

**А.М. Ханов, Л.Д. Сиротенко, Е.В. Матыгуллина,
И.В. Самусев, Г.В. Башкирцев**

Пермский государственный технический университет

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВПЯМ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представлено описание и произведена сравнительная оценка различных подходов к моделированию высокопористых ячеистых материалов. На основе структурного моделирования определены величины внешнего разрушающего давления и модуля упругости ячеистого материала на основе оксида алюминия в диапазоне пористости 75–97% с использованием метода конечных элементов.

Ячеистые материалы, также известные как пеноматериалы, обладают рядом новых свойств и большим потенциалом благодаря небольшой массе, в сравнении с традиционными материалами. Пенополиуретановые пены уже давно используются в аэрокосмической и судостроительной промышленности в качестве материалов – поглотителей вибрации, шума и ударного воздействия, различного рода уплотнителей. Несмотря на это, применение таких материалов в конструкциях зачастую ограничено их невысокой прочностью, в сравнении с другими материалами. В связи с этим в последнее время большое внимание уделяется синтезу металлических пен, которые обладают значительно большей прочностью и жесткостью, и изучению их свойств.

Строение таких материалов определяется открыто-ячеистой структурой пенополиуретана, а поведение – механикой твердого тела. Следует сказать, что глубокое понимание зависимости свойств материала от его структуры стало появляться совсем недавно. Главным фактором, оказывающим наибольшее влияние на механические характеристики материала, такие как модуль упругости и прочность, является пористость. В литературе также часто встречается характеристика относительной плотности. Связь между плотностью и пористостью открыто-ячеистого материала выражается следующим соотношением:

$$\Pi = 1 - R = 1 - \frac{\rho}{\rho_s},$$

где Π – пористость; R – относительная плотность; ρ – плотность пенистого материала; ρ_s – плотность материала наполнителя.

Учитывая широкую потенциальную область применения ячеистых материалов, изучение их механического поведения является актуальной задачей. Теоретические модели механического поведения ячеистых материалов дают возможность определять области концентрации напряжений и механизмы деформации, предшествующие разрушению ячеистого материала, вычислять физико-механические постоянные материала. Такие модели в основном описывают пены низкой плотности или же высокопористые пены, соответствующие высокопористым ячеистым материалам (ВПЯМ) с пористостью 70–97%, имеющими высокую аэро- и гидропроницаемость.

Для определения физико-механических характеристик ВПЯМ в первую очередь необходимо понимание их геометрии и устройства. Организация ВПЯМ повторяет сетчатую структуру пенополиуретанов. Так, высокопористые пены характеризуются нерегулярной структурой ячеек, которые изменяются по своему размеру.

В данной работе дается описание и оценка различных подходов к моделированию открыто-ячеистых пеноматериалов. Выполняется моделирование ВПЯМ на основе оксида алюминия (Al_2O_3) с целью прогнозирования эффективных величин внешнего разрушающего давления и модуля упругости ячеистого материала в диапазоне пористости 75–97%, с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Для аналитического описания открыто-ячеистых материалов существует несколько подходов. Наиболее популярный и простой из них подразумевает рассмотрение структуры материала как периодической, в основе которой лежит некоторая единичная ячейка. Результаты, полученные с использованием регулярных моделей, дают хорошую корреляцию с экспериментальными данными, позволяют наглядно рассматривать поля напряжений и деформации, также эти модели просты в реализации.

Другой подход к описанию связан с использованием аппарата теории вероятности и диаграммы Г.Ф. Вороного для генерирования ансамблей нерегулярных ячеек. Работой по моделированию случайных пен занимались Van der Burg (1997), Zhu (1999), Windle (2002), Kraynik (2003), Gan (2005). Основным недостатком данного метода, помимо сложности в реализации, является то, что получаемые по такой модели физико-механические характеристики изменяются от опыта к опыту. Для получения более обобщенных результатов производится множество опытов на одной модели, получаемые результаты усредняются.

