

УДК 539.42

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОТРЕЩИН В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД: РЕНТГЕНОВСКАЯ МИКРОТОМОГРАФИЯ И МЕТОД ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2025 г. Е. Е. Дамаскинская^{1,*}, В. Л. Гиляров¹, Ю. С. Кривоносов², А. В. Бузмаков²,
В. Е. Асадчиков², Д. И. Фролов¹

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

²Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия

*E-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 10.10.2024 г.

После доработки 26.11.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

В работе выполнено прямое наблюдение микротрещин, образующихся в образце горной породы под действием одноосной сжимающей нагрузки. Детектирование дефектов в объеме осуществлялось с помощью рентгеновской компьютерной микротомографии. Особенность проводимых экспериментов состоит в том, что выполнялась томографическая съемка образца, находящегося под действием нагрузки. На основе анализа томографических сечений вычислены фрактальная размерность и относительный объем микротрещин на трех этапах нагружения. Построены трехмерные модели дефектной структуры, которые иллюстрируют изменение морфологии магистральной трещины. С помощью модели дискретных элементов проведены численные эксперименты по разрушению образцов гетерогенных материалов. Исследовано изменение фрактальной размерности магистральных трещин в процессе их роста. Установлено хорошее согласие результатов компьютерного моделирования и лабораторных экспериментов, что указывает на адекватность предложенной модели и позволяет в дальнейших исследованиях использовать ее для изучения поведения локальных параметров, которые не могут быть измерены экспериментально.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная микротомография, эволюция дефектов, компьютерное моделирование, метод дискретных элементов, фрактальная размерность.

DOI: 10.31857/S0002333725020113, **EDN:** DMTQKD

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени накоплено большое число экспериментальных данных, показывающих, что разрушение горных пород на различных масштабах — от сантиметровых образцов до землетрясений — является многостадийным процессом [Lockner et al., 1991; Petružálek et al., 2013; Hamiel et al., 2006; Kuksenko et al., 1996; Smirnov et al., 2010; Xinglin Lei, Shengli Ma, 2014; Tal Y. et al., 2020], развивающимся во времени и пространстве. В лабораторных экспериментах процесс разрушения вызван появлением и развитием дефектной структуры — совокупности микротрещин, образующихся под действием механической нагрузки.

В связи с этим задачей работы является прямое наблюдение и дальнейший анализ дефектов, развивающихся в объеме образца природного гетерогенного материала (горной породы) под действием одноосной сжимающей нагрузки.

Экспериментальным методом, который позволяет визуализировать дефекты и определить их геометрические характеристики в объеме массивного непрозрачного образца, является рентгеновская компьютерная микротомография (X-ray microCT). Основное преимущество данного метода состоит в том, что при исследовании образец сохраняет свою целостность.

В работах [Sheng-Qi Yang et al., 2015; Zabler et al., 2008; Yujun Zuo et al., 2022; Yongming Yang et al., 2016; Zhou et al., 2008; Re, 2012; Peng RuiDong et al., 2011; Liu et al., 2018] с помощью X-ray microCT проводилось исследование микротрещин, образовавшихся под действием механической нагрузки. Как правило, томографическая съемка выполнялась либо после завершения механических испытаний, либо после каждого этапа нагружения [Sheng-Qi Yang et al., 2015; Zabler et al., 2008; Yujun Zuo et al., 2022; Yongming Yang et al., 2016]. При этом в процессе томографической съемки образец находился в ненагруженном состоянии.

В работах [Zhou et al., 2008; Re, 2012] описаны эксперименты, в которых проводились томографические исследования образцов, находящихся в нагруженном состоянии. Наблюдалось развитие системы трещин по мере увеличения нагрузки. Однако количественного исследования распространения трещин не выполнялось.

Результаты, полученные с помощью томографических исследований, позволяют анализировать только морфологию трещин. В то же время для выявления физических причин развития разрушения требуются представления о локальных значениях различных механических параметров (деформаций и напряжений). В настоящее время экспериментальные методы не позволяют измерить данные локальные параметры.

