14

Особенности разрушения материала, представляющего матрицу с низкопрочным включением, в модели дискретных элементов

© Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров

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

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

Поступила в Редакцию 6 февраля 2026 г.
В окончательной редакции 16 февраля 2026 г.
Принята к публикации 16 февраля 2026 г.

Построена модель разрушения материала, представляющего собой матрицу с включением, основанная на методе дискретных элементов. Рассмотрен вариант материала, в котором включение имеет существенно более низкие значения прочности и модуля упругости по сравнению с матрицей. Показано, что определяющее влияние на развитие разрушения оказывают свойства границы между включением и матрицей. В противоположном случае, когда в материале прочное включение находится в пластичной матрице, независимо от свойств интерфейса, в первую очередь разрушаются прочные связи с высоким модулем.

Ключевые слова: модель связных частиц, материал с включением, напряжение, деформация.

DOI: 10.61011/FTT.2026.02.62727.9071

1. Введение

Для описания механического поведения гетерогенных материалов, в том числе горных пород, в последнее время широко используется метод дискретных элементов (DEM) [1–5]. Принципиальное отличие и преимущество данного метода, по сравнению с моделями, основанными на представлениях механики сплошных сред — например, [6], состоит в том, что он позволяет естественным образом моделировать образование дефекта (трещины).

В предыдущей работе [7] была предложена модель, которая адекватно описывает некоторые особенности разрушения гетерогенных материалов в тех случаях, когда основные процессы протекают по границам зерен.

В настоящей работе эта же модель используется для выявления особенностей разрушения материала, представляющего собой однородную матрицу с включением, обладающим более низкими прочностью и модулем. Интерес к такого рода исследованиям связан с тем, что нефтеносные породы, вмещающие нефть и газ, чаще всего не формируют сплошной слой в разрезах нефтегазоносных регионов, а перемежаются слоями иных геологических образований. Подобные сочетания слоев называются нефтегазовыми свитами. Обычно продуктивные зоны окружены плотными, малопроницаемыми породами, образуя своего рода природные хранилища [8,9]. С этой точки зрения, модель матрица–включение можно рассматривать как первое приближение таких свит.

Задача настоящей работы заключается в определении влияния свойств интерфейса (границы) между включением и матрицей на особенности развития процесса разрушения.

2. Описание компьютерного эксперимента

Схема компьютерного эксперимента аналогична описанной в работе [7]. Мы использовали модель связных частиц (bonded particle model, BPM), которая подробно описана в [10]. Модель материала (горной породы) — сферические частицы одного или разных размеров, которые имитируют зерна, и связи между частицами, которые имитируют межзеренные границы.

Модельные эксперименты выполнялись в свободно распространяемом пакете программ MUSEN [11].

Моделировались образцы цилиндрической формы диаметром 10 mm и высотой 20 mm. Во всех образцах матрица моделировалась набором частиц, имеющих свойства ортоклаза. В образцах I типа материал интерфейса (связи, соединяющие частицы матрицы и включения) ортоклазовый, в образцах II типа — низкомодульный (как и включение). В образцах каждого типа частицы матрицы имели одинаковый размер — 1 или 0.8 mm, общее число частиц матрицы — 1800 и 3514 соответственно. В центре образца помещалось включение неправильной формы, состоящее из 192 частиц, соединенных 467 связями (рис. 1, a). Частицы и связи включения имеют гораздо более низкие прочность и модуль Юнга по сравнению с частицами матрицы. Физико-механические параметры материалов, из которых состоят частицы и связи матрицы и включения, приведены в таблице.

