

Шалимов А.С., Ташкинов М.А. Моделирование деформирования и разрушения пористых неоднородных сред с учетом особенностей их морфологического строения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 175–187. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.15

Shalimov A.S., Tashkinov M.A. Modeling of deformation and fracture of porous heterogeneous media taking into account their morphological composition. PNRPU Mechanics Bulletin, 2020, no. 4, pp. 175-187. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.15



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.15

УДК 539.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОРИСТЫХ СРЕД С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

А.С. Шалимов, М.А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 09 ноября 2020 г.  
Принята: 25 ноября 2020 г.  
Опубликована: 30 декабря 2020 г.

#### Ключевые слова:

пенометаллы, представительный объем, открыто-ячеистая структура и закрыто-ячеистая структура, разрушение, деградация упругих свойств, модель Джонсона – Кука.

### АННОТАЦИЯ

Исследуется механическое поведение и разрушение пористых материалов с алюминиевой матрицей. Целью работы является создание численных моделей разрушения таких материалов и выявление зависимостей характера процессов разрушения от особенностей структурной морфологии. Компьютерные модели представительных объемов данных материалов представляют собой случайные неоднородные структуры с ячейками закрытого и открытого типов. Для создания трехмерных геометрических моделей структур закрытого типа использовались методы последовательного синтеза сфер, с возможностью их взаимного пересечения. Для создания моделей взаимопроникающих структур открытого типа используются методы, основанные на аналитическом определении поверхностей, разделяющих две фазы.

В данной работе были изучены и реализованы три подхода к численному моделированию разрушения представительных объемов пористых материалов. Первый подход – это реализация модели упругого поведения и накопления повреждений, основанная на деградации упругих свойств в соответствии с выполнением критерия максимальных напряжений с понижением коэффициентов матрицы жесткости в отдельных элементах. Второй подход – это реализация той же модели, но с удалением разрушенных элементов. Третий подход основан на модели упругопластического поведения и разрушения Джонсона – Кука.

Численное моделирование представительных объемов проводилось с помощью конечно-элементного анализа с использованием каждого из вышеобозначенных подходов. Влияние внутреннего строения представительных объемов пористых материалов на процессы деформирования и разрушения исследовано на примере нескольких структур открытого и закрытого типа. Изучено влияние концентраторов напряжений на распределение напряжений в представительных объемах и характер их последующего разрушения.

© ПНИПУ

© Шалимов Александр Сергеевич – асп., e-mail: [Shalimov96@pstu.ru](mailto:Shalimov96@pstu.ru), ID: [0000-0002-8729-6144](https://orcid.org/0000-0002-8729-6144)  
Ташкинов Михаил Анатольевич – к.ф.-м.н., доц., e-mail: [m.tashkinov@pstu.ru](mailto:m.tashkinov@pstu.ru), ID: [0000-0003-4660-0020](https://orcid.org/0000-0003-4660-0020).

Alexander S. Shalimov – PhD Student, e-mail: [Shalimov96@pstu.ru](mailto:Shalimov96@pstu.ru), ID: [0000-0002-8729-6144](https://orcid.org/0000-0002-8729-6144)  
Mikhail A. Tashkinov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor,  
e-mail: [m.tashkinov@pstu.ru](mailto:m.tashkinov@pstu.ru), ID: [0000-0003-4660-0020](https://orcid.org/0000-0003-4660-0020).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## MODELING OF DEFORMATION AND FRACTURE OF POROUS MEDIA TAKING INTO ACCOUNT THEIR MORPHOLOGICAL COMPOSITION

A.S. Shalimov, M.A. Tashkinov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 09 November 2020  
Accepted: 25 November 2020  
Published: 30 December 2020

#### Keywords:

foam metals, representative volume element, open-cell structure and closed-cell structure, failure, degradation of elastic properties, Johnson-Cook model.

### ABSTRACT

This paper investigates the mechanical behavior and fracture of porous materials with an aluminum matrix. The purpose of the work was to create numerical models of failure of representative volume elements of such materials and to reveal the dependences of the nature of the failure processes on their structural morphology.

Representative volume elements of these materials are random non-uniform structures of closed-cell and open-cell types. To create three-dimensional geometric models of the closed-cell structures, methods of sequential synthesis the possibility of their mutual intersection were used. For creation of models of interpenetrating structures of the open-cell type, methods based on the analytical determination of surfaces separating the two phases are used.

In this paper, three approaches to fracture mechanics of representative volume elements of porous materials were studied and implemented. The first approach is an implementation of the elastic model and damage accumulation based on elastic properties degradation in accordance with the criterion of maximum stresses with reduction of the stiffness matrix coefficients in individual elements. The second approach is an implementation of the same model, but with removal of the failed elements. The third approach is based on the Johnson-Cook elastic plastic behavior and fracture model.

Numerical modeling of the representative volumes was carried out with finite element analysis using each of the above approaches. The influence of the internal structure of the representative volumes of the porous materials on the processes of deformation and failure was studied on the example of several structures of open-cell and closed-cell types. The influence of stress concentrators on the distribution of stresses in representative volumes and character of their subsequent failure has been studied.

© PNRPU

### Введение

Неоднородные материалы – огромный по своему содержанию и своей перспективности класс материалов. Их использование является одним из современных подходов к улучшению характеристик конструкций и механизмов. Особый класс таких материалов образуют ячеистые материалы, которые, как правило, представлены металлическими пенами. Они представляют собой пористую среду с изолированными или взаимопроницаемыми фазами. В наши дни такой тип материалов нашел свое применение и приобрел большое значение в качестве легких материалов, способных выполнять различные специфические задачи, такие как энерго- и звукопоглощение, фильтрация, уменьшение веса и др. [1–4].

Разработанные подходы к изучению ячеистых материалов обычно связаны с математическим моделированием, которое в значительной степени опирается на экспериментальные данные о микроструктурной геометрии, а также на данные о поведении отдельных структурных элементов. В то время как эффективные механические свойства могут быть получены традиционными экспериментальными методами, случайность микроструктуры затрудняет получение вариаций образцов с контролируемыми микромасштабными параметрами для изучения связи между изменениями внутрен-

него состояния материала и его эффективным откликом. Таким образом, решение было найдено в создании реалистичного представления микроструктурной морфологии в моделях представительных объемов, которые подкреплены результатами ряда экспериментальных методик (таких как рентгеновская компьютерная микротомография, сканирующий электронный микроскоп и др.) [5–12].

Разрушение неоднородных сред, как правило, сопряжено с зарождением и развитием дефектов на микромасштабном уровне [12–15]. В данной работе исследуется механическое поведение и разрушение пористых материалов с алюминиевой матрицей. Представительные объемы данных материалов представляют собой случайные неоднородные структуры закрытого и открытого типов. В структурах открытого типа фазы пор и матрицы являются взаимопроницаемыми, в то время как в закрытых структурах поры изолированы. Существуют различные методы, с помощью которых можно спрогнозировать разрушение структур подобного типа [2, 7, 23, 8, 16–22]. В данной работе были изучены и реализованы три таких подхода.

Первый подход – это численная реализация модели упругого поведения и накопления повреждений, основанная на деградации упругих свойств с понижением коэффициентов матрицы жесткости в отдельных элементах при выполнении критерия максимальных нормальных напряжений [24–27].

Второй подход – это численная реализация модели упругого поведения и накопления повреждений, основанная на деградации упругих свойств с удалением конечных элементов сетки при выполнении критерия максимальных нормальных напряжений.

Третий подход – это численная реализация модели Джонсона – Кука упругопластического поведения и разрушения, основанная на деградации упругих свойств с удалением конечных элементов сетки при выполнении критерия разрушения Джонсона – Кука [28].

Целью данной работы является создание численных моделей разрушения неоднородных пористых сред с алюминиевой матрицей, а также моделирование и изучение влияния параметров микроструктуры на процессы разрушения представительных объемов металлов под действием растягивающей одноосной нагрузки.

Разрушение представительных объемов пористых материалов с алюминиевой матрицей моделировалось методом конечных элементов в прикладном пакете Abaqus. Для разных моделей разрушения выбирался один из встроенных решателей Abaqus/Standard или Abaqus/Explicit. Моделирование геометрии для структур закрытого типа было выполнено на основе случайного расположения сфер в представительном объеме. Структуры открытого типа получались на основе разделения фаз с использованием функции случайных гауссовских полей.

