

УДК 620.18

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В ПОРИСТОМ ХРУПКОМ МАТЕРИАЛЕ

© 2021 г. С. В. Воронин^{a,*}, В. С. Данилушкин^{a,**}, В. И. Трегуб^{a,***}, С. В. Коновалов^{a,****}

^aСамарский университет, Самара, 443086 Россия

*e-mail: voronin.sv@ssau.ru

**e-mail: vladislavdan@bk.ru

***e-mail: tvj_v@rambler.ru

****e-mail: ksv@ssau.ru

Поступила в редакцию 18.01.2021 г.

После доработки 12.03.2021 г.

Принята к публикации 14.03.2021 г.

В работе приведены результаты компьютерного моделирования процесса зарождения и развития трещин методом конечных-элементов в моделях однофазного хрупкого сплава, содержащего упорядоченные микропоры, с кубической и триклинной сингонией расположения пор. В результате компьютерного моделирования процесса одноосного растяжения были получены данные о характере распределения напряжений и деформаций, траектории распространения трещин. Полученные результаты для триклинной и кубической сингонии расположения пор сравнивались с результатами растяжения модели изотропного образца. Установлено, что траектория распространения трещины в модели с кубической сингонией расположения пор и в изотропной модели линейная, характер распространения трещин в модели с триклинной сингонией расположения пор более разветвленный. Для роста трещины в модели с кубической сингонией расположения пор требуется наибольшая относительная деформация, по сравнению с моделями с триклинной сингонией расположения пор и изотропной. Определены длины трещин, образовавшиеся за равное количество шагов решения конечно-элементного анализа. Скорость распространения трещины в изотропной модели выше, чем в моделях с кубической и триклинной сингониями расположения пор. Показано, что поры выполняют роль стопоров трещин, так как на определенном этапе разрушения требуется повышение уровня деформации для роста трещины в хрупком теле с кубической и триклинной сингониями.

Ключевые слова: пористые материалы, конечно-элементный анализ, компьютерное моделирование, распространение трещин, упорядоченная пористая структура, деформация пористого материала, механические свойства, проектирование материала.

DOI: 10.31857/S1028096021110248

ВВЕДЕНИЕ

Для создания уникальных образцов техники важными этапами являются разработка и получение новых сплавов, обладающих высокой удельной прочностью. Микропористые материалы с высокой степенью упорядоченности пор способны обеспечить получение вышеуказанного комплекса свойств материала. Изменение характера расположения и размеров пор позволяет управлять свойствами материала. Пора в микроструктуре способна выполнять функцию упрочняющей фазы, формируя в прилегающем к ней микрообъеме определенные поля напряжений. В случае образования и развития трещины пора способна влиять на траекторию ее движения и увеличивать радиус скругления вершины трещины, что приводит к снижению напряжений в вершине, ее остановке или изменению траектории.

Упорядоченная пористая структура может заставить ветвиться трещину и увеличить ресурс детали. Практически нулевая плотность поры (по сравнению с основой материала) позволяет снизить плотность и удельный вес конструкции. Пора вокруг себя вызывает определенный характер распределения напряжений, что сказывается на поведении сплава под нагрузкой, поэтому необходимо изучать процесс зарождения и развития трещин в хрупком пористом материале в зависимости от характера расположения микропор в структуре.

Целью данной работы является компьютерное моделирование методом конечных элементов процесса зарождения и развития трещин в хрупком пористом материале, содержащем упорядоченные микропоры с кубической и триклинной сингониями [1–13].

МЕТОДИКА

Основным методом исследования в данной работе является компьютерное моделирование, реализованное на базе метода конечных элементов. В настоящее время известно большое количество программ, которые используют метод конечно-элементного анализа для определения характера распределения напряжений и деформаций, а также для моделирования процессов разрушения. Метод конечно-элементного моделирования реализован в ряде программных пакетов: Nastran, Marc, Femap, ANSYS, QForm, DEFORM-2D/3D и др. Однако, не во всех программах реализован модуль, позволяющий рассчитать и визуализировать траекторию распространения трещины при разрушении. Поэтому для достижения поставленной цели компьютерное моделирование проводилось в программной среде Nastran, а для расчета траектории и визуализации распространения трещины применялась авторская программа-приложение, реализованная в форме макроса в среде вышеуказанного программного продукта. Основными принципами, заложенными в данную программу-приложение, являются определение места зарождения и дальнейшее направление движения трещины. Местом зарождения является узел конечно-элементной сетки, в котором напряжения превосходят заданный предел прочности для конкретной структурной составляющей. Направление дальнейшего продвижения трещины определяется по принципу совершения минимальной работы на дальнейшее ее продвижение. Работа для предполагаемых направлений распространения трещины рассчитывалась по предложенному нами эмпирическому уравнению 1 [14]:

$$A = \frac{(\sigma_r - \sigma_i)l^2 t}{\cos \alpha}, \quad (1)$$

где A – затрачиваемая работа на перемещение трещины, Дж;

σ_r – напряжение в вершине трещины, МПа;

σ_i – напряжение в предполагаемом узле последующего раздвоения, МПа;

l – расстояние между узлом вершины трещины и предполагаемым узлом последующего раздвоения, мм;

t – толщина образца, мм;

α – угол между осью Y и направлением предполагаемого движения трещины, градусы.

Построение конечно-элементных моделей для определения характера распространения трещин выполнялось по предложенной нами методике. Данная методика позволяла получить равномерную, исключительно симметричную и идентичную для каждой рассматриваемой модели, конечно-элементную сетку. Данный тип конечно-элементной сетки обеспечивал максимально корректные ре-

зультаты распределения напряжений и деформаций, следовательно, исключалось влияние конечно-элементной сетки на траекторию распространения трещин. Для обеспечения максимального количества направлений распространения трещины применялась треугольная форма конечных элементов. Методика построения конечно-элементных моделей заключалась в применении элементарной ячейки с порой в центре, соотношение диаметра поры к ребру 1 : 2. Для реализации исключительно симметричной конечно-элементной сетки в элементарных ячейках производилось зеркальное копирование четверти и половины элементарной ячейки. Затем полученные элементарные ячейки копировались в плоскости модели таким образом, чтобы реализовать квадратную и триклинную сингонии расположения пор. Одним из допущений являлся переход от трехмерной к двумерной конечно-элементной модели, в результате чего кубический тип структуры назван квадратным, а триклинный – треугольным. При построении конечно-элементного образца с изотропной структурой за основу использовалась модель с квадратной сингонией расположения микропор, и пустоты в порах дополнялись симметричной, идентичной конечно-элементной сеткой. Затем полученные модели подвергались проверке на сплошность конечно-элементной сетки.

При задании механических свойств конечно-элементным моделям принималось допущение, что материал однофазный, изотропный и хрупкий, с модулем упругости $E = 71000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0.3$. Для реализации моделирования условий растяжения образцов задавались условия закрепления, обеспечивающие ее равномерное удлинение без возникновения концентраторов напряжений в углах моделей. Растягивающие силы прикладывались к двум противоположным рядам узлов, расположенным на ребрах конечно-элементных моделей [15].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Компьютерное моделирование процесса зарождения и распространения трещин в модели с квадратным расположением пор

После приложения нагрузки к модели с квадратным типом структуры были рассчитаны поля напряжений, характер которых являлся полосчатым с определенными зонами релаксации (рис. 1). На пятом шаге решения наблюдалось зарождение трещин в области высоких напряжений по внешним полюсам микропор, расположенных в верхнем и нижних рядах. На десятом шаге решения трещина достигла края модели и прорвала ее. При этом наблюдалось повышение напряжений на внутренних полюсах внешних пор, а также повы-

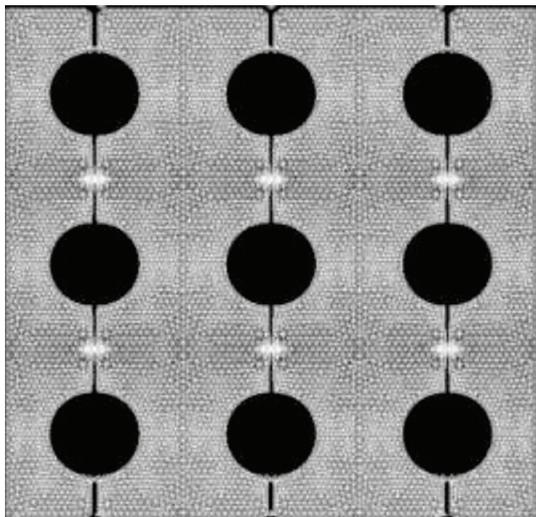


Рис. 1. Карта распределения трещин, напряжений и деформаций в модели с квадратным характером расположения пор на 20 шаге решения.