В данной работе проведено сопоставление особенностей развития магистральной трещины в компьютерной модели разрушения, основанной на методе дискретных элементов, с экспериментальными данными. В случае удовлетворительного согласия результатов данная модель послужит инструментом для исследования локальных параметров.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве материала для исследований был выбран песчаник Berea. Песчаник Berea состоит из 85–90% кварца, 1–2% плагиоклаза, 3–6% полевого шпата, 2–6% каолинита, 6–8% кальцита [Ghurcher et al., 1991] с характерным размером зерна 20 мкм. Образцы имели цилиндрическую форму ($d = 10$ мм, $h = 20$ мм). Торцы образцов дополнительно шлифовались для обеспечения их плоскопараллельности. Боковая поверхность образцов перед экспериментами фиксировалась с помощью термоусадочного материала для предотвращения рассыпания в процессе деформирования.

Особенность экспериментов состояла в том, что выполняли томографическую съемку образца, находящегося под действием нагрузки. Для этого была разработана специальная переносная нагружательная ячейка (см. рис. 1), которая, с одной стороны, обеспечивает необходимую

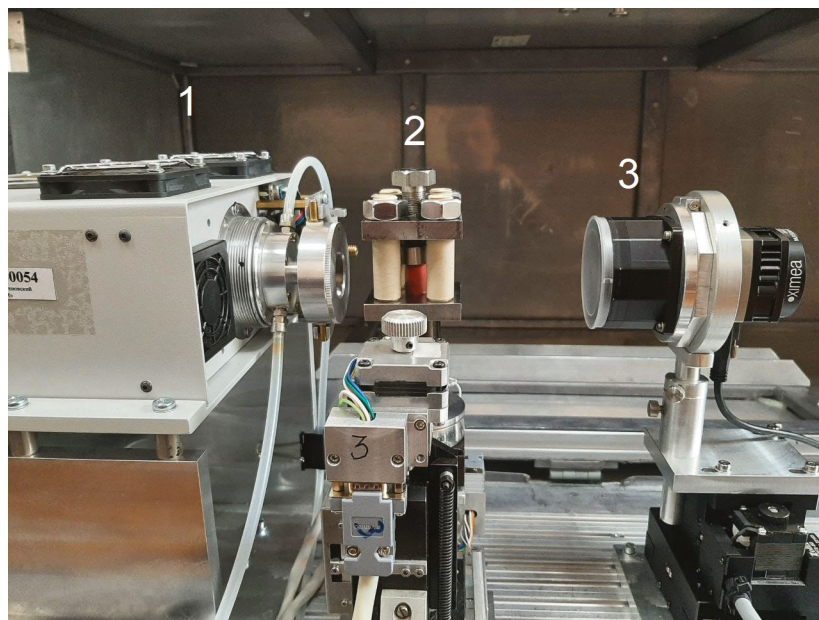


Рис. 1. Экспериментальная установка. Рентгенооптическая часть рентгеновского микротомографа “МИКРОТОМ”: 1 — источник, 2 — нагружательная ячейка с образцом, 3 — детектор.

нагрузку, а с другой стороны, обладает достаточной прозрачностью в рентгеновском диапазоне, что позволяет проводить томографический эксперимент.

Томографические измерения были выполнены на конусно-лучевом рентгеновском микротомографе “МИКРОТОМ”, разработанном и созданном в НИЦ “Курчатовский институт” [Кривоносов др., 2023]. На рис. 1. приведена фотография оптической части микротомографа с установленной на нем нагрузочной ячейкой и образцом. В томографе используется микрофокусный полихроматический рентгеновский источник с прострельным анодом из молибдена и размером фокусного пятна 15–20 мкм. Для эксперимента было выбрано ускоряющее напряжение 80 кВ. Томографические проекции образца, измеренные под разными углами, регистрировали рентгеновским детектором XIMEA с матрицей размером 2968×5056 элементов и размером пикселя 8.5 мкм. Эксперименты проводили в следующей геометрии: расстояние источник — образец 50 мм и источник — детектор 150 мм, геометрическое увеличение $M = 3.0$. В каждом эксперименте регистрировали 720 проекций в диапазоне углов 360° . Восстановление трехмерных изображений объектов выполняли с помощью FDK алгоритма [Feldkamp et al., 1984]. Чтобы уменьшить “эффект чаши”, который является артефактом и возникает вследствие “ужесточения” полихроматического пучка при прохождении через образец, между источником и образцом устанавливали Al-фильтр толщиной 0.36 мм. Кроме этого, для полного устранения чашевидного артефакта к исходным нормированным и логарифмированным синограммам применяли процедуру автоматической гамма-коррекции, описанной в работе [Ingacheva, Chukalina, 2019]. Также отметим, что с учетом предложенной геометрии эксперимента томография была выполнена не для всего образца целиком, а для его центральной части высотой 7 мм.