Для имитации одноосного сжатия образец помещался в виртуальный пресс, нижняя плита которого была неподвижна, а верхняя перемещалась вниз с постоянной скоростью $V = 0.02$ m/s. Эксперимент заканчивался, когда образец разрушался (разделялся на части). В процессе эксперимента через равные промежутки времени

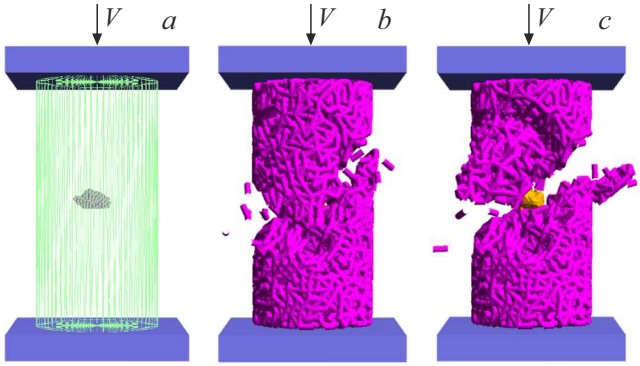

Рис. 1. Модель образца с включением: *a*) серым цветом показано включение (вертикальные зеленые линии ограничивают виртуальный цилиндр); *b* и *c*) картины разрушения образца в последовательные моменты времени.

Параметры материалов, использованные при моделировании

	ρ, kg/m^3	E, GPa	ν	σ_n, MPa	σ_t, MPa	η, Pa · s
Материал матрицы (ортоклаз)	2560	62	0.29	420	420	1E19
Материал включения (низкомодульный)	2500	5.8	0.2	100	100	5E19
Стекло	2500	50	0.22	50	50	1E40

Здесь: ρ — плотность материала, E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона, σ_n — прочность материала на разрыв, σ_t — прочность материала на сдвиг, η — динамическая вязкость.

записывался большой набор механических параметров, который использовался для дальнейшего анализа. В настоящей работе такими параметрами были координаты центров связей, разорванных в процессе деформирования образца, времена разрыва этих связей, а также деформация и напряжения на связях.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены типичные кривые изменения напряжения в процессе эксперимента и кинетика разрыва связей в образцах обоих типов ($t_{\text{norm}} = t/t_{\text{destruction}}$, где $t_{\text{destruction}}$ — время, когда образец разделился на части). Видно, что имеет место хрупкое разрушение. В образце I типа (интерфейс — ортоклаз) в первую очередь происходит разрушение низкомодульного включения. В образце II типа (интерфейс состоит из низкомодульных связей) наблюдается противоположная картина: разрушение начинается в матрице. Этот результат иллюстрирует рис. 3, на котором показаны Z-координаты (по высоте образца) разрушающихся связей.

Для выяснения причины разного поведения образцов были построены зависимости изменения максимальных деформаций и растягивающих напряжений на связях (рис. 4).

В образце с прочным интерфейсом вплоть до момента резкого падения напряжения, которое связано с потерей несущей способности образца и разделения его на части, деформация матрицы значительно превосходит деформацию включения. Но поскольку прочность включения ниже прочности матрицы, разрушается включение.

В образце с низкомодульным интерфейсом максимальная деформация связей включения значительно превосходит деформацию связей матрицы. Благодаря низкому модулю эти связи имеют способность к деформированию без разрушения. Поэтому в первую очередь разрушаются высокомодульные (высокопрочные) ортоклазовые связи матрицы (рис. 5).

В случае низкомодульного интерфейса деформации, которые достигаются на включении, выше, чем в случае прочного интерфейса. Связи имеют большую возможность деформироваться без разрушения.