шение напряжения на обоих полюсах центральных пор, что привело к образованию трещин в зонах повышенных напряжений. На 15 шаге решения наблюдалось зарождение трещин в областях высоких напряжений в центральных порах, а трещина, прорвавшая модель, продолжила движение к центру модели навстречу трещине, идущей из центральной поры. На 20 шаге решения задачи было определено, что трещины сходятся и располагаются на расстоянии в двух элементах друг от друга, что можно считать полным разрушением модели (рис. 1).

Компьютерное моделирование процесса зарождения и распространения трещин в модели с треугольным расположением пор

После приложения нагрузки на первом этапе разрушения модели с треугольным характером расположения пор наблюдались повышенные напряжения по обоим полюсам центральных пор. Основные поля напряжений располагались под некоторым углом относительно оси растяжения. На пятом шаге решения задачи происходило зарождение трещин в области высоких напряжений по полюсам центральных пор. На двух порах, расположенных в центре, образовалось по два зародыша трещины под углом относительно оси растяжения. На 10 шаге наблюдалось продолжение распространения трещины под углом относительно оси растяжения, без изменения первоначальной траектории. На 15 шаге решения произошло изменение траектории развития трещины на направление, близкое к перпендикулярному относительно оси растяжения. Наибольшие напряжения скопились в вершине трещины, наблюдалось

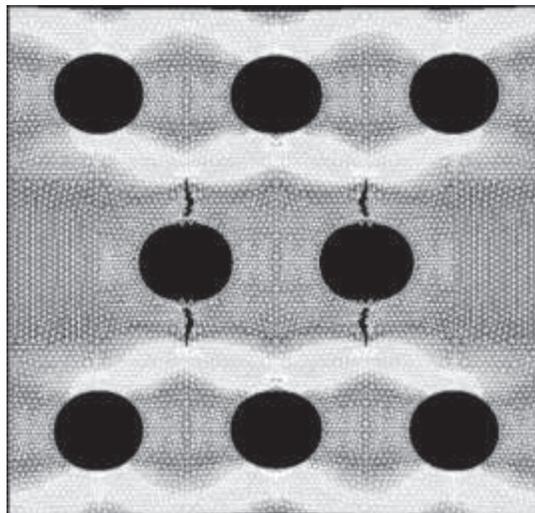


Рис. 2. Карта распределения трещин, напряжений и деформаций в модели с треугольным характером расположения пор на 20 шаге решения.

ветвление распространяемых трещин. На 20 шаге решения задачи видно, что трещина выпрямилась и продолжала свое движение перпендикулярно к оси растяжения. Также наблюдалось повышение напряжений в порах, расположенных по центру перпендикулярных граней относительно оси растяжения, и на внутреннем полюсе произошло зарождение новой трещины (рис. 2).

Компьютерное моделирование процесса зарождения и распространения трещины в изотропной модели с концентраторами напряжений

После приложения нагрузки наибольшие поля напряжений сосредоточены в вершине концентраторов напряжений. На пятом шаге анализа трещины начинали движение от края к центру модели в перпендикулярном направлении относительно оси растяжения. На последующих контрольных 10, 15, 20 шагах анализа трещины двигались к центру, навстречу друг другу без изменения траектории. Характер распространения трещины в изотропной модели был линейным, без ветвлений (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В конечно-элементной модели с квадратным характером расположения пор количество мест зарождения трещин больше, чем в изотропной модели. В модели с квадратным характером расположения пор на 11 шаге решения произошло разрушение сразу в 60 узлах, что соответствует моменту прорыва трещинами края модели. В результате происходит значительное перераспределение напряжений и повышение их уровня, что