Самый передовой метод описания микроструктуры ячеистых материалов связан с использованием рентгеномографии и является последующим этапом развития непериодических моделей. Его суть заключается в сканировании реальной ячеистой металлической пены для получения трехмерного

стереолитографического массива данных о структуре материала, с последующей обработкой геометрических данных в САД-приложениях и передаче в расчетные САЕ-системы для проведения конечно-элементного анализа. Высокая разрешающая способность рентген-томографов позволяет получать модели с высокой повторяемостью реальных структур. Основными недостатками данного метода является необходимость в использовании сторонних программ для обработки информации, полученной с томографа, что приводит к потере некоторых геометрических данных при конвертировании форматов файлов, и потребность в значительных вычислительных ресурсах. Большую сложность представляет создание конечно-элементной модели геометрии, полученной методом рентгенотомографии, что было отмечено Maire (2003). Так, в своей статье N. Michailidis (2008) проводит исследование методом конечных элементов механических характеристик ВПЯМ на основе никеля, используя компьютерную томографию. При сканировании образца с параметрами $25 \times 15 \times 2$ мм ему потребовалось более полумиллиона конечных элементов для создания сетки и более 80 ч машинного времени для вычисления отклика модели (использовался четырехъядерный ПК с частотой 2,4 на ядро и 8 Гб ОЗУ). Для сравнения, реализация модели, построенной с применением МКЭ и периодического подхода для описания структуры, занимает не более 2 мин на одноядерном ПК. N. Michailidis подтвердил результаты о концентрации полей напряжений, полученных ранее на периодических моделях материала. Созданием моделей открыто-ячеистых материалов при помощи рентгенотомографии занимались Youssef (2005), Knackstedt (2006).

Рассмотрим более подробно моделирование открыто-ячеистого материала как периодической структуры для прогнозирования его физико-механических характеристик. Как было отмечено выше, в основе данного метода лежит рассмотрение типовой единичной ячейки, которая периодически повторяется, заполняя пространство регулярно упакованной структурой, образуя тем самым структуру ячеистого материала. Наиболее важным этапом является выбор структуры ячейки, потому что в модели именно на этом основываются физико-механические свойства ВПЯМ.

Одной из первых моделей была модель Gibson и Ashby (1988), которые проводили исследования материала под действием одноосно сжимающей нагрузки. Предложенная ими типовая единичная ячейка напоминает куб (рис. 1). Эта модель не соответствует ячейкам в открыто-ячеистых пенах по следующим причинам:

1. Сопряжение ячеек между собой происходит по двум перемычкам (В и Н) в горизонтальном и вертикальном направлениях, чего не наблюдается в пенополиуретановых пенах.
2. Перемычки имеют квадратное поперечное сечение.

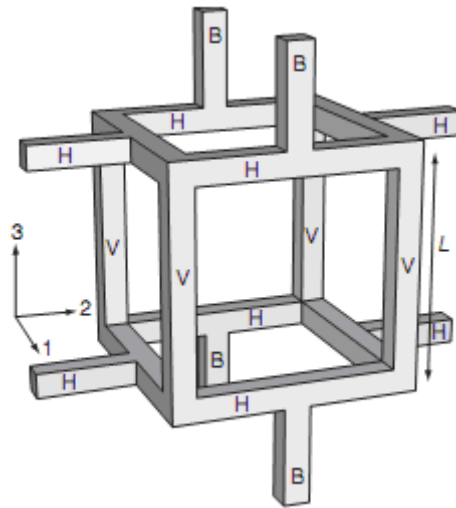


Рис. 1. Модель единичной ячейки Gibson и Ashby (1988) [6]

3. В вершинах структуры, образованной по данной модели ячейки, сходятся по три перемычки, в то время как в пенополиуретане сходятся не менее четырех перемычек.

4. Модель ячейки допускает сопряжение только в двух направлениях (рис. 1, направления 2 и 3).

На сегодняшний день теоретическая модель Gibson и Ashby существенно устарела.

Рассмотрим модель структуры ВПЯМ на основе ячейки в форме додекаэдра (рис. 2). Модель образована 30 призматическими стержнями переменного треугольного сечения, соединенными между собой в 20 узлах. В каждом узле сходятся по четыре перемычки, каждый узел принадлежит четырем ячейкам, а перемычка – трем ячейкам. Модель вписывается в сферическую оболочку и содержит 12 конических вырезов. Такая модель использовалась в работе [3] для расчета упругих и теплофизических свойств материала. В работе [3] автор подробно излагает подход к построению данной ячейки, устанавливает связь между геометрическими параметрами сетчато-ячеистой структуры, пористостью и объемной долей поровых каналов; на основании данной модели определяется зависимость эффективных упругих и теплофизических параметров ВПЯМ от характеристик структуры. Основным недостатком в данной работе является отсутствие учета влияния изгибающих моментов, автор рассматривает только сжатие перемычек при действии внешней нагрузки.