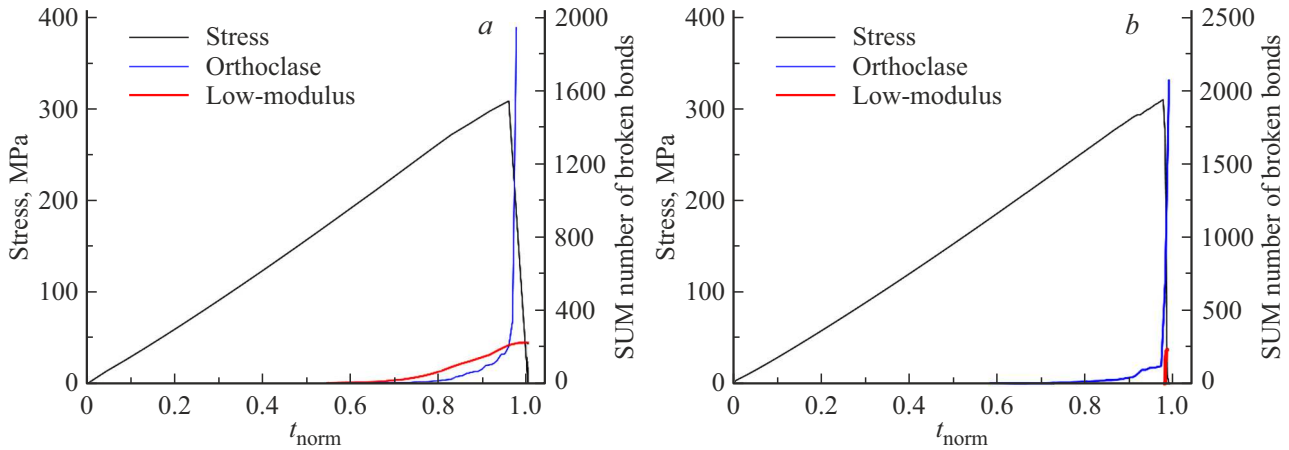

Рис. 2. Типичные диаграммы нагружения образцов и кинетика разрыва связей: *a*) образец I типа, *b*) образец II типа.

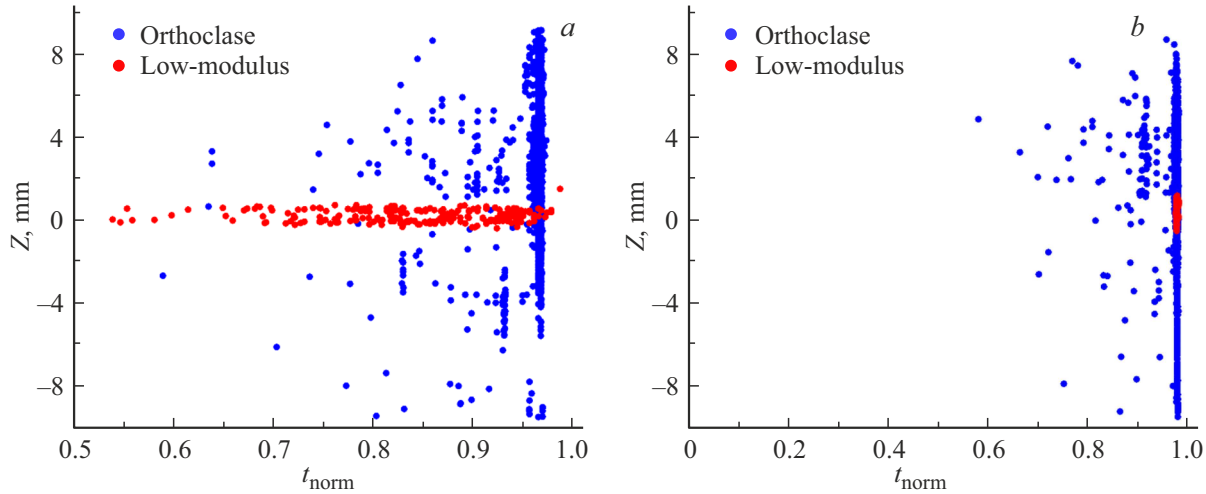

Рис. 3. Z-координаты разрушающихся связей в процессе эксперимента: *a*) образец I типа, *b*) образец II типа.