До начала испытаний проводилось томографическое исследование всей партии образцов песчаника. Для дальнейших экспериментов отбирались образцы без структурных аномалий, которые могли стать концентраторами напряжений и источниками развития разрушения.

Эксперимент проходил в несколько этапов. На первом этапе образец подвергался одноосному сжатию в ячейке до нагрузки 5.5 кН. Ячейку

помещали в томограф и проводили съемку. На втором этапе нагрузку увеличивали до 6.7 кН и вновь проводили съемку. Затем образец выдерживали 24 часа под нагрузкой. Далее при попытке еще увеличить нагрузку образец потерял устойчивость. После чего была выполнена финальная томографическая съемка.

Важно подчеркнуть, что в течение эксперимента образец все время находился под действием нагрузки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лабораторный эксперимент

На рис. 2 показаны сечения образца по высоте, полученные на трех этапах нагружения. В данных экспериментах контраст связан с поглощением рентгеновских лучей при прохождении через объект исследования. После томографической реконструкции получают картины распределения рентгенооптической плотности в различных горизонтальных сечениях образца. Градации серого соответствуют различной рентгенооптической плотности материала. Черные линии — трещины. Видно, что после первого этапа нагружения трещина проходит не через весь образец (рис. 2а). Увеличение нагрузки приводит к распространению трещины (рис. 2б). Выдержка в течение суток при нагрузке 6.7 кН привела к тому, что образец потерял устойчивость. Хорошо видно, что трещина стала еще более разветвленной (рис. 2в).

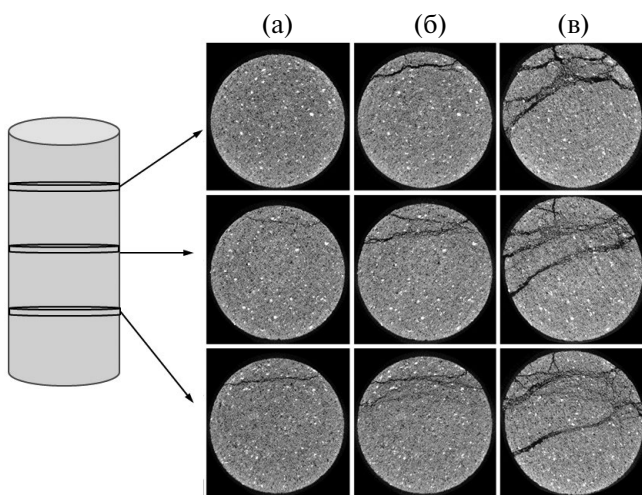


Рис. 2. Распределение рентгенооптической плотности в сечениях образца, расположенных в верхней, центральной и нижней частях, после первого (а), второго (б) и третьего (в) этапов нагружения.

Чтобы сегментировать трещины, образовавшиеся в образце в процессе поэтапного нагружения, проводили бинаризацию томограмм с использованием глобального порога.

Для дальнейшего анализа морфологии трещин применялась теория фракталов. В работах [Yujun Zuo et al., 2022; Yongming Yang et al., 2016; Peng Rui Dong et al., 2011; Liu et al., 2018] вычислялась фрактальная размерность трещин или пор. Было показано, что фрактальная размерность чувствительна к степени гетерогенности материала, к виду напряженного состояния. В данной работе в качестве количественной характеристики дефектной структуры была выбрана фрактальная размерность, которая вычислялась методом *box counting* (BCM) [Yongming Yang et al., 2016; Ju et al., 2014; Xie, 1993; Peng et al., 2011]. Строилась зависимость числа кубов, которые располагаются на границе трещина–материал, от длины стороны куба. Полученная зависимость аппроксимировалась степенным законом, показатель степени давал оценку фрактальной размерности. По существу это размерность D_0 из набора фрактальных размерностей Реньи [Божок, Паршин, 2001]. Таким образом, была определена фрактальная размерность трехмерных поверхностей трещин на основе трехмерных моделей реконструкции трещин.