### 1. Модели накопления повреждений и разрушения в матрице

Модель деградации упругих свойств реализуется за счет переменных внутреннего состояния  $D_{ij}$ , характеризующих развитие микроструктурных повреждений [29]. Эти переменные называются коэффициентами повреждений.

$$\begin{cases} \sigma_{ij}^* = C(D_{ij})\epsilon_{ij}, \\ \epsilon_{ij} = S(D_{ij})\sigma_{ij}^*, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}^*$  – тензор напряжений с учетом тензора поврежденности;  $\epsilon_{ij}$  – тензор деформаций;  $C(D_{ij})$  и  $S(D_{ij})$  – тензора матриц жесткости и податливости соответственно. Значение этих переменных возрастает при выполнении критерия разрушения, при этом изменяются значения компонент матрицы податливости:

$$S(D_{ij}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{E(1-D)} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E(1-D)} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E(1-D)} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{\mu(1-D)} & 0 & 0 \\ sym. & & & & \frac{1}{\mu(1-D)} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{\mu(1-D)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

В данной работе все коэффициенты деградации одинаковы и равны 0,9. Когда напряжение в точке удовлетворяют критерию разрушения, жесткость снижается до определенного значения в соответствии с заранее заданным коэффициентом деградации либо происходит удаление конечного элемента.

Использование нелинейной модели механического поведения материала, включающей в себя стадию пластического деформирования, позволяет точнее смоделировать разрушение образца, когда рабочие нагрузки достаточно большие. Модель Джонсона – Кука – это модель поведения пластичного материала, которая может описать напряженно-деформируемое состояние образца за счет аналитической функции, зависящей от пластической деформации, скорости деформации и температуры. Модель была разработана Г.Р. Джонсоном и В. Куком (G.R. Johnson and W.H. Cook) в 1985 г. [28]. Ученые предложили модель, учитывающую деформационное упрочнение и зависимость напряжения от скорости деформирования и температуры. Впоследствии эта модель стала одной из ключевых упругопластических моделей материалов и показывает достаточно хорошее соответствие с экспериментальными данными. Использование в модели дополнительных факторов, которые не учитываются, например, в обычной степенной пластической модели, позволяют описать высокоскоростные динамические задачи. Модель пластичности Джонсона – Кука является частным случаем модели пластичности Мизеса с аналитическими формами закона упрочнения и зависимостью от скорости деформации. Данная пластическая модель может использоваться в сочетании со специальными моделями динамического разрушения и с моделями прогрессирующего разрушения для определения законов развития повреждения.

Интенсивность напряжений после предела текучести выражается как

$$\bar{\sigma} = \left[ A + B \cdot (\bar{\epsilon}^{pl})^n \right] \cdot \left[ 1 + C \cdot \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \cdot (1 - \hat{\theta}^m), \quad (3)$$

где  $\bar{\epsilon}^{pl}$  – интенсивность накопленной пластической деформации;  $\bar{\epsilon}$  – интенсивность скорости пластической деформации;  $\dot{\epsilon}_0$  – скорость пластической деформации (обычно  $\dot{\epsilon}_0 = 1c^{-1}$ ), при которой предварительно определяются необходимые константы материала  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$ ;  $m$  – параметр материала;  $\hat{\theta}$  – безразмерная температура, определяемая как

$$\hat{\theta} \equiv \begin{cases} 0 & \text{for } \theta < \theta_{trans}, \\ (\theta - \theta_{trans}) / (\theta_{melt} - \theta_{trans}) & \text{for } \theta_{trans} < \theta \leq \theta_{melt}, \\ 1 & \text{for } \theta > \theta_{melt}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\theta$  – текущая температура;  $\theta_{melt}$  – температура плавления;  $\theta_{trans}$  – температура переходного состояния (обычно равна комнатной температуре), определяемая

как температура, при которой или ниже которой отсутствует температурная зависимость интенсивности напряжений.

Модель упрочнения Джонсона – Кука может быть использована как в динамических задачах, так и в статических. Модель динамического разрушения Джонсона – Кука основана на значении интенсивности пластической деформации. Параметр разрушения  $\omega$  определяется как

$$\omega = \Sigma \left( \frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\epsilon^f} \right), \quad (5)$$

где  $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$  – приращение интенсивности пластической деформации;  $\epsilon^f$  – деформация при разрушении. Суммирование производится на каждом шаге расчета.

Деформация при разрушении принимается зависимой от безразмерного коэффициента жесткости напряженного состояния, безразмерного параметра скорости пластической деформации и безразмерной температуры и имеет вид

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\theta}), \quad (6)$$

где  $d_1 - d_5$  – параметры материала;  $p$  – давление;  $q$  – напряжения Мизеса.

Предполагается, что разрушение происходит, когда параметр разрушения превышает единицу  $\omega \geq 1$ . При реализации данного подхода с использованием метода конечных элементов, по мере выполнения критерия разрушения, конечный элемент выключается из дальнейшего расчета и удаляется. Использование модели динамического разрушения Джонсона – Кука требует использования модели пластичности Джонсона – Кука, но не обязательно предполагает зависимость от скорости деформации.

## 2. Численная реализация и результаты

Влияние внутреннего строения представительных объемов пористых материалов на процессы деформирования и разрушения исследовано на примере нескольких структур открытого и закрытого типа.

Для создания трехмерных геометрических моделей структур закрытого типа использовались методы последовательного синтеза сфер, с возможностью их взаимного пересечения [30]. Для создания моделей взаимопроникающих структур открытого типа используются методы, основанные на аналитическом определении поверхностей, разделяющих две фазы. Одним из методов разработки случайных взаимопроникающих структур является определение границы раздела между двумя фазами по срезу значений функции случайных гауссовских полей. Тогда структуру можно создать в два этапа: 1) генерация случайного поля в двумерном или трехмерном пространстве на основе гауссовской случайной

функции, представленной в виде ряда Фурье, содержащего случайные величины [31, 32]; 2) выполнение срезов уровня для сгенерированного поля на основе условия, по которому точки случайного поля относятся к первой или второй фазе.

Были получены четыре модели представительных объемов: две модели закрытого типа с объемной долей включений 0,70 и 0,71 и размерами представительного объема  $10 \times 10 \times 10$  мм, а также две модели открытого типа с объемной долей включений 0,79 и 0,86 и размерами представительного объема  $20 \times 20 \times 20$  мм. Модели были подвержены одинаковой нагрузке в виде одноосного растяжения с максимальным значением, достаточным для инициации процессов разрушения. Для каждого представительного объема изучено поведение материала при реализации каждой из моделей разрушения. Таким образом, структуры под номерами 1–4 (рис. 1–4) различаются внутренним строением и размерами представительного объема. Для целей настоящей работы были созданы конечно-элементные модели на основе четырехузловых тетраэдрических элементов, соответствующие исходным геометрическим структурам.

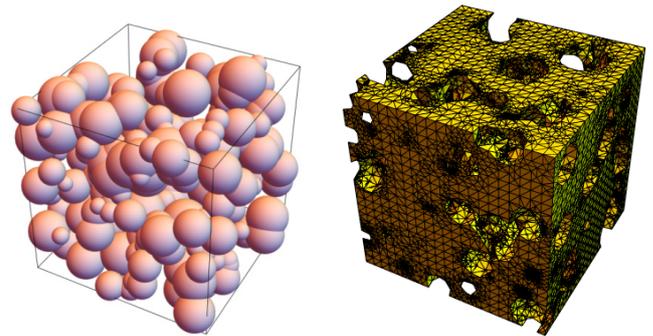


Рис. 1. Структура № 1 (геометрия и КЭ сетка): структура закрытого типа с объемной долей пористой фазы 0,70, количеством включений 278 и размерами куба  $10 \times 10 \times 10$  мм

Fig. 1. Structure No. 1 (geometry and mesh): closed-cell structure with a volume fraction of porous phase 0,70, the number of inclusions is 278 and the size of the cube is  $10 \times 10 \times 10$  mm

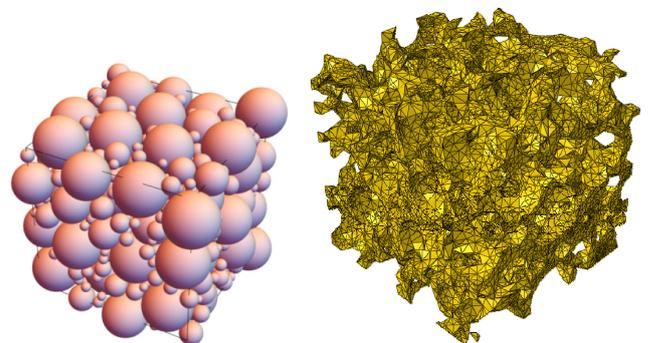


Рис. 2. Структура № 2 (геометрия и КЭ сетка): структура закрытого типа с объемной долей пористой фазы 0,71, количеством включений 711 и размерами куба  $10 \times 10 \times 10$  мм

Fig. 2. Structure No. 2 (geometry and mesh): closed-cell structure with a volume fraction of the porous phase 0,71, the number of inclusions is 711 and the size of the cube is  $10 \times 10 \times 10$  mm

Для реализации моделей деградации упругих свойств в представительных объемах использованы возможности подключаемых к прикладному пакету Abaqus дополнительных пользовательских подпрограмм. Функция изменения свойств материала во время расчета в Abaqus/Standard заложена в подпрограмме UMAT.

