

Исследование параметров микротрещин в образцах песчаника и гранита при поэтапном нагружении методами рентгеновской микротомографии и компьютерного моделирования

Ю.С. Кривоносов¹, А.В. Бузмаков¹, Е.Е. Дамаскинская², В.Л. Гиляров², В.Е. Асадчиков¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт», 123098 площадь Академика Курчатова, д. 1, Москва, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021 Политехническая ул., д. 26, Санкт-Петербург, Россия

Исследование процессов разрушения гетерогенных материалов, таких как горные породы, является актуальной задачей в таких областях науки и техники, как строительство и разработка месторождений полезных ископаемых. Понимание механизмов образования и развития микротрещин под действием механических напряжений позволяет прогнозировать поведение материалов в естественных условиях и при эксплуатации ответственных конструкций.

Данная работа посвящена прямому наблюдению и количественному анализу морфологии микротрещин в образцах природных гетерогенных материалов (песчаник Berea, гранит Westerly) под действием одноосной сжимающей нагрузки. Ключевой особенностью проведенных исследований является непосредственное наблюдение дефектов в объеме образцов в процессе нагружения. Для этого использовался конусно-лучевой рентгеновский микротомограф «МИКРОТОМ» (НИЦ «Курчатовский институт») в сочетании со специальной переносной нагрузочной ячейкой. Данное устройство позволяет поддерживать постоянную нагрузку на образец в процессе томографического эксперимента, не препятствуя процессу измерения. С помощью рентгеновской микротомографии были получены трехмерные изображения структуры образцов песчаника и гранита на различных этапах деформирования (см. рис. 1.).

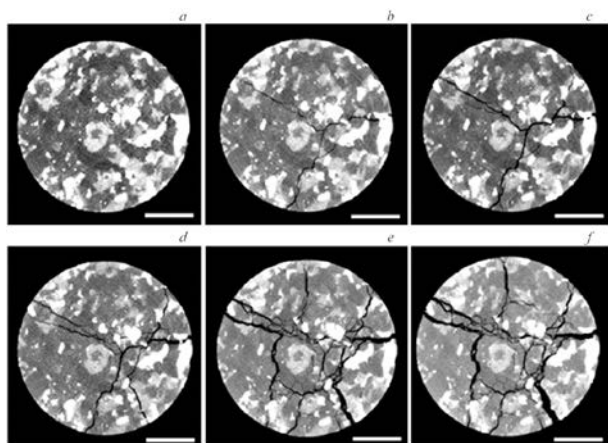


Рис. 1. Томографические сечения образца гранита: а) исходный образец; b, c, d, e, f) образец после каждого этапа нагружения. Длина штриха равна 2 мм.

Анализ томографических данных позволил выявить, что с увеличением приложенной нагрузки

происходит увеличение как фрактальной размерности системы микротрещин (определенной методом box counting), так и их относительного объема. Это свидетельствует о прогрессирующем развитии дефектной структуры и постепенном вовлечении в этот процесс все большей доли объема образца.

Параллельно с экспериментальными исследованиями была разработана компьютерная модель разрушения гетерогенных материалов на основе метода дискретных элементов (DEM). Модель, реализованная в пакете программ MUSEN, позволяет исследовать эволюцию дефектной структуры и особенности процесса разрушения. Численные эксперименты по одноосному нагружению образцов с различной внутренней структурой показали хорошее согласие с результатами лабораторных исследований. Удалось выявить детали образования фрактальных структур магистральных трещин и проследить изменение корреляционной фрактальной размерности кластеров дефектов в процессе их роста.

Сопоставление экспериментальных данных рентгеновской микротомографии с результатами моделирования показало, что разработанная компьютерная модель демонстрирует свою адекватность и способность описывать эволюцию дефектной структуры в процессе механического нагружения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение спектра исследуемых материалов, изучение влияния различных видов нагружения, а также на более детальный анализ связи между микроструктурой материала и параметрами развития трещин.

Результаты исследований опубликованы в работах [1, 2].

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в части проведения и обработки томографических экспериментов. Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе в части постановки задачи, анализа результатов и компьютерного моделирования.

1. Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, Ю.С. Кривоносов, А.В. Бузмаков, В.Е. Асадчиков, Д.И. Фролов / Физика твердого тела. 2024. Том 66. Вып. 9. С. 1623 – 1630.
2. Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, Ю.С. Кривоносов, А.В. Бузмаков, В.Е. Асадчиков, Д.И. Фролов / Физика твердого тела, 2026, том 68, вып. 2. С. 336 – 341.