraus В.** Anisotropy and variability in polyurethane foams: experiments and modeling. Auckland: Elsevier, 2012.

3. **Амбарцумян С. А.** Разномодульная теория упругости. М.: Наука, 1982.
4. **Тимошенко С. П.** Курс сопротивления материалов. М.; Л.: Гостехиздат, 1931.
5. **Ломакин Е. В., Работнов Ю. Н.** Соотношения теории упругости для изотропного разномодульного тела // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1978. № 6. С. 29–34.
6. **Биргер И. А.** Сопротивление материалов: Учеб. пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. М.: Наука, 1986.
7. **Цвелодуб И. Ю.** О разномодульной теории упругости // ПМТФ. 2008. Т. 49, № 1. С. 157–164.
8. **Александров А. Я.** Конструкции с заполнителями из пенопластов / А. Я. Александров, М. Я. Бородин, В. В. Павлов. М.: Оборонгиз, 1962.
9. **Леган М. А., Колодезев В. Е., Карпов Е. В.** Особенности деформирования и разрушения пенополистирола при растяжении, сжатии и изгибе // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: Тез. докл. Всерос. конф., Новосибирск (Россия), 9–13 окт. 2006 г. Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2006. С. 76.
10. **Садовский В. М., Садовская О. В.** Анализ деформации пористой среды с учетом схлопывания пор // ПМТФ. 2016. Т. 57, № 5. С. 53–65.
11. **Banhart J., Waumeister J.** Deformation characteristics of metal foams // J. Materials Sci. 1998. V. 33, iss. 6. P. 1431–1440.
12. **Петраков И. Е., Садовский В. М., Садовская О. В.** Анализ изгиба композитных пластин с учетом различия сопротивлений растяжению и сжатию // ПМТФ. 2021. Т. 62, № 5. С. 172–183.
13. **Wriggers P.** Computational contact mechanics. Berlin: Springer, 2006.

*Поступила в редакцию 4/III 2022 г.,
после доработки — 20/IV 2022 г.
Принята к публикации 25/IV 2022 г.*