Установлено, что после 1-го этапа нагружения (при нагрузке 5.5 кН) фрактальная размерность трещины равна 1.8. Это означает, что трещина является ажурной и близкой по размерности к плоскости. Увеличение нагрузки до 6.7 кН приводит к развитию системы трещины — фрактальная размерность увеличивается до 2.3. На третьем этапе деформирования значение фрактальной размерности достигает величины 2.6. И действительно, видно, что система трещин становится более разветвленной и занимает практически весь объем образца. Этот результат наглядно иллюстрирует трехмерная визуализация трещин, построенная по результатам томографии (рис. 3).

Далее был проведен детальный анализ морфологии системы трещин. Для этого весь набор томографических срезов разделили на 6 частей (*sample part*) по высоте образца (каждая часть содержит 130 томографических срезов, что соответствует ~ 1.3 мм). На рис. 4 показаны

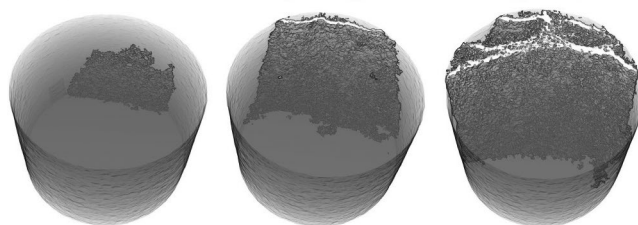


Рис. 3. Трехмерная визуализация системы микро-трещин после трех этапов нагружения. Темно-серые объекты сложной геометрической формы внутри образца — образовавшаяся трещина.

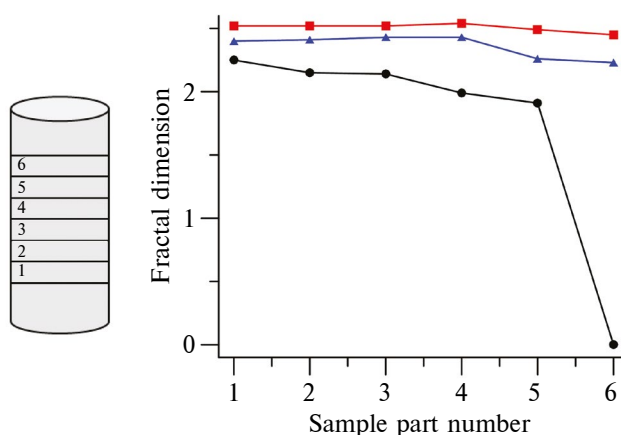


Рис. 4. Значения фрактальной размерности системы трещин в различных частях образца после 1-го (черная линия), 2-го (синяя линия) и 3-го (красная линия) этапов нагружения.

значения фрактальной размерности трещин, вычисленные в каждой части образца на трех этапах нагружения.

Видно, что после первого этапа в верхней части (*sample part* 6), где трещина еще не образовалась, фрактальная размерность, как и должно быть, равна 0. Далее (*sample part* 4, 5) фрактальная размерность трещины меньше 2, т.е. трещина является ажурной. Ближе к нижнему основанию образца (*sample part* 1–3) фрактальная размерность трещины больше 2.

После второго этапа нагружения система трещин распространилась (проросла) через весь образец. В верхней части фрактальная размерность близка к 2 (2.3–2.4), т.е. трещина имеет форму плоскости. После третьего этапа нагружения фрактальная размерность во всех частях образца имеет значение около 2.5.

На рис. 5 показаны значения относительного объема трещины после каждого этапа нагружения, вычисленные в каждой части. Отчетливо видно,