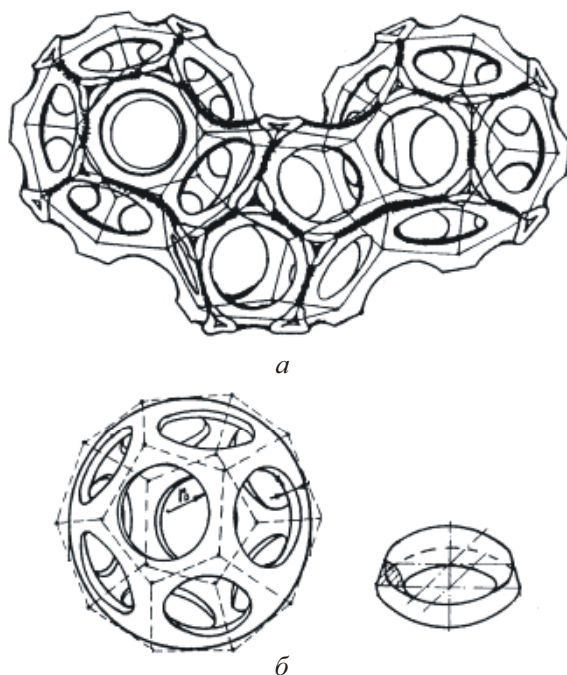


Рис. 2. Модель структуры ВПЯМ на основе додекаэдров (а) и элементы ячейки (б)

Рассмотрим модель структуры открыто-ячеистого материала на основе ячейки тетракаидодекаэдра (рис. 3, а). Такую ячейку называют также ячейкой Кельвина, который искал форму для модели мыльного пузыря. Самой эффективной формой, которую он разработал, был тетракаидодекаэдр. Такая ячейка заполняет пространство в пределах данного объема, является повторяемой и имеет минимальную поверхность ячейки при заданном объеме. Данная ячейка имеет 14 граней и среднее число ребер на одной грани 5,1. Согласно статистическим наблюдениям, ячейки пенополиуретана в пределах пористости 80–98% характеризуются средним числом граней 13,7 и средним числом ребер на одной грани 5,1 [4].

Представленная ячейка благодаря своей простоте и соответствию реальной структуре пены является наиболее подходящей для моделирования ВПЯМ, рассматриваемых как регулярных структур.

Переходя к этапу моделирования, примем некоторые допущения в модели ячейки. Для простоты описания предполагаем, что:

1. Каждая ячейка изотропна. В силу того, что макроскопически ВПЯМ изотропен, модель его структуры должна иметь изотропную элементарную ячейку [4], хотя реальная ячейка имеет вытянутую форму с отношением осей 2,0–2,5.

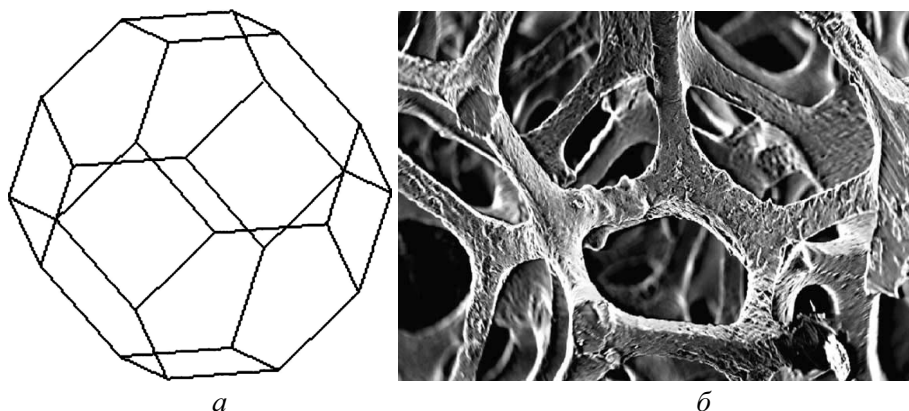


Рис. 3. Структура материала на основе ячейки тетракаидодекаэдра:
a – ячейка Кельвина; *б* – фотография открыто-ячеистой пены до нагружения,
 полученная при помощи электронного микроскопа [7]

2. Каждая перемычка однородна и имеет круглое поперечное сечение. Реальные же перемычки неоднородны по толщине, и форма поперечного сечения представляет собой разомкнутую оболочку (рис. 4).