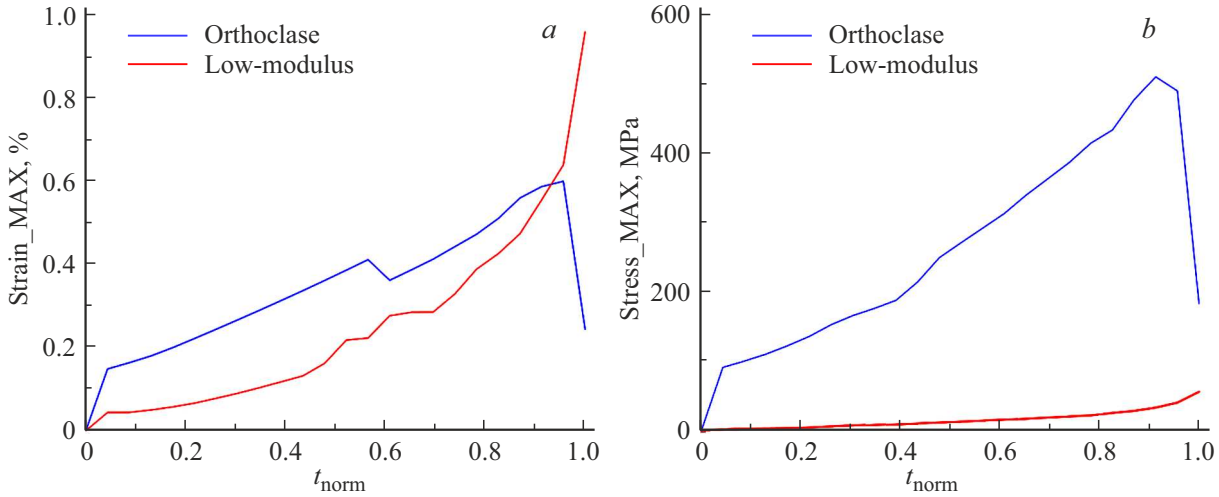

Рис. 4. Изменение деформации и напряжения на связях в процессе деформирования образца с прочным интерфейсом.

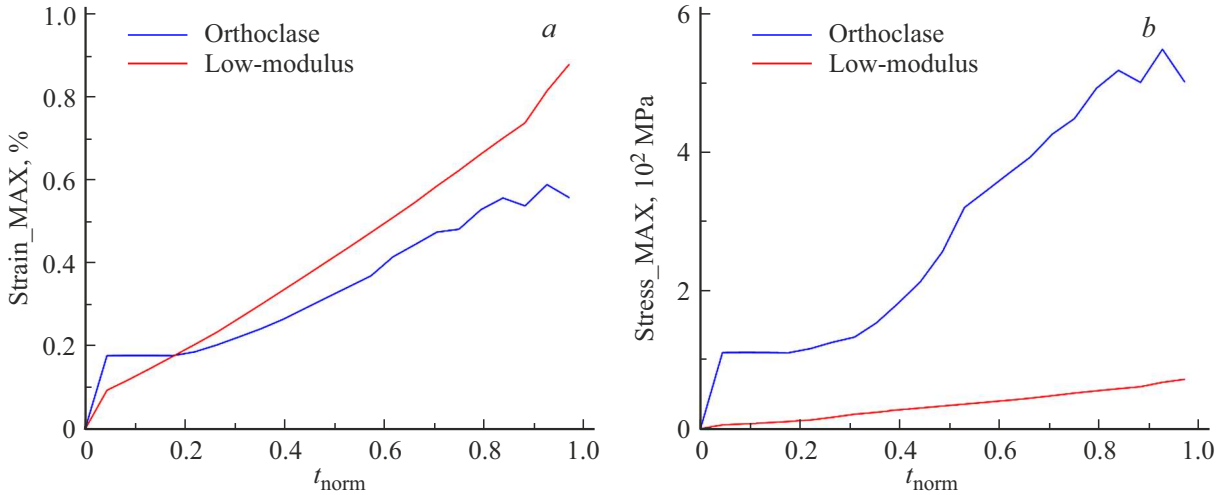

Рис. 5. Изменение деформации и напряжения на связях в процессе деформирования образца с низкомодульным интерфейсом.

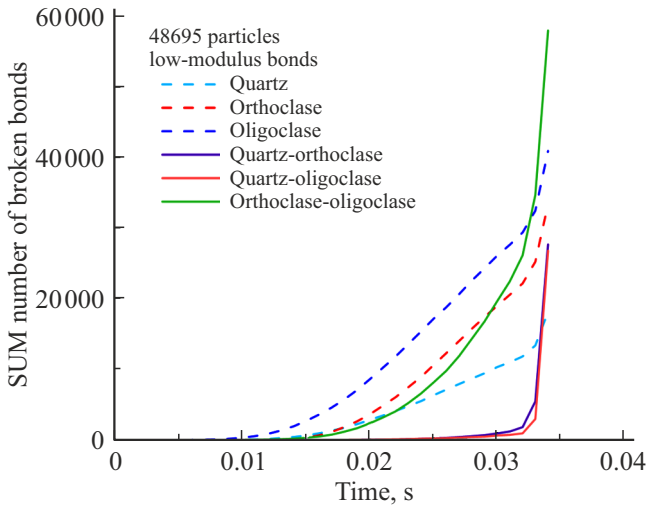

Рис. 6. Кинетика разрушения связей в гетерогенном образце без включений.