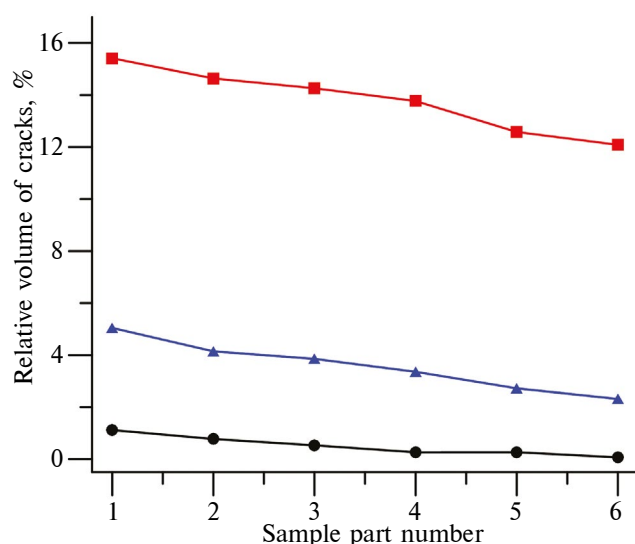


Рис. 5. Значения относительного объема системы трещин в различных частях образца после 1-го (черная линия), 2-го (синяя линия) и 3-го (красная линия) этапов нагружения.

что объем, занимаемый трещиной, растет. Средний относительный объем составляет 0.5%, 3.6% и 13.8% после 1-го, 2-го и 3-го этапов нагружения соответственно. Это является еще одним подтверждением того факта, что система трещин постепенно распространяется на весь объем образца.

Компьютерное моделирование разрушения методом дискретных элементов

Для того чтобы выявить связь локальных параметров, которые не могут быть измерены экспериментально, с макроскопическими проявлениями ранее построена компьютерная модель разрушения гетерогенного материала. Модель основана на методе дискретных элементов (DEM) и подробно описана в работе [Гиляров, Дамаскинская, 2022]. Мы использовали модель связанных частиц (BPM — *bonded particle model*) [Potyondy, Cundall, 2004], которая помогает детально изучить эволюцию дефектов. Расчеты методом дискретных элементов производились в свободно распространяемом пакете программ MUSEN [Dosta, Skorych, 2020]. Модель материала (горной породы) — сферические частицы одного или разных размеров, которые имитируют зерна, и связи между частицами, которые имитируют межзеренные границы.

В модели BPM зарождение трещин определяется разрывом связей между частицами, а их распространение — слиянием множества разо-

рванных связей. Для того чтобы получить трещину из набора связей, разорвавшихся от начала эксперимента до определенного времени, необходима процедура кластеризации (объединение разорванных связей согласно выбранному алгоритму, что будет описано далее). Таким образом, под дефектами в данной работе понимаются кластеры разорванных связей.

Схема компьютерного эксперимента аналогична описанной в работе [Гиляров, Дамаскинская, 2022]. Моделировалось одноосное сжатие: образец помещался в виртуальный пресс, нижняя плита которого была неподвижна, а верхняя перемещалась вниз с постоянной скоростью. Эксперимент заканчивался, когда образец разделялся на части. В процессе эксперимента через равные промежутки времени — интервал сохранения данных — записывался большой набор механических параметров, который использовался для дальнейшего анализа. Этот интервал времени выбирался, исходя из условия стационарности процесса на его протяжении. В настоящей работе такими параметрами были координаты центров связей, разорванных в процессе деформирования образца, и времена разрыва этих связей.

Были проведены численные эксперименты с различными по структуре образцами. Варьировались материал и размеры частиц, материал и диаметр связей. Во всех случаях удалось обнаружить общие закономерности фрактальных свойств очагов разрушения (магистральных трещин) [Hilarov, Damaskinskaya, 2023]. В данной работе эти результаты приведены на примере одного типа образцов.

В модели так же, как и в лабораторном эксперименте, образцы имеют форму цилиндров диаметром 10 мм и высотой 20 мм. Цилиндр заполняется сферическими частицами из кварца, ортоклаза и олигоклаза (число частиц 33670). Размеры частиц представляют собой набор величин со средним значением 0.08 мм и стандартным отклонением 0.025 мм, полученный генератором случайных чисел с нормальным распределением. Все связи имеют свойства ортоклаза, диаметр 0.04 мм.

На рис. 6 показано изменение напряжения в процессе эксперимента. Видно, что данный образец разрушился хрупко, что характерно для песчаника.