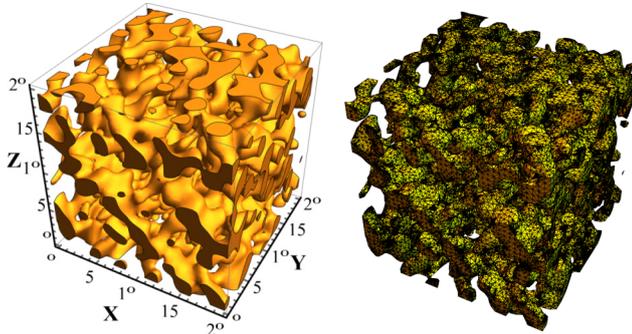


Рис. 3. Структура № 3 (геометрия и КЭ сетка): структура открытого типа с объемной долей пористой фазы 0,79 и размерами куба 20×20×20 мм

Fig. 3. Structure No. 3 (geometry and mesh): the open-cell structure with the volume fraction of the porous phase is 0.79 and the size of the cube is 20×20×20 mm

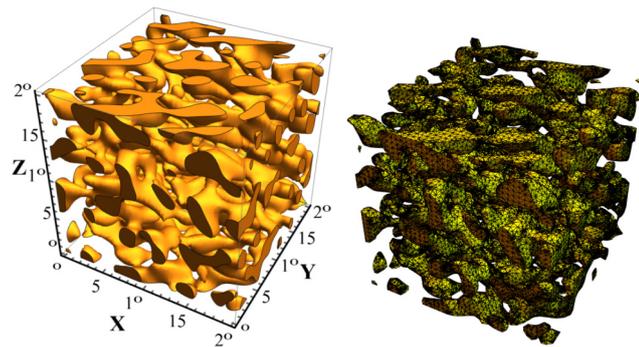


Рис. 4. Структура № 4 (геометрия и КЭ сетка): структура открытого типа с объемной долей пористой фазы 0,86 и размерами куба 20×20×20 мм

Fig. 4. Structure No. 4 (geometry and mesh): open-cell structure with the volume fraction of the porous phase is 0.86 and the size of the cube is 20×20×20 mm

С помощью данной подпрограммы можно смоделировать необходимую модель материала, которой нет в библиотеке доступных материалов Abaqus. Был написан пользовательский код, в котором описывается модель пористого изотропного материала из алюминия с разовой деградацией упругих свойств на 90 % в случае выполнения критерия разрушения по максимальным нормальным напряжениям. В течение каждого временного шага вычисления подпрограмма вызывается и позволяет Abaqus/Standard получать требуемую информацию о состоянии материала и его механическом отклике.

Для моделирования разрушения с помощью модели прогрессирующего разрушения с удалением элементов был выбран один из методов, основанный на использовании пользовательской подпрограммы VUMAT для

изменения свойств материала во время расчета в Abaqus/Explicit. В данной модели разрушения элементы будут удаляться из сетки при выполнении критерия разрушения. При этом узлы таких элементов больше не влияют на жесткость модели, и напряжения в них обращаются в ноль. Был написан код, в котором описывается модель изотропного материала из алюминия с возможностью удаления отдельного конечного элемента из сетки в случае выполнения критерия разрушения по максимальным нормальным напряжениям. Алгоритм выполнения этой подпрограммы аналогичен алгоритму UMAT. Формируется поле значений переменных состояния (SDV), которое изменяется от 0 до 1. Ноль соответствует элементам, в которых выполнен критерий и которые были удалены из сетки.

Abaqus/Explicit предлагает общую реализацию модели разрушения Джонсона – Кука в рамках семейства критериев возникновения повреждений. Элементы, удовлетворяющие критерию разрушения, удаляются.

Был исследован процесс разрушения представительных объемов при растягивающей одноосной нагрузке в вертикальном направлении, приложенной в перемещениях  $u = 0,06$  мм. Противоположный край образца жестко закреплен. Граничные условия приложены к закрепленным к образцу пластинам. Были выбраны следующие свойства алюминиевого материала матрицы: плотность материала  $\rho = 2,7$  кг/мм<sup>3</sup>, модуль упругости  $E = 70\,000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , критическое значение максимальных главных напряжений  $\sigma_c = 250$  МПа.

Значения полей компоненты 22 тензора деформации для структур № 1–4 при использовании метода деградации упругих свойств с использованием пользовательской подпрограммы UMAT представлены на рис. 5–8. Значения полей повреждения для структур № 1 и № 2 при использовании метода деградации упругих свойств с использованием пользовательской подпрограммы VUMAT приведены на рис. 9, 10. Согласно этой модели разрушения в процессе нагружения представительного объема в каждом конечном элементе напряжения сравниваются с прочностными константами. При превышении критических значений происходит рост поврежденности, отражающийся в значительном превышении упругих свойств, что приводит к перераспределению напряжений, каскадному распространению повреждений и последующему разрушению представительного объема.

На рисунках наглядно представлено распространение повреждений от одного концентратора к другому, что приводит к полному разрушению представительного объема. Сложная структура представительного объема как открытого, так и закрытого типа имеет множество начальных зон зарождения повреждений при деформировании (см. рис. 5–8). С увеличением значения приложенной нагрузки происходит их слияние в одну макротрещину (см. рис. 9, 10).

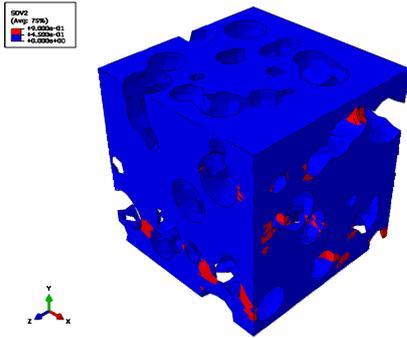


Рис. 5. Значение поля повреждений структуры № 1

Fig. 5. Value of the damage field of structure No. 1

Деформирование упругопластического материала матрицы представительного объема задается в соответствии с законом Джонсона – Кука. Для реализации упругопластической модели деформационного поведения мате-

риала Джонсона – Кука были выбраны следующие свойства алюминиевого материала матрицы: плотность материала  $\rho = 2,7 \text{ кг/мм}^3$ , модуль упругости  $E = 70\,000 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , пластические константы  $A = 324 \text{ МПа}$ ,  $B = 114 \text{ МПа}$ ,  $n = 0,42$ ,  $m = 1,34$ ,  $C = 0,002$ . Необходимые критические постоянные имеют значения:  $d_1 = -0,77$ ,  $d_2 = 1,45$ ,  $d_3 = 0,47$ ,  $d_4 = 0$ ,  $d_5 = 1,6$ .

Значения полей напряжений по Мизесу в структурах № 1–4 при использовании модели Джонсона – Кука представлены на рис. 11–14. Из рисунков видно, что концентраторы напряжений в изученных моделях наблюдались в тонких связках (лигаментах) и приводили к распространению повреждений на соседние участки структуры. Было отмечено, что даже если нагрузка прилагалась по 2-му направлению (ось  $Y$ ), то случайность структуры приводила к неравномерному накоплению повреждений в разных направлениях.