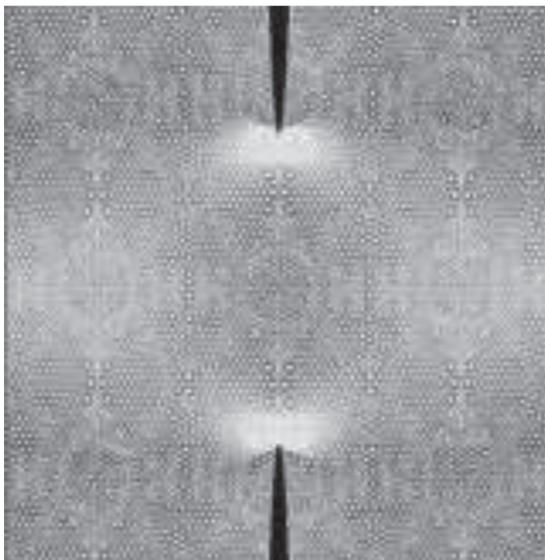


Рис. 3. Карта распределения трещин, напряжений и деформаций в модели изотропной структуры

приводит к распространению новых трещин из 12 мест. В конечно-элементной модели с треугольным характером расположения пор количество мест зарождения трещин также больше, чем в изотропной модели, но меньше чем в квадратной. Это приводит к равномерному распределению напряжений по всему объему и позволяет избежать локализации напряжений в двух точках, как в случае с изотропной структурой. Однако количество мест зарождения не полностью характеризует трещиностойкость материала, этот параметр необходимо рассматривать в совокупности с длиной трещины и скорости ее распространения.

Для оценки тенденции развития трещины в исследуемых моделях, необходимо определить влияние степени относительной деформации на длину трещины. За одну условную единицу длины трещины принимался один конечный элемент. В модели с квадратным характером расположения пор при достижении длины трещины в 14 условных единиц (усл. ед.) для продолжения ее развития потребовалось повышение относительной деформации. В модели с треугольным характером расположения пор необходимость повышения относительной деформации произошла на длине трещины в 4 усл. ед. На основании полученных данных можно сделать вывод, что наличие пор в модели однофазного сплава приводит к необходимости повышения степени деформации на определенном этапе разрушения. У изотропной модели приращение относительной деформации не произошло.

Для оценки скорости распространения трещины необходимо ввести дополнительный параметр: скорость достижения напряжения предела

прочности материала. По данному критерию можно судить на сколько интенсивно растут напряжения до предела прочности в модели. Это можно представить в виде формулы:

$$v = \frac{\sigma_i}{n_{\text{output set}}}, \quad (2)$$

где v – скорость достижения напряжения предела прочности материала; σ_i – напряжения, вызывающие разрушение в вершине трещины на текущем шаге решения задачи; $n_{\text{output set}}$ – количество подшагов приращения нагрузки на определенном шаге решения задачи.

Высокая скорость достижения напряжения предела прочности в материале может свидетельствовать о высокой скорости продвижения трещины, что является отрицательным фактором для работы материала. Для модели с квадратным характером расположения пор скорость достижения напряжения предела прочности в материале ниже, чем в изотропной модели и модели с треугольным характером расположения пор. Следует отметить, что модель с треугольным характером расположения пор по скорости распространения трещины занимает промежуточное положение среди трех структур. На основании полученных данных можно сделать предположение о том, что в модели с квадратным расположением пор скорость распространения трещины будет самой низкой среди трех представленных моделей. Также видно, что по данному критерию изотропная модель уступает моделям с квадратным и треугольным характером расположения пор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что траектория распространения трещины в моделях с квадратным характером расположения пор и в изотропной модели линейная. А характер распространения трещин в модели с треугольным расположением пор более разветвленный, т.е. с большим количеством микротрещин.

Показано, что для роста трещины в модели с квадратным характером расположения пор требуется наибольшая относительная деформация, по сравнению с моделями с треугольным характером расположения пор и изотропной.

Определены длины трещин за 20 шагов конечно-элементного анализа: максимальная для изотропной модели – 40 усл. ед., для модели с квадратным характером расположения пор – 38 усл. ед., для модели с треугольным характером расположения пор – 20 усл. ед. В случае с одинаковой длиной трещин для моделей с квадратным расположением пор и изотропной структуры следует учитывать наличие пор у квадратной модели, которые приводят к снижению плотности материала.

ла и повышению удельной прочности. Меньшая длина трещины в модели с треугольным характером расположения пор связана с тем, что энергия на развитие трещины затрачивается на ее ветвление.

Установлено, что напряжения, равные пределу прочности материала, достигаются быстрее в изотропной модели, что свидетельствует о большей скорости распространения трещины, чем в моделях с квадратным и треугольным характером расположения пор.