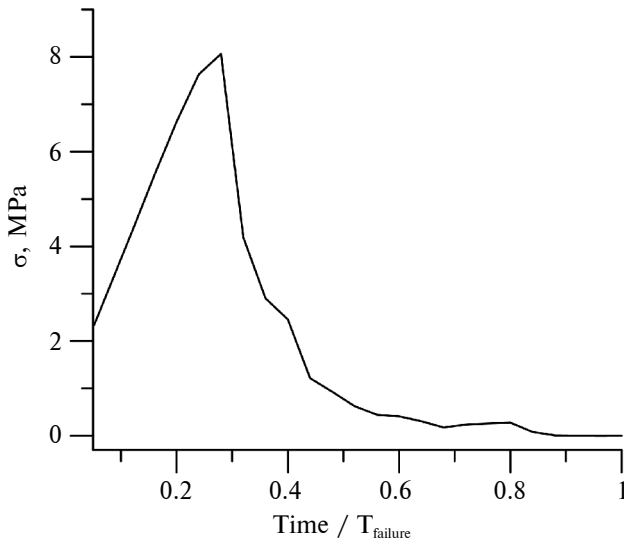


Рис. 6. Изменение напряжения на образце в компьютерном эксперименте. Ось абсцисс — нормированное время эксперимента. (T_{failure} — момент времени, в который образец разделился на части).

Для исследования эволюции дефектов была проведена кластеризация разорванных связей с помощью алгоритма DBSCAN (*density-based spatial clustering of applications with noise* [Ester et al., 1996]), который выполняет кластеризацию на основе плотности составляющих кластер объектов.

Кластеризация связей, разорвавшихся от начала нагружения до момента времени t_n , позволяет получить картину трещин, которые образовались к моменту t_n . При этом размер трещины принимается равным числу связей, объединенных в данный кластер.

В компьютерных экспериментах так же, как и в лабораторных, мы изучали фрактальные свойства магистральной трещины. Фрактальная размерность вычислялась, исходя из пространственного расположения связей, образующих трещину в различные моменты времени.

В качестве основной характеристики рассматривается корреляционная фрактальная размерность D_2 , рассчитанная на основании корреляционной функции Грассбергера и Прокаччи [Grassberger, Procaccia, 1983] (корреляционного интеграла):

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N H(r - r_{ij}). \quad (1)$$

Здесь: r_{ij} — расстояние между парой разорванных связей, в качестве координат которых

выбирались координаты их центров; N — число анализируемых разрывов; H — функция Хевисайда, равная единице, если ее аргумент неотрицателен, и равная нулю в противном случае. Таким образом, функция (1) равна числу пар событий, расстояние между которыми не превосходит r . Если рассматриваемая система обладает масштабной инвариантностью, зависимость $C(r) \propto r^d$, т.е. представляет собой степенную функцию с показателем степени, равным фрактальной размерности множества. Размерность d в этом случае называется корреляционной фрактальной размерностью. Как показано в работах [Grassberger, Procaccia, 1983; Шустер, 1988], эта величина равна размерности D_2 из набора фрактальных размерностей Реньи [Шустер, 1988].

Проведен анализ изменения фрактальной размерности магистральной трещины (максимального кластера) в процессе компьютерного эксперимента (рис. 7). В начале трещина представляет собой дефект близкий к плоскому с фрактальной размерностью ($D_2 \sim 2$). Его рост приводит к тому, что разрушение захватывает все больший объем, что сопровождается увеличением фрактальной размерности. Более детально развитие магистральной трещины описано нами в работе [Дамаскинская, Гиляров, 2024].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована морфология микротрещин, развивающихся в объеме образца горной породы. Непосредственное наблюдение дефек-

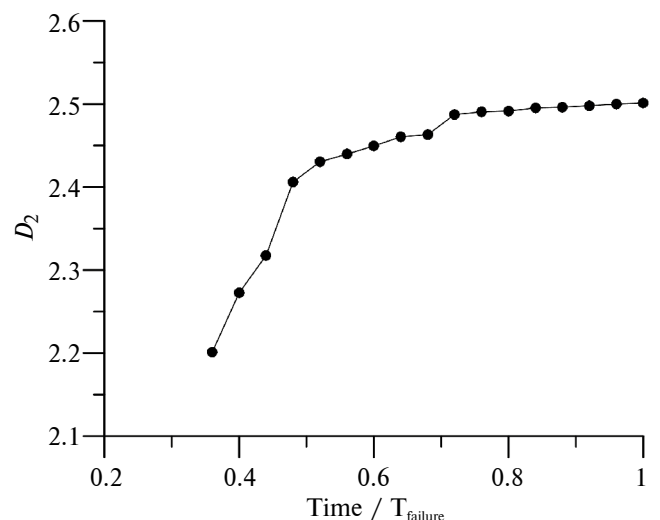


Рис. 7. Изменение фрактальной размерности магистральной трещины в компьютерном эксперименте.