Рис. 6. Значение поля повреждений структуры № 2

Fig. 6. Value of the damage field of structure No. 2



Рис. 7. Значение поля повреждений структуры № 3

Fig. 7. Value of the damage field of structure No. 3



Рис. 8. Значение поля повреждений структуры № 4

Fig. 8. Value of the damage field of structure No. 4

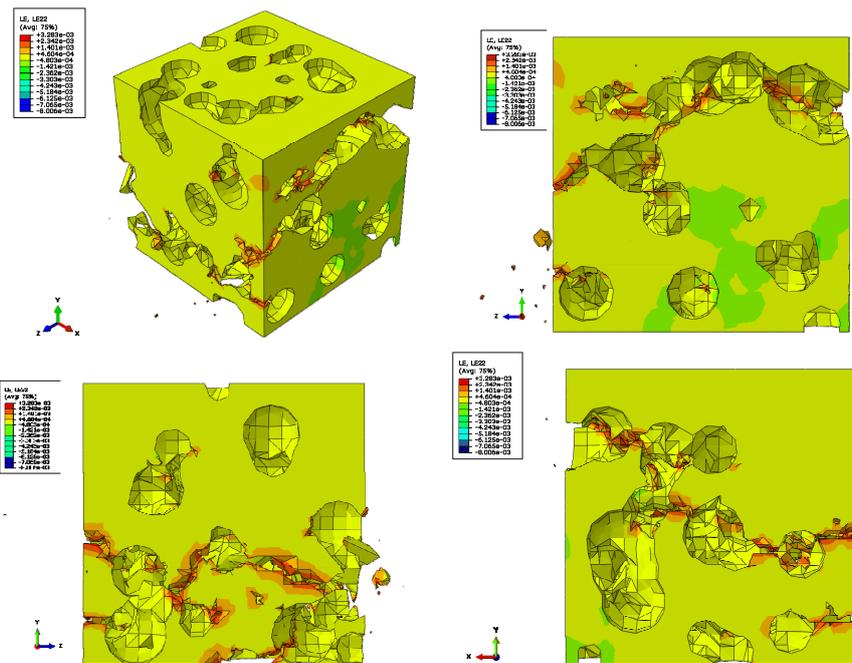


Рис. 9. Поле компоненты 22 тензора деформаций в структуре № 1

Fig. 9. Field of the component of strain tensor 22 for structure No. 1

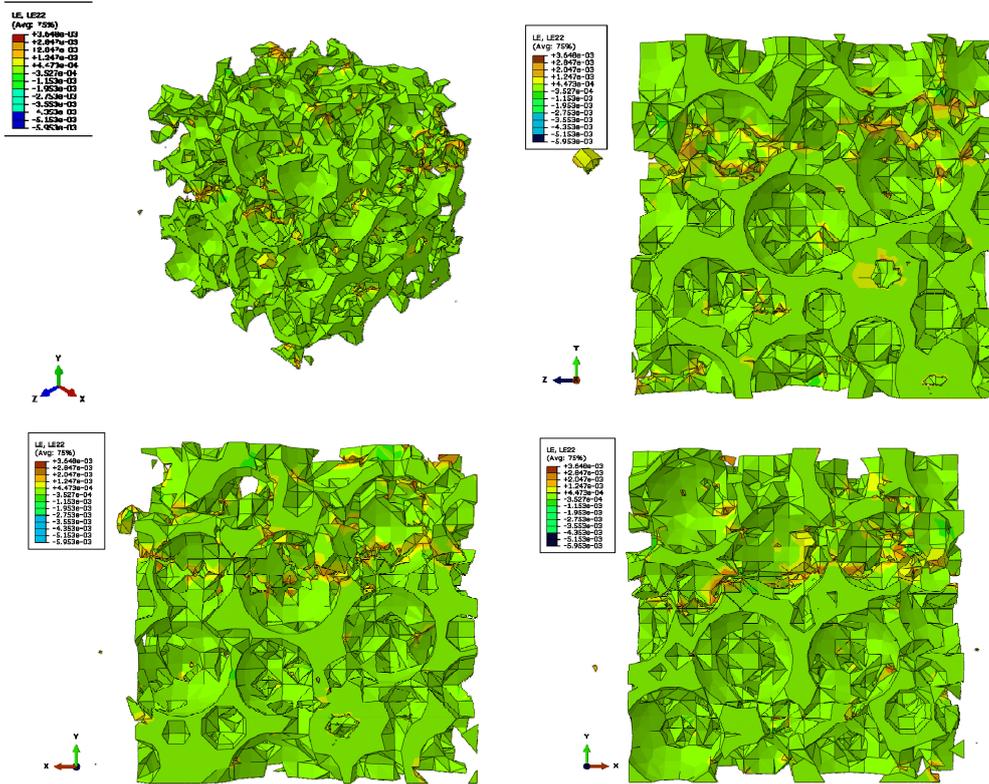


Рис. 10. Поле компоненты 22 тензора деформаций в структуре № 2

Fig. 10. Field of the component of strain tensor 22 for structure No. 2

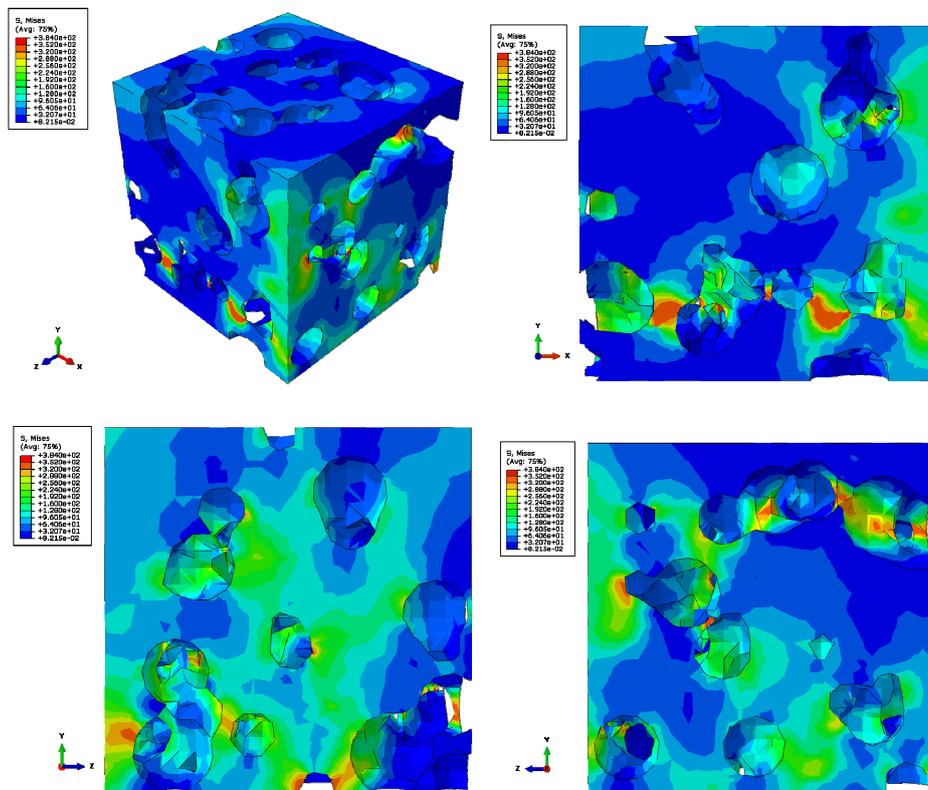


Рис. 11. Поля напряжений по Мизесу в структуре № 1 на стадии пластического деформирования, предшествующей разрушению

Fig. 11. Mises stress fields in structure No. 1 at the stage of plastic deformation prior to failure