В работе [12] исследовалось разрушение образца, состоящего из частиц кварца, ортоклаза и олигоклаза, соединенных прочными и низкомодульными связями. В этом образце низкомодульные связи распределены случайным образом, в отличие от вышеописанных образцов с включением. Кинетика разрушения связей в этом образце показана на рис. 6. Видно, что в первую очередь разрушаются высокопрочные связи. Менее прочные связи остаются целыми за счет их способности к деформированию из-за низкого модуля упругости.

Чтобы более отчетливо выявить роль материала границы между низкомодульным включением и прочной матрицей, был проведен эксперимент, в котором частицы включения и матрицы соединялись хрупкими стеклянными связями (свойства приведены в таблице). В данном случае, как и следовало ожидать, в первую очередь разрушаются стеклянные связи (рис. 7), затем прочные связи матрицы и само включение.

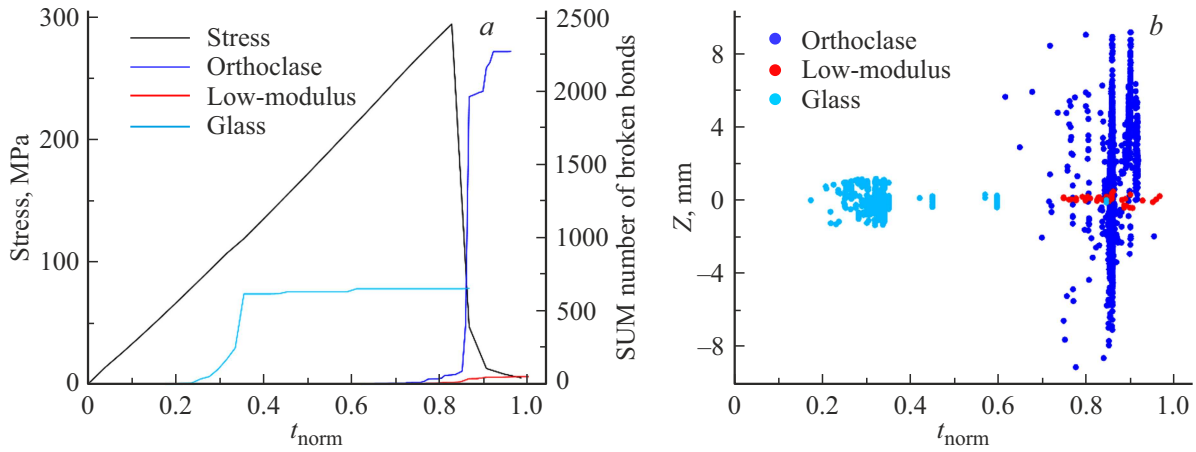

Рис. 7. Деформирования образца со стеклянным интерфейсом между включением и матрицей: *a*) изменение напряжения и кинетика разрушения связей; *b*) *Z*-координаты разрушающихся связей.