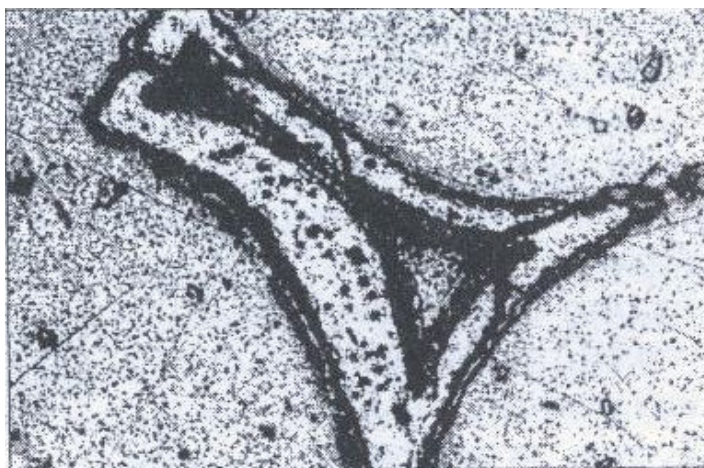


Рис. 4. Строение перемычки ВПЯМ [2]

Оценка данного упрощения дана в работе Y.W. Kwon (2002). Автор указывает на отсутствие влияния данного приближения на точность исследования, приводя сравнения полученных им результатов с экспериментальными данными.

Построение геометрии ячейки выполнялось в системе твердотельного моделирования SolidWorks. При этом последовательно решались задачи определения координат вершин ячейки, установления связи между измеряемыми механическими характеристиками со структурой ВПЯМ, с определением

зависимости пористости от геометрических параметров ячейки. Модель ячейки представлена на рис. 5.

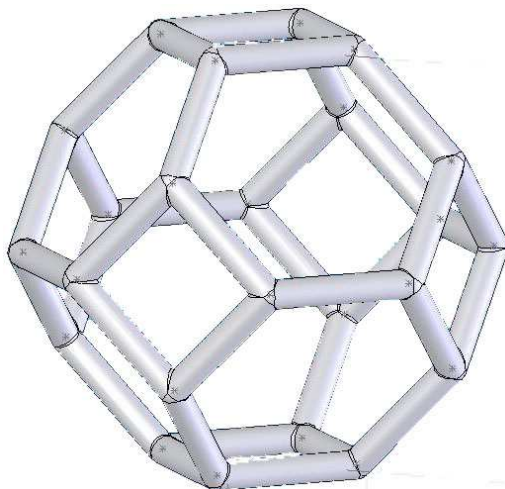


Рис. 5. Твёрдотельная модель единичной ячейки ВПЯМ

Приближенная аналитическая зависимость пористости от геометрии ячейки с перемычкой круглого сечения имеет следующий вид:

$$\Pi = 1 - K \left(\frac{d}{D} \right)^2,$$

где K – коэффициент пропорциональности для данной конструкции, равный 6,7; d – диаметр сечения перемычки; D – диаметр ячейки.

Построенная параметрическая твёрдотельная модель ячейки позволяет выполнять расчеты объемных характеристик ячеек, перемычки которых имеют произвольное сечение.

На основе вышеприведенной зависимости определялся диаметр сечения перемычки в диапазоне пористости ячейки 75–97%, при этом диаметр самой ячейки оставался постоянным.