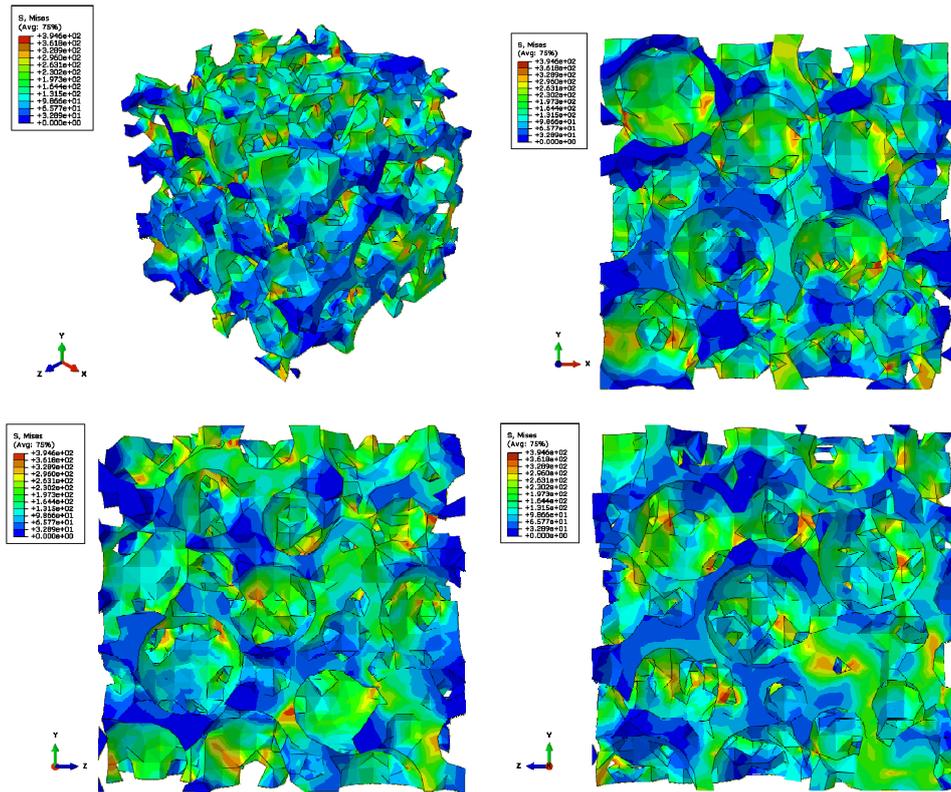


Рис. 12. Поля напряжений по Мизесу в структуре № 2 на стадии пластического деформирования, предшествующей разрушению

Fig. 12. Mises stress fields in structure No. 2 at the stage of plastic deformation prior to fracture

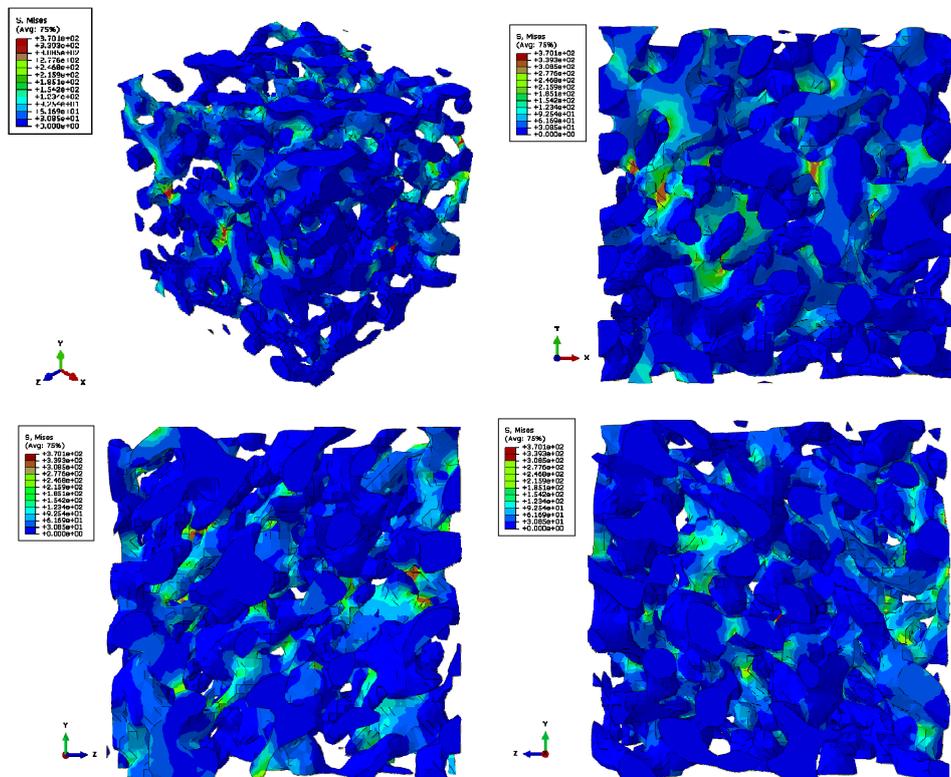


Рис. 13. Поля напряжений по Мизесу в структуре № 3 на стадии пластического деформирования, предшествующей разрушению

Fig. 13. Mises stress fields in structure No. 3 at the stage of plastic deformation prior to failure

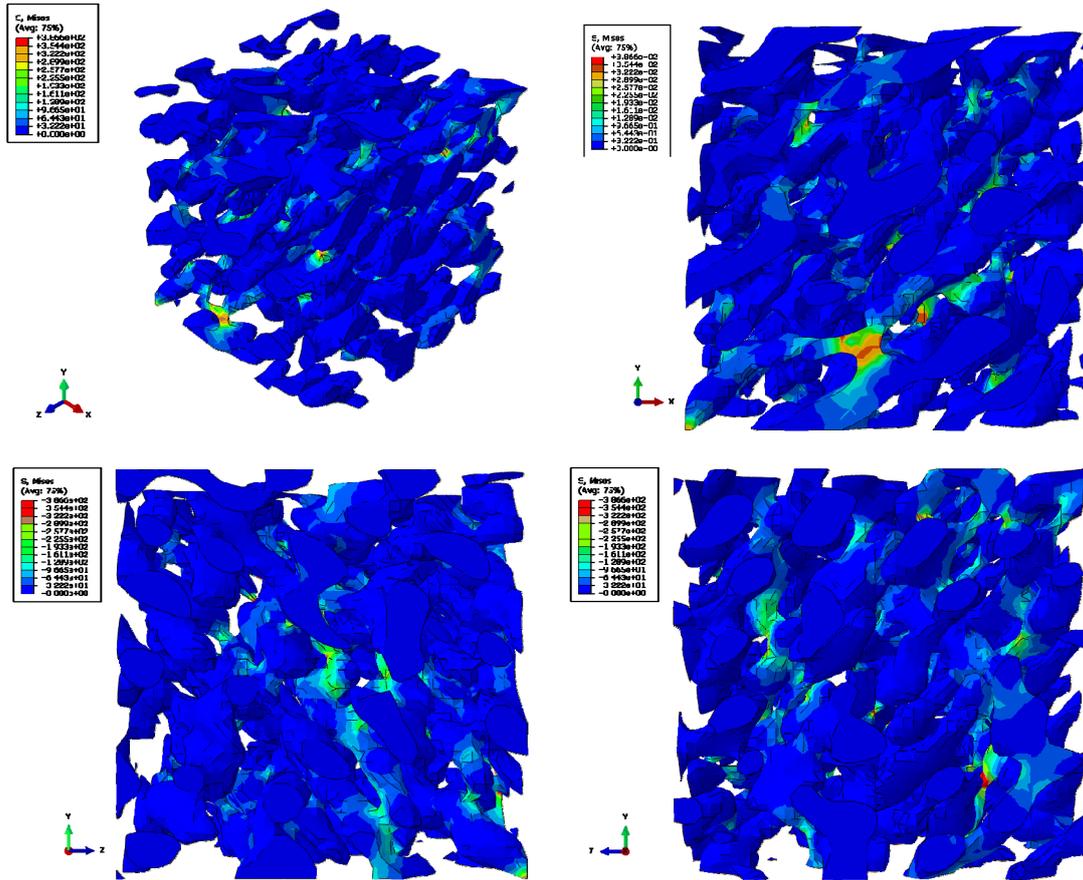


Рис. 14. Поля напряжений по Мизесу в структуре № 4 на стадии пластического деформирования, предшествующей разрушению

Fig. 14. Mises stress fields in structure No. 4 at the stage of plastic deformation prior to fracture