тов в непрозрачном образце, находящемся под действием нагрузки, выполнено с помощью рентгеновской компьютерной микротомографии. На основе анализа томографических срезов вычислены относительная объемная доля и фрактальная размерность трещин на трех этапах нагружения. Установлено, что оба параметра увеличиваются по мере увеличения нагрузки. Это показывает, что система микротрещин становится более развитой и постепенно занимает все больший объем. Данный вывод иллюстрируют построенные трехмерные модели дефектной структуры.

С помощью компьютерной модели разрушения гетерогенного материала, основанной на методе дискретных элементов, исследовано развитие дефектов в процессе нагружения. Компьютерные эксперименты позволили выявить детали образования фрактальных структур магистральных трещин. Хорошее согласие результатов лабораторного и компьютерного экспериментов позволяет говорить о возможности модели описывать структуру развивающейся трещины.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе в части постановки задачи, анализа результатов и компьютерного моделирования.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИЦ “Курчатовский институт” в части проведения и обработки томографических экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”. 2001. 128 с.
- Гиляров В.Л., Дамаскинская Е.Е. Моделирование акустической эмиссии и разрушения поликристаллических гетерогенных материалов методом дискретных элементов // ФТТ. 2022. Т. 64. № 6. С. 676–683.
- Дамаскинская Е.Е., Гиляров В.Л. Особенности эволюции дефектной структуры в модели дискретных элементов // ФТТ. 2024. Т. 66. № 1. С. 142–148.
- Кривоносов Ю.С., Бузмаков А.В., Григорьев М.Ю., Русаков А.А., Дымшиц Ю.М., Асадчиков В.Е. Лабораторный конусно-лучевой рентгеновский микротомограф // Кристаллография. 2023. Т. 68. № 1. С. 160–165.
- Шустер Г. Маломерный хаос. М.: Мир. 1988. 240 с.
- Dosta M., Skorych V. MUSEN: An open-source framework for GPU-accelerated DEM simulations // SoftwareX. 2020. V. 12. P. 100618.
- Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96) / Evangelos Simoudis, Jiawei Han, Usama M. Fayyad (eds.). AAAI Press. 1996. P. 226.
- Feldkamp L.A., Davis L.C., Kress J.W. Practical Con-Beam Algorithm // Journal of the Optical Society of America A. 1984. V. 1. P. 612–619.
- Ghurcher P.L., French P.R., Shaw J.G., and Schramm L.L. Rock Properties of Berea Sandstone, Baker Dolomite, and Indiana Limestone. SPE International Symposium on Oil field Chemistry. 1991. SPE21044 P. 431–446.
- Grassberger P., Procaccia I. Characterization of Strange Attractors // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 346–348.
- Hamiel Y., Katz O., Lyakhovsky V., Reches Z., Fialko Yu. Stable and unstable damage evolution in rocks with implications to fracturing of granite // Geophys. J. Int. 2006. V. 167. P. 1005–1016.
- Hilarov V.L., Damaskinskaya E.E. Fractal features of fracture centers in heterogeneous materials revealed by discrete element method // Mater. Sci. Engin. Technol. 2023. V. 54. № 12. P. 1554–1559.
- Ingacheva A.S., Chukalina M.V. Polychromatic CT Data Improvement with One-Parameter Power Correction // Mathematical Problems in Engineering. 2019. Article ID 1405365.
- Ju Y., Zheng J.T., Epstein M., Sudak L., Wang J.B., Zhao X. 3D numerical reconstruction of well-connected porous structure of rock using fractal algorithms // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2014. V. 279. № 7. P. 212–226.
- Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskaya E., and Lockner D. A two-stage model of fracture of rocks // Pure Appl. Geophys. 1996. V. 146. № 2. P. 253–263.
- Liu P., Ju Y., Gao F., Ranjith P. G., Zhang Q. CT identification and fractal characterization of 3-D propagation and distribution of hydrofracturing cracks in low-permeability heterogeneous rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. V. 123. P. 2156–2173.
- Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite // Nature. 1991. V. 350. P. 39–42.
- Peng R.D., Yang Y.C., Ju Y., LingTao Mao, YongMing Yang. Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images // Chinese Sci Bull. 2011. V. 56. P. 3346–3357.
- Petrůžálek M., Vilhelm J., Rudajev V., Lokajíček T., Svitek T. Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2013. V. 60. P. 208–216.
- Potyondy D.O., Cundall P.A. A bonded-particle model for rock // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2004. V. 41. P. 1329–1364.
- Re J.X. Computerized Tomography Examination of Damage Tests on Rocks under Triaxial Compression // Soil and Rock Behavior and Modeling. 2012.
- [https://doi.org/10.1061/40862\(194\)34](https://doi.org/10.1061/40862(194)34)