После определения геометрических параметров ячейки была построена расчетная модель ВПЯМ. Модель состоит из 27 сопряженных между собой ячеек в форме куба, т.е. на каждое ребро куба приходится по три ячейки (рис. 6). Такое представление связано с тем, что в последующих вычислениях прочностных характеристик материала рассматривается отклик на внешнее воздействие центральной ячейки конструкции. Остальные 26 ячеек, окружающие центральную ячейку, исключаются из рассмотрения для устранения влияния краевых эффектов. В целом, на основании единичной ячейки может быть построена система из произвольного числа ячеек.

Вычисление отклика конструкции на внешнее воздействие производится в программном комплексе МКЭ ANSYS. Построенная система ячеек представляется как балочная конструкция, схема нагружения которой имитирует одноосное сжатие (см. рис. 6.). Граничные условия для данной схемы нагружения предполагали фиксацию всех перемещений узлов конструкции, лежащих в основании, и приложение к верхней плоскости конструкции сжимающего давления величиной 1 МПа. Для создания сетки конечных элементов используется трехмерный линейный балочный элемент с конечными деформациями BEAM188. Элемент построен на основе балки Тимошенко и пригоден для моделирования прямых балочных конструкций, имеющих умеренное соотношение длины и толщины. В элементе учитываются эффекты касательных (сдвиговых) деформаций. Разбиение на конечные элементы проводилось с заданием числа элементов на линию. Для получения приемлемых результатов по точности экспериментальным путем установлено достаточное число конечных элементов на одну переемычку, равное 15.

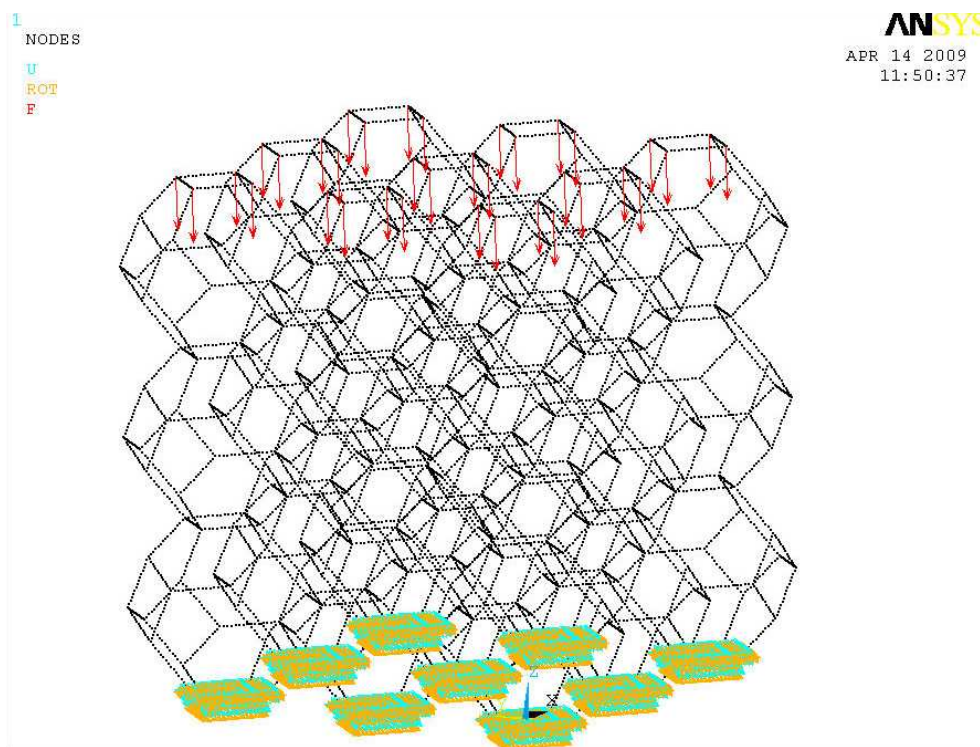


Рис. 6. Расчетная схема нагружения модели ВПЯМ в программном комплексе ANSYS

В качестве материала основы ВПЯМ используется оксид алюминия Al_2O_3 со следующими физико-механическими свойствами: модуль упруго-

сти $E = 400$ ГПа ; коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$; предельные напряжения на изгиб $[\sigma_{\text{изг}}] = 200$ МПа.