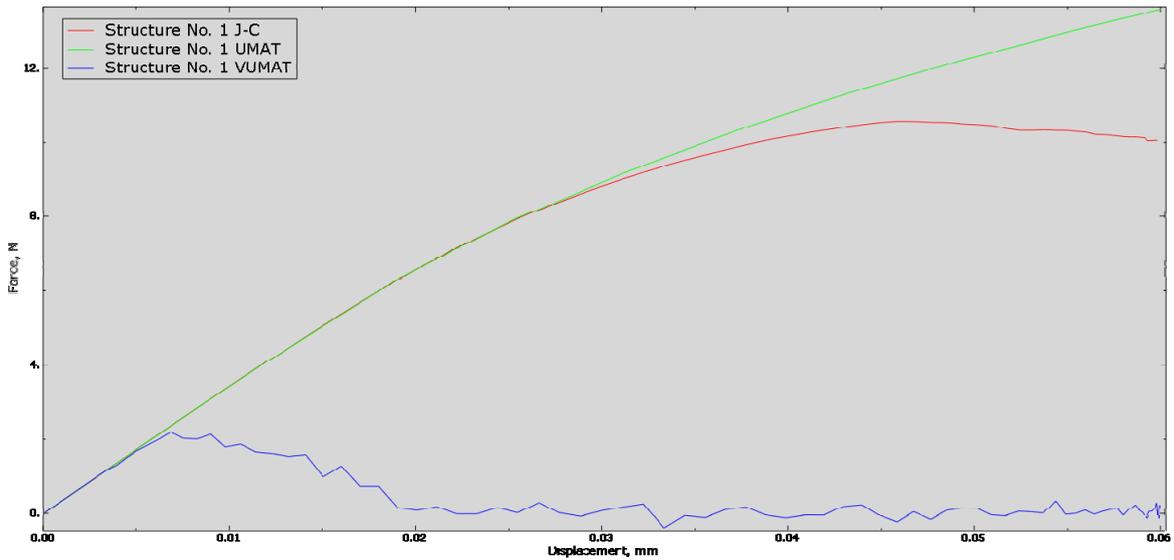


Рис. 15. График «сила – перемещение» для трех моделей разрушения структуры № 1

Fig. 15. The force-displacement graph for three models of destruction of structure No. 1

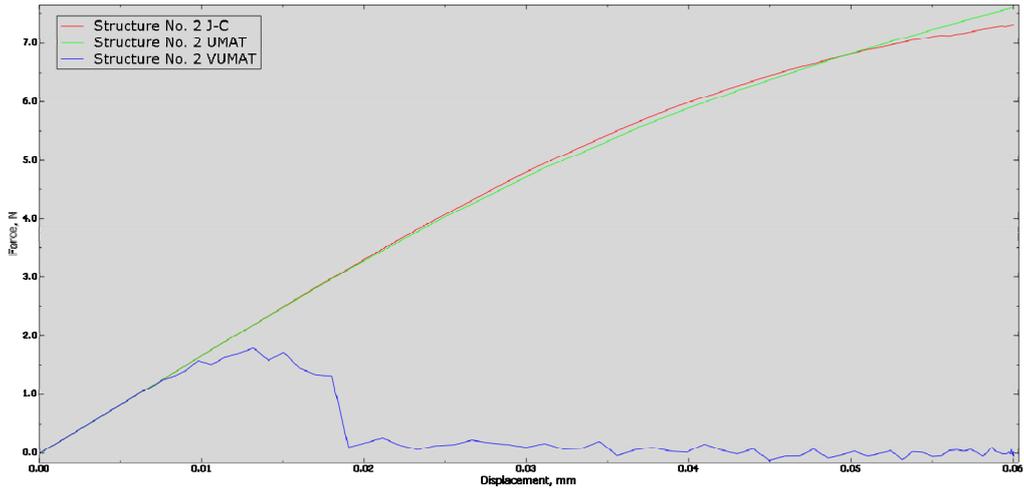


Рис. 16. График «сила – перемещение» для трех моделей разрушения структуры № 2

Fig. 16. Force-displacement graph for three models of failure for structure No. 2

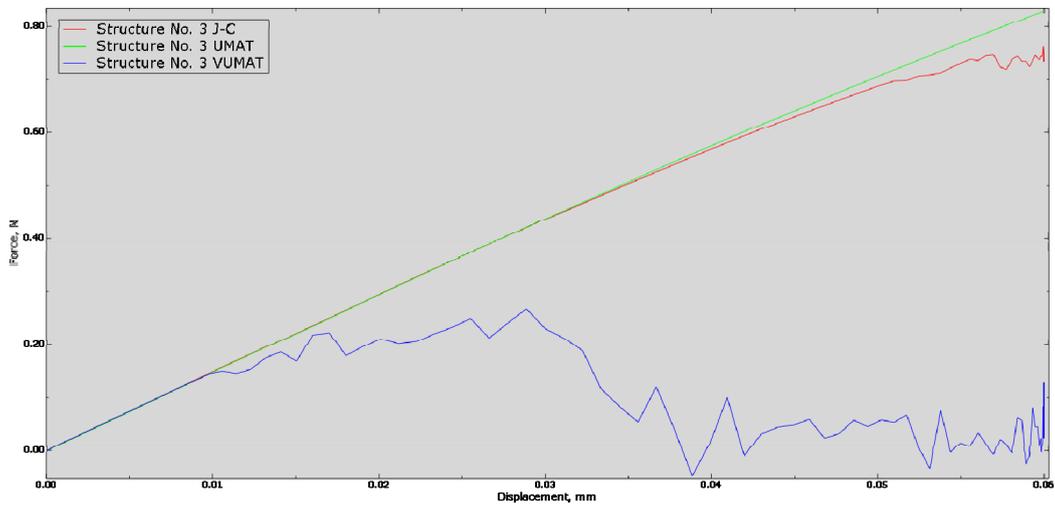


Рис. 17. График «сила – перемещение» для трех моделей разрушения структуры № 3

Fig. 17: Force-displacement graph for three models of failure for structure No. 3

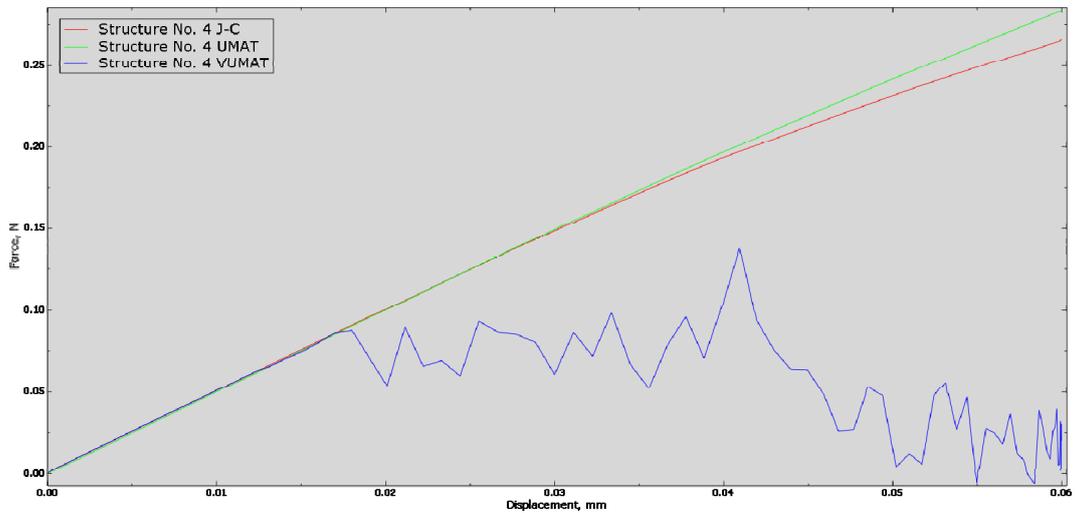


Рис. 18. График «сила – перемещение» для трех моделей разрушения структуры № 4

Fig. 18. Force-displacement graph for three models of failure for structure No. 4

Ниже приведены результаты сравнения графиков.

На полученных графиках сильно выражено различие между представительными объемами закрытого типа со стороной куба 10 мм и представительными объемами открытого типа со стороной куба 20 мм. Очевидно, что при одинаковых нагрузках представительный объем меньшего размера будет испытывать большую реакционную силу.

Графики, отражающие модель деградации с использованием UMAT и модель разрушения по Джонсону – Куку, имеют выраженный гладкий нелинейный вид после выполнения критерия разрушения в элементах. Обратная ситуация наблюдается на графике, показывающем зависимость силы от перемещения для модели деградации свойств с использованием VUMAT, поскольку на нем очень много скачкообразных изменений. Это говорит о том, что напряженно-деформированное состояние изменяется очень быстро при каждом удалении элементов, в которых выполняется критерий разрушения. Кривая модели с VUMAT расположена намного ниже остальных кривых, и по ней можно судить лишь о начале разрушения.

С помощью модели разрушения Джонсона – Кука установлено влияние концентраторов напряжений и кластеризации пор на распределение полей напряжений в представительных объемах и характер их последующего разрушения. Видно, что концентраторы напряжений наблюдаются не только в наиболее тонких областях матрицы, но и в окружающей их окрестности. В то же время, за счет перераспределения нагрузки, напряжения в более отдаленных зонах могут быть меньше, несмотря на схожую морфологию. Таким образом, на неравномерности распределения напряжений сказывается, в числе прочего, накопление повреждений на начальных этапах нагружения.