- Sheng-Qi Yang, P.G. Ranjith, Yi-Lin Gui. Experimental Study of Mechanical Behavior and X-Ray Micro CT Observations of Sandstone Under Conventional Triaxial Compression // *Geotech. Test. J.* 2015. V. 38. № 2. P. 179–197.
- Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Benard P., Patonin A.V. Regularities in transient modes in the seismic process according to the laboratory and natural modeling // *Izv. Phys. Solid Earth*. 2010. V. 46. P. 104–135.
- Tal Y., Goebel T., J-P Avouac Experimental and modeling study of the effect of fault roughness on dynamic frictional sliding // *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. V. 536. P. 116133.
- Xie H.P. *Fractals in Rock Mechanics*. CRC PRESS, Boca Raton. 1993. — 464 p.
- Xinglin Lei, Shengli Ma Laboratory acoustic emission study for earthquake generation Process // *Earthq Sci*. 2014. V. 27. № 6. P. 627–646.
- Yongming Yang, Yang Ju, Fengxia Li, Feng Gao, Huafei Sun. The fractal characteristics and energy mechanism of crack propagation in tight reservoir sandstone subjected to triaxial stresses // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. V. 32. P. 415e422.
- Yujun Zuo, Zhibin Hao, Hao Liu, Chao Pan, Jianyun Lin, Zehua Zhu, Wenjibin Sun, Ziqi Liu. Mesoscopic damage evolution characteristics of sandstone with original defects based on micro-ct image and fractal theory // *Arabian Journal of Geosciences*. 2022. V. 15. P. 1673.
- Zabler S., Rack A., Manke I., Thermann K., Tiedemann J., Harthill N., Riesemeier H. High-resolution tomography of cracks, voids and micro-structure in greywacke and limestone // *Journal of Structural Geology*. 2008. V. 30. P. 876–887.
- Zhou X.P., Zhang Y.X., Ha Q.L. Real-time computerized tomography (CT) experiments on limestone damage evolution during unloading // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2008. V. 50. P. 49–56.

Evolution of Microcracks in the Rock Deformation Process: X-Ray Microtomography and Discrete Element Method

E. E. Damaskinskaya^{a,*}, V. L. Gilyarov^a, Yu. S. Krivonosov^b, A. V. Buzmakov^b,
V. E. Asadchikov^b, and D. I. Frolov^a

¹*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

²*National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

*e-mail: kat.dama@mail.ioffe.ru

Received October 10, 2024; revised November 26, 2024; accepted December 25, 2024

Abstract — In this study, we directly observed microcracks formed in a sample of rock under uniaxial compressive load. Detection of defects in the volume was carried out with the help of X-ray computed microtomography. The peculiarity of the experiments is that a tomographic image of the sample was taken directly under mechanical load. Based on the analysis of tomographic slices, the fractal dimension and relative volume of microcracks were calculated at three stages of loading. Three-dimensional models of the defect structure were constructed to illustrate the change in the morphology of the main crack. Numerical experiments on the fracture of samples of heterogeneous materials have been carried out using the discrete element model. The change in the fractal dimension of main cracks in the process of their growth was investigated. A good agreement between the results of computer simulations and laboratory experiments has been established, which indicates the adequacy of the proposed model and allows in further studies to use it to study the behavior of local parameters that cannot be measured experimentally.

Keywords: X-ray computed microtomography, defect evolution, computer modeling, discrete element method, fractal dimension