Доказано, что поры выполняют роль стопоров трещин, так как на определенном этапе требуется повышение уровня деформации для роста трещины в хрупком теле с квадратным и треугольным типами структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ooi E.T.* // *Fract. Mech.* 2015. V. 144. P. 101. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.06.083>
2. *Abdellah M.Y.* // *Fract. Mech.* 2017. V. 179. P. 190. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.042>
3. *Sadovskii V.M., Sadovskaya. O.V.* // *AIP Conference Proceedings* 1684. Albena, Bulgaria. Institute of Computational Modeling, 2015. P. 070006. <https://doi.org/10.1063/1.4934307>
4. *Chen X.* // *Fract. Mech.* 2018. V. 94. P. 120. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.01.008>
5. *Ansari R., Hassani R., Gholami R., Rouhi H.* // *International J. Non-Linear Mechanics.* 2020. V. 126. P. 103556. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103556>
6. *Pingping Yang, Ning Hu, Leiting Dong.* // *Composite Structures.* 2020. V. 249. P. 25. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112531>
7. *Songyun M., Huang Y.* // *Mech. Mater.* 2017. V. 104. P. 13. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.09.013>
8. *Wen Yu Hao, Ran Guo, Ning Han.* // *Composite Structures.* 2020. V. 252. P. 112598. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112598>
9. *Xiaoyue Gong, Julien Bustillo, Laurianne Blanc, Gaël Gautier.* // *International Journal of Solids and Structures.* 2020. V. 190. P. 238. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.11.001>
10. *Cong Wang, Zhaoqin Huangc, Yu-Shu Wu* // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2020. V. 130. P. 104315. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104315>
11. *Rubin M. B., Vorobiev O. Yu., Glenn L.A.* // *Solids Struct.* 2000. V. 37. P. 1841. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(98\)00333-3](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00333-3)
12. *Binyamin, Sarjito, Aniq Hudiayah Bil Haq* // *AIP Conference Proceedings* 1977. Surakarta, Indonesia. 2018. P. 030038. <https://doi.org/10.1063/1.5042958>
13. *Shena W.Q., Cao Y.J., Shao J.F., Liu Z.B.* // *Materials Today Communications.* 2020. V. 25. P. 101477. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101477>
14. *Voronin S.V., Loboda P.S., Lediaev M.E.* // *AIP Conference Proceedings.* Ekaterinburg, Russia. 2016. V. 52. P. 040092. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.09.001>
15. *Voronin S.V., Yushin V.D., Bunova G.Z.* // *Modern Applied Science.* 2015. V. 9. P. 51. <https://doi.org/10.3103/S1068799808040181>

Computer Simulation of the Process of Crack Propagation in a Brittle Porous Material

S. V. Voronin^{1, *}, V. S. Danilushkin^{1, **}, V. I. Tregub^{1, ***}, and S.V. Kononov^{1, ****}

¹*Samara National Research University, Samara, 443086 Russia*

**e-mail: voronin.sv@ssau.ru*

***e-mail: vladislavdan@bk.ru*

****e-mail: tvj_v@rambler.ru*

*****e-mail: ksv@ssau.ru*

The paper presents the results of computer simulation of the process of origin and development of cracks by the finite-element method in models of a single-phase brittle alloy containing ordered micropores with cubic and triclinic pore arrangement syngony. As a result of computer modeling of the uniaxial stretching process, data on the nature of the distribution of stresses and deformations, and the trajectory of crack propagation were obtained. The results obtained for the triclinic and cubic syngony of the pore arrangement were compared with the results of stretching the model of an isotropic sample. It is established that the crack propagation trajectory in the model with a cubic pore arrangement and in the isotropic model is linear, and the crack propagation pattern in the model with a triclinic pore arrangement is more branched. For crack growth in a model with a cubic pore arrangement syngony, the greatest relative deformation is required, compared to models with a triclinic pore arrangement syngony and an isotropic one. The lengths of cracks formed in an equal number of steps of the solution of the finite element analysis are determined. The crack propagation velocity in the isotropic model is higher than in the models with cubic and triclinic pore arrangement syngons. It is shown that the pores act as crack stoppers, because at a certain stage of destruction, an increase in the level of deformation is required for the crack to grow in a brittle body with cubic and triclinic syngony.

Keywords: porous materials, finite element analysis, computer simulation, crack propagation, ordered porous structure, deformation of porous material, mechanical properties, material design.