В структурах закрытого типа наблюдается более равномерное распределение напряжений, чем в структурах открытого типа. В то же время можно говорить и о более равномерном возникновении концентраторов напряжений по всей структуре представительного объема и, как следствие, возникновении множественных очагов разрушения, соединяющихся между собой через закрытые поры.

Установлено, что объемная доля пористой фазы представительного объема играет существенную роль при деформировании пористых структур. Даже небольшое различие в объемной доле отражается на кривых нагружения. При этом различия присутствуют уже при упругом деформировании, что подтверждает влия-

ние морфологии на механическое поведение. Было установлено, что сам тип структуры (закрытая или открытая) не оказывает существенного влияния на упругопластическую стадию деформирования при равной объемной доле пор. Однако для структур закрытого типа может быть характерно более хрупкое поведение при разрушении.

## Заключение

Моделирование процессов упругопластического деформирования и разрушения в представительных объемах пористого материала с алюминиевой матрицей было выполнено с помощью трех подходов. В частности, получены результаты моделирования методом деградации упругих свойств с использованием занижения свойств и удаления конечных элементов (с использованием пользовательских подпрограмм UMAT и VUMAT в среде Abaqus), а также методом разрушения по закону Джонсона – Кука.

Созданы геометрические модели пористых представительных объемов открытого и закрытого типа. Исследовано влияние морфологического строения и параметров микроструктуры на перераспределение напряжений и возникновение зон концентраций напряжений в матрице. Изучено влияние концентраторов напряжений на распределение полей напряжений в представительных объемах и характер их последующего разрушения.

Продолжение работ в данном направлении может быть связано с созданием и численной реализацией моделей ветвления трещин в представительном объеме, а также с идентификацией параметров микроструктурных моделей на основе экспериментальных исследований.

## Благодарности

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-00216).

## Acknowledgements

The research was performed at Perm National Research Polytechnic University, with the support of the Russian Science Foundation (project № 20-79-00216).

## Библиографический список

1. Bi S., Chen E., Gaitanaros S. Additive manufacturing and characterization of brittle foams // *Mech. Mater.* Elsevier. – 2020. – Vol. 145, № January. – P. 103368. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103368.
2. Cheng I.C., Hodge A.M. Strength scale behavior of nanoporous Ag, Pd and Cu foams // *Scr. Mater. Acta Materialia Inc.* – 2013. – Vol. 69, № 4. – P. 295–298. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2013.04.023.

3. Overview of porous media/metal foam application in fuel cells and solar power systems / W.C. Tan [et al.] // *Renew. Sustain. Energy Rev.* Elsevier Ltd, – 2018. – Vol. 96, № June. – P. 181–197. DOI: 10.1016/j.rser.2018.07.032.
4. Neikov O.D. Porous Powders and Metallic Foams // *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders.* – 2nd ed. – Elsevier, 2019. – P. 323–349. DOI: 10.1016/B978-0-08-100543-9.00011-7

5. Jung A., Diebels S. Microstructural characterisation and experimental determination of a multiaxial yield surface for open-cell aluminium foams // *Mater. Des.* Elsevier, – 2017. – Vol. 131, № June. – P. 252–264. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.06.017
6. Zhou J., Allameh S., Soboyejo W.O. Microscale testing of the strut in open cell aluminum foams // *J. Mater. Sci.* – 2005. – Vol. 40, № 2. – P. 429–439. DOI: 10.1007/s10853-005-6100-8
7. Three dimensional modelling of closed-cell aluminium foams with predictive macroscopic behaviour / B. Vengatachalam [et al.] // *Mech. Mater.* Elsevier. – 2019. – Vol. 136, № May. – P. 103067. DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103067
8. Ag effects on the elastic modulus values of nanoporous Au foams / A.M. Hodge [et al.] // *J. Mater. Res.* – 2009. – Vol. 24, № 4. – P. 1600–1606. DOI: 10.1557/jmr.2009.0184
9. Fracture behavior of additively manufactured components: A review / M.R. Khosravani [et al.] // *Theor. Appl. Fract. Mech.* Elsevier. – 2020. – Vol. 109, № July. – P. 102763. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102763
10. Li X., Xu J. Metal matrix nanocomposites // *Comprehensive Composite Materials II.* Elsevier Ltd., 2018. – Vol. 6–8. – P. 97–137. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.10351-0
11. Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials / D.K. Rajak [et al.] // *J. Mater. Res. Technol.* Korea Institute of Oriental Medicine. – 2019. № xx. – P. 1–21. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.09.068
12. Jiao J., Huber N. Deformation mechanisms in nanoporous metals: Effect of ligament shape and disorder // *Comput. Mater. Sci.* The Authors. – 2017. – Vol. 127. – P. 194–203. DOI: 10.1016/j.commatsci.2016.10.035
13. Compressive behavior of closed-cell aluminum alloy foams at medium strain rates / Z. Wang [et al.] // *Mater. Sci. Eng. A.* Elsevier B.V., – 2011. – Vol. 528, № 6. – P. 2326–2330. DOI: 10.1016/j.msea.2010.12.059
14. Fracture in nanoporous gold: An integrated computational and experimental study / N. Beets [et al.] // *Acta Mater.* Elsevier Ltd. – 2020. – Vol. 185. – P. 257–270. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.12.008
15. Insights into fracture mechanisms in nanoporous gold and polymer impregnated nanoporous gold / E. Griffiths [et al.] // *Extrem. Mech. Lett.* Elsevier Ltd. – 2020. – Vol. 39. – P. 100815. DOI: 10.1016/j.eml.2020.100815
16. Two-scale study of the fracture of an aluminum foam by X-ray tomography and finite element modeling / C. Petit [et al.] // *Mater. Des.* Elsevier Ltd. – 2017. – Vol. 120. – P. 117–127. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.02.009
17. Fracture mechanics of stainless steel foams / S. Kashef [et al.] // *Mater. Sci. Eng. A.* Elsevier, – 2013. – Vol. 578. – P. 115–124. DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.062
18. Kadkhodapour J., Raeisi S. Micro-macro investigation of deformation and failure in closed-cell aluminum foams // *Comput. Mater. Sci.* Elsevier B.V. – 2014. – Vol. 83. – P. 137–148. DOI: 10.1016/j.commatsci.2013.10.017
19. Ayyagari R.S., Vural M. Multiaxial yield surface of transversely isotropic foams: Part i – Modeling // *J. Mech. Phys. Solids.* Elsevier, – 2015. – Vol. 74. – P. 49–67. DOI: 10.1016/j.jmps.2014.10.005
20. Shunmugasamy V.C., Mansoor B. Compressive behavior of a rolled open-cell aluminum foam // *Mater. Sci. Eng. A.* Elsevier B.V. – 2018. – Vol. 715, № November 2017. – P. 281–294. DOI: 10.1016/j.msea.2018.01.015
21. Liu Y., Gong W., Zhang X. Numerical investigation of influences of porous density and strain-rate effect on dynamical responses of aluminum foam // *Comput. Mater. Sci.* Elsevier B.V. – 2014. – Vol. 91. – P. 223–230. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.05.002
22. Siegkas P., Petrinic N., Tagarielli V.L. Measurements and micro-mechanical modelling of the response of sintered titanium foams // *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* Elsevier, – 2016. – Vol. 57. – P. 365–375. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.02.024
23. Sample size effect on the mechanical behavior of aluminum foam / Y. Zhang [et al.] // *Int. J. Mech. Sci.* Elsevier Ltd. – 2019. – Vol. 151, № August 2018. – P. 622–638. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.12.019
24. Modelling of Damage Evolution in Braided Composites: Recent Developments / C. Wang [et al.] // *Mech. Adv. Mater. Mod. Process. Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes.* – 2017. – Vol. 3, № 1. – P. 15. DOI: 10.1186/s40759-017-0030-4
25. Volegov P.S., Gribov D.S., Trusov P.V. Damage and fracture: Classical continuum theories // *Phys. Mesomech.* – 2017. – Vol. 20, № 2. – P. 157–173. DOI: 10.1134/S1029959917020060
26. Chang F.K., Chang K.Y. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations // *J. Compos. Mater.* – 1987. DOI: 10.1177/002199838702100904
27. Shalimov A., Tashkinov M. Numerical investigation of damage accumulation and failure processes in random porous bicontinuous media // *Procedia Structural Integrity.* 2020. – Vol. 25. – P. 386–393. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.04.044
28. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // *Eng. Fract. Mech.* – 1985. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9
29. Talreja R. 2.8 Multiscale Modeling // *Comprehensive Composite Materials II.* Elsevier, 2018. – Vol. 2. – P. 148–166. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09908-2.
30. Generation of 3D representative volume elements for heterogeneous materials: A review / S. Bargmann [et al.] // *Prog. Mater. Sci.* The Authors, – 2018. – Vol. 96. – P. 322–384. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2018.02.003
31. Berk N.F. Scattering properties of a model bicontinuous structure with a well defined length scale // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 58, № 25. – P. 2718–2721. DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.2718
32. Cahn J.W. Phase separation by spinodal decomposition in isotropic systems // *J. Chem. Phys.* – 1965. – Vol. 42, № 1. – P. 93–99. DOI: 10.1063/1.1695731