Полученные в результате решения данные о перемещениях плоскости приложения нагрузки в направлении действия внешнего давления использовались для вычисления приведенного модуля упругости конструкции:

$$E_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{вн}} \cdot h}{\Delta h},$$

где $P_{\text{вн}}$ – внешнее прикладываемое давление; h – высота конструкции, равная сумме высот трех ячеек; Δh – перемещение в направлении прикладываемого давления, определяемого в результате решения.

Расчетная схема предполагала приложение внешнего давления $P_{\text{вн}}$ в виде узловых сил F . Приложение нагрузки именно к узловым точкам связано с тем, что линии (балки), лежащие в верхней плоскости, не должны воспринимать распределенную нагрузку, приводящую к появлению лишнего изгибающего момента.

Величина узловой силы рассчитывалась следующим образом:

$$F = \frac{P_{\text{вн}} \cdot S}{N},$$

где $P_{\text{вн}}$ – прикладываемое давление, равное 1 МПа; S – площадь приложения давления, равная квадрату трех диаметров ячейки; N – число узлов, лежащих в плоскости приложения нагрузки и являющихся вершинами ячейки, для данной конструкции $N = 36$.

Вычисление величины внешнего разрушающего давления определялось из условия прочности балки на изгиб:

$$\frac{M}{W} \leq [\sigma_{\text{изг}}],$$

где M – величина суммарного изгибающего момента, действующего в центральной ячейке конструкции, Н·м; W – момент сопротивления сечения перемычки, для круга $W = \frac{\pi d^3}{32}$.

На рис. 7, а, б показаны эпюры изгибающих моментов относительно осей y, z конечных элементов. Распределение напряжений центральной ячейки под действием внешней разрушающей нагрузки показано на рис. 8.