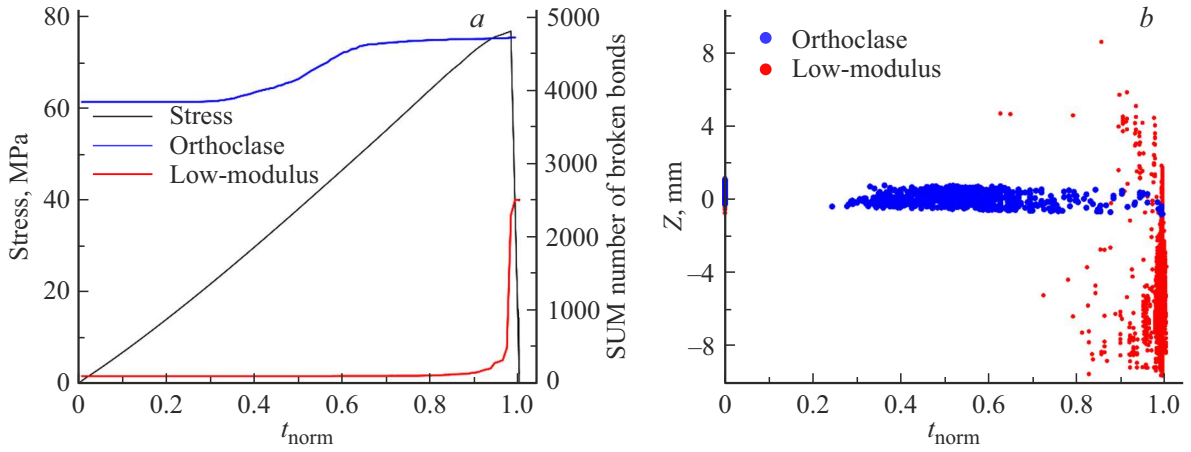

Рис. 8. Деформирование образца III типа: *a*) изменение напряжения и кинетика разрушения связей; *b*) *Z*-координаты разрушающихся связей.

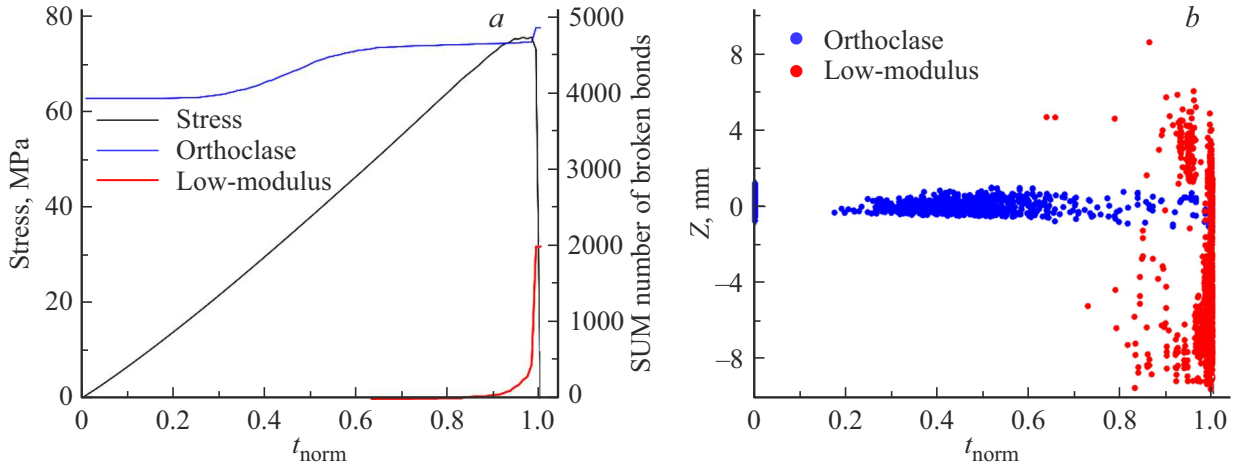

Рис. 9. Деформирования образца IV типа: *a*) изменение напряжения и кинетика разрушения связей; *b*) *Z*-координаты разрушающихся связей.

Представляет интерес сравнить особенности разрушения образцов с низко-прочным включением в прочную матрицу и образцов с прочным включением в низкопрочную матрицу, что характерно для композиционных материалов с пластичной матрицей, армированной хрупкими прочными включениями. Для этого были проведены эксперименты с образцами, в которых частицы и связи матрицы имели свойства низкомодульного материала (см. таблицу), а частицы и связи включения имели свойства ортоклаза (см. таблицу). В этом случае так же, как и в описанных выше экспериментах, были рассмотрены два типа (границы между включением и матрицей: в образцах III типа материал интерфейса низкомодульный, в образцах IV типа — прочный (ортоклаз).

На рис. 8, *a* показано изменение напряжения и кинетика разрушения связей при деформировании образца III типа. Видно, что в первую очередь разрушаются прочные