## References

1. Bi S., Chen E., Gaitanaros S. Additive manufacturing and characterization of brittle foams, *Mech. Mater.*, 2020, 145 (January), pp. 103368, doi: 10.1016/j.mechmat.2020.103368.
2. Cheng I.C., Hodge A.M. Strength scale behavior of nanoporous Ag, Pd and Cu foams, *Scr. Mater.*, 2013, 69(4), pp. 295–298, doi: 10.1016/j.scriptamat.2013.04.023.
3. Tan W.C., Saw L.H., Thiam H.S., Xuan J., Cai Z., Yew M.C. Overview of porous media/metal foam application in fuel cells and solar power systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2018, 96(June), pp. 181–197, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.032.
4. Neikov O.D. Porous Powders and Metallic Foams, *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders.* 2nd ed., Elsevier, 2019, pp. 323–349, doi: 10.1016/B978-0-08-100543-9.00011-7.
5. Jung A., Diebels S. Microstructural characterisation and experimental determination of a multiaxial yield surface for open-

cell aluminium foams, *Mater. Des.*, 2017, 131(June), pp. 252–264, doi: 10.1016/j.matdes.2017.06.017.

6. Zhou J., Allameh S., Soboyejo W.O. Microscale testing of the strut in open cell aluminum foams, *J. Mater. Sci.*, 2005, 40(2), pp. 429–439, doi: 10.1007/s10853-005-6100-8.

7. Vengatachalam B., Poh L.H., Liu Z.S., Qin Q.H., Swaddiwudhipong S. Three dimensional modelling of closed-cell aluminium foams with predictive macroscopic behaviour, *Mech. Mater.*, 2019, 136(May), pp. 103067, doi: 10.1016/j.mechmat.2019.103067.

8. Hodge A.M., Doucette R.T., Biener M.M., Biener J., Cervantes O., Hamza A. V. Ag effects on the elastic modulus values of nanoporous Au foams, *J. Mater. Res.*, 2009, 24(4), pp. 1600–1606, doi: 10.1557/jmr.2009.0184.

9. Khosravani M.R., Berto F., Ayatollahi M.R., Reinicke T. Fracture behavior of additively manufactured components: A review, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2020, 109(July), pp. 102763, doi: 10.1016/j.tafmec.2020.102763.

10. Li X., Xu J. Metal matrix nanocomposites, *Comprehensive Composite Materials II*, Elsevier Ltd., 2018, 6–8, 97–137 p., doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.10351-0.

11. Rajak D.K., Pagar D.D., Kumar R., Pruncu C.I. Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials, *J. Mater. Res. Technol.*, 2019, (x x), pp. 1–21, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.09.068.

12. Jiao J., Huber N. Deformation mechanisms in nanoporous metals: Effect of ligament shape and disorder, *Comput. Mater. Sci.*, 2017, 127, pp. 194–203, doi: 10.1016/j.commatsci.2016.10.035.

13. Wang Z., Shen J., Lu G., Zhao L. Compressive behavior of closed-cell aluminum alloy foams at medium strain rates, *Mater. Sci. Eng. A*, 2011, 528(6), pp. 2326–2330, doi: 10.1016/j.msea.2010.12.059.

14. Beets N., Stuckner J., Murayama M., Farkas D. Fracture in nanoporous gold: An integrated computational and experimental study, *Acta Mater.*, 2020, 185, pp. 257–270, doi: 10.1016/j.actamat.2019.12.008.

15. Griffiths E., Soyarslan C., Bargmann S., Reddy B.D. Insights into fracture mechanisms in nanoporous gold and polymer impregnated nanoporous gold, *Extrem. Mech. Lett.*, 2020, 39, pp. 100815, doi: 10.1016/j.eml.2020.100815.

16. Petit C., Maire E., Meille S., Adrien J. Two-scale study of the fracture of an aluminum foam by X-ray tomography and finite element modeling, *Mater. Des.*, 2017, 120, pp. 117–127, doi: 10.1016/j.matdes.2017.02.009.

17. Kashef S., Asgari A., Hilditch T.B., Yan W., Goel V.K., Quadbeck P., Hodgson P.D. Fracture mechanics of stainless steel foams, *Mater. Sci. Eng. A*, 2013, 578, pp. 115–124, doi: 10.1016/j.msea.2013.03.062.

18. Kadkhodapour J., Raeisi S. Micro-macro investigation of deformation and failure in closed-cell aluminum foams, *Comput. Mater. Sci.*, 2014, 83, pp. 137–148, doi: 10.1016/j.commatsci.2013.10.017.

19. Ayyagari R.S., Vural M. Multiaxial yield surface of transversely isotropic foams: Part i – Modeling, *J. Mech. Phys. Solids*, 2015, 74, pp. 49–67, doi: 10.1016/j.jmps.2014.10.005.

20. Shunmugasamy V.C., Mansoor B. Compressive behavior of a rolled open-cell aluminum foam, *Mater. Sci. Eng. A*, 2018, 715(November 2017), pp. 281–294, doi: 10.1016/j.msea.2018.01.015.

21. Liu Y., Gong W., Zhang X. Numerical investigation of influences of porous density and strain-rate effect on dynamical responses of aluminum foam, *Comput. Mater. Sci.*, 2014, 91, pp. 223–230, doi: 10.1016/j.commatsci.2014.05.002.

22. Siegkas P., Petrinic N., Tagarielli V.L. Measurements and micro-mechanical modelling of the response of sintered titanium foams, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 2016, 57, pp. 365–375, doi: 10.1016/j.jmbbm.2016.02.024.

23. Zhang Y., Jin T., Li S., Ruan D., Wang Z., Lu G. Sample size effect on the mechanical behavior of aluminum foam, *Int. J. Mech. Sci.*, 2019, 151(August 2018), pp. 622–638, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.12.019.

24. Wang C., Roy A., Silberschmidt V. V., Chen Z. Modelling of Damage Evolution in Braided Composites: Recent Developments, *Mech. Adv. Mater. Mod. Process.*, 2017, 3(1), pp. 15, doi: 10.1186/s40759-017-0030-4.

25. Volegov P.S., Gribov D.S., Trusov P.V. Damage and fracture: Classical continuum theories, *Phys. Mesomech.*, 2017, 20(2), pp. 157–173, doi: 10.1134/S1029959917020060.

26. Chang F.K., Chang K.Y. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations, *J. Compos. Mater.*, 1987, doi: 10.1177/002199838702100904.

27. Shalimov A., Tashkinov M. Numerical investigation of damage accumulation and failure processes in random porous bicontinuous media, *Procedia Structural Integrity*, 2020, 25, pp. 386–393, DOI: 10.1016/j.prostr.2020.04.044

28. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Eng. Fract. Mech.*, 1985, DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9

29. Talreja R. 2.8 Multiscale Modeling, *Comprehensive Composite Materials II*, Elsevier, 2018, 2, pp. 148–166, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09908-2.

30. Bargmann S., Klusemann B., Markmann J., Schnabel J.E., Schneider K., Soyarslan C., Wilmers J. Generation of 3D representative volume elements for heterogeneous materials: A review, *Prog. Mater. Sci.*, 2018, 96, pp. 322–384, doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.02.003.

31. Berk N.F. Scattering properties of a model bicontinuous structure with a well defined length scale, *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(25), pp. 2718–2721, doi: 10.1103/PhysRevLett.58.2718.

32. Cahn J.W. Phase separation by spinodal decomposition in isotropic systems, *J. Chem. Phys.*, 1965, 42(1), pp. 93–99, doi: 10.1063/1.1695731.