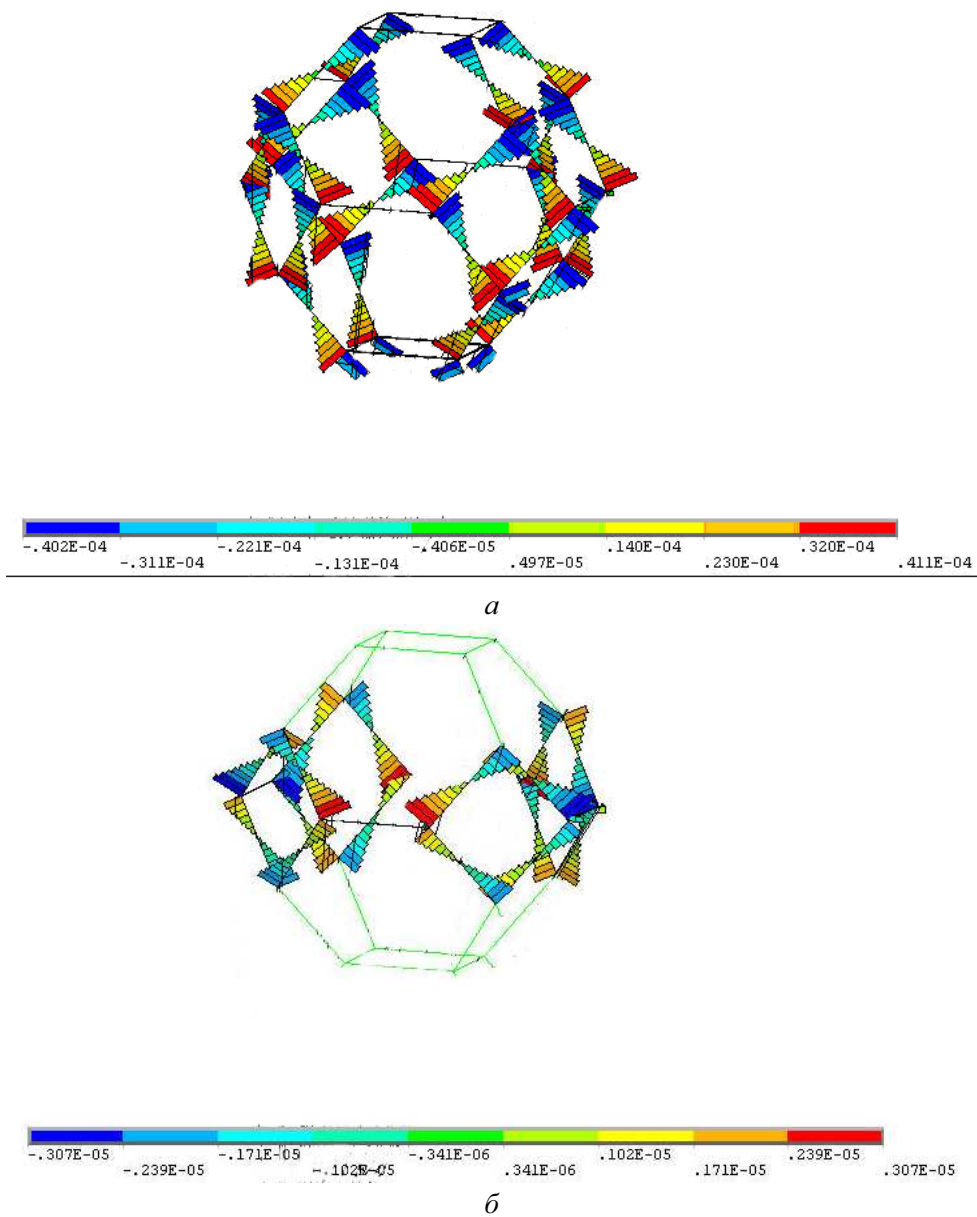


Рис. 7. Эпюры изгибающих моментов центральной ячейки конструкции:
a – относительно оси y конечных элементов; *b* – относительно оси z конечных элементов

```

1
NODAL SOLUTION
SUB =1
TIME=1
SEQV      (AVG)
DMX =.175E-05
SMN =34848
SMX =.222E+09

```

ANSYS
 APR 16 2009
 14:44:49

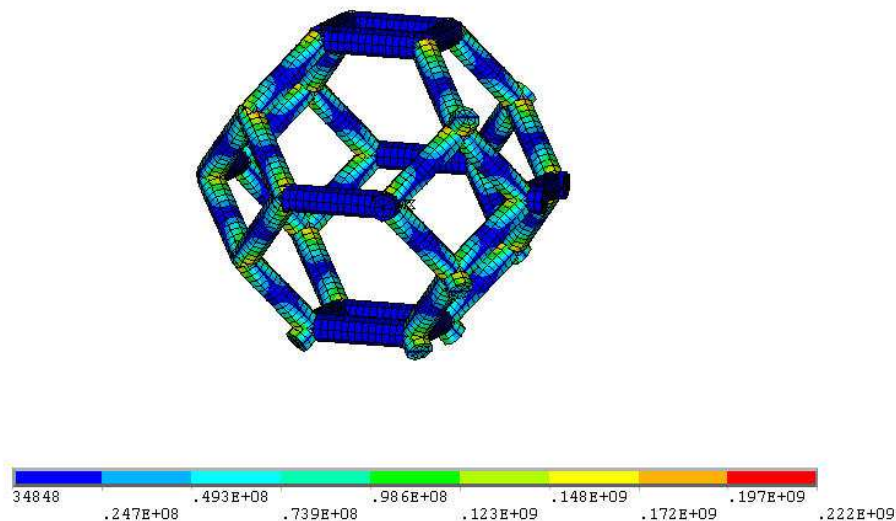


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений центральной ячейки по Мизесу под действием внешней разрушающей нагрузки

По данной методике были рассчитаны эффективные механические характеристики прочности и модуля упругости при сжатии для ВПЯМ в диапазоне пористости 75–97%. Результаты вычислений внешнего разрушающего давления и приведенного модуля упругости для конструкций с разной пористостью представлены в таблице.

| Пористость конструкции, % | Диаметр сечения перемычки, мм | Внешнее разрушающее давление, МПа | Перемещения плоскости приложения нагрузки, м | Приведенный модуль упругости, ГПа |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
| 75 | 0,268 | 3,92 | 0,577e-6 | 7,353 |
| 80 | 0,24 | 2,805 | 0,821e-6 | 5,168 |
| 85 | 0,208 | 1,822 | 0,131e-5 | 3,239 |
| 90 | 0,17 | 0,9917 | 0,263e-5 | 1,613 |
| 95 | 0,128 | 0,426 | 0,728e-5 | 0,6 |
| 97 | 0,1 | 0,204 | 0,18e-4 | 0,2413 |

Полученные результаты сравнивались с экспериментальной зависимостью прочности при сжатии ВПЯМ на основе Al_2O_3 от пористости [1] и проиллюстрированы следующим графиком (рис. 9).

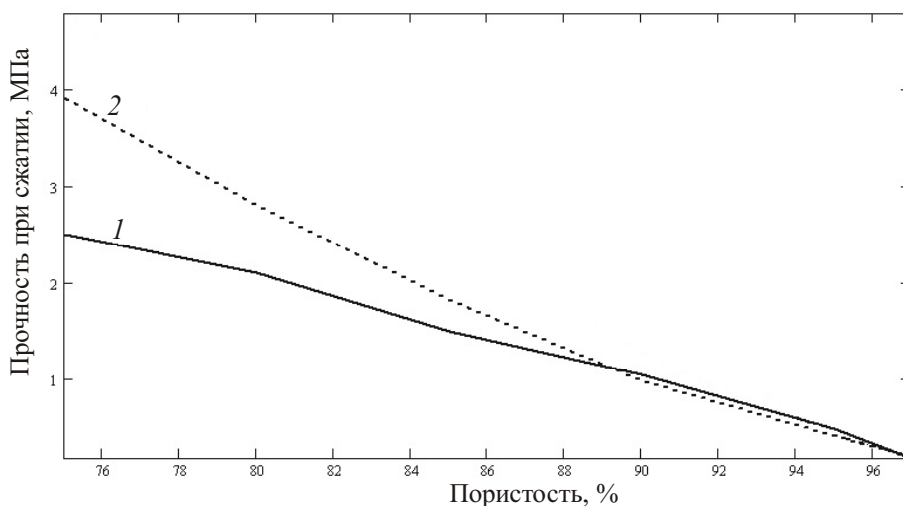


Рис. 9. Зависимость расчетной и экспериментальной прочности при сжатии ВПЯМ от общей пористости для оксида алюминия: 1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая

Таким образом, нами получены следующие выводы.

Построена модель высокопористого керамического материала, позволяющая прогнозировать его физико-механические свойства на основании механических характеристик, определенных на монолитных образцах того же материала. Модель представляет собой пространственно-стержневую конструкцию, базовым элементом которой является ячейка тетракайдодекаэдра с ребрами, представляющими собой стержни постоянной длины и произвольного поперечного сечения.

Разработана методика вычисления пористости высокопористого ячеистого материала через геометрические параметры разработанной модели. Исследованы зависимости прочностных и упругих характеристик высокопористого ячеистого материала от общей пористости на примере модели со стержнями круглого сечения.

В пределах пористости 85–97%, определяющих диапазон практического применения, получено удовлетворительное согласование теоретических результатов с экспериментальными данными. Повышение точности результатов требует учета следующих факторов: анизотропии ячейки, так как реальная ячейка имеет вытянутую форму, с отношением диаметров ячейки 2,0–2,5; реального строения перемычки, представляющей собой разомкнутую оболочку с закрытой и канальной пористостью; фактических свойств материала с учетом особенностей технологического процесса изготовления.

Список литературы

1. Анциферов В.Н., Порозова С.Е. Высокопористые ячеистые материалы. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 1996. – 207 с.
2. Анциферова И.В., Ханов А.М, Сиротенко Л.Д. Оксидные композиционные материалы. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 149 с.
3. Кулаков С.В. Моделирование структуры и расчет упругих и теплофизических свойств высокопористых ячеистых материалов // Проблемы современных материалов и технологий. – Пермь, 1992. – С. 131–149.
4. Макаров А.А. Высокопористые ячеистые материалы в устройствах каталитической очистки газовых выбросов: дис. ... канд. техн. наук; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – 147 с.
5. Zhu H.X., Knott J.F., Mills N.J. Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells // J. Mech. Phys. Solids. – 1997. – Vol. 45. – № 3. – P. 319–343.
6. Mills N.J. Polymer Foams Handbook: Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide. – Butterworth Heinemann, 2007. – 564 p.
7. Kwon Y.W., Cooke R.E., Park C. Representative unit-cell models for open-cell metal foams // J. Materials Science and Engineering A343. – 2003. – P. 63–70.

Получено 20.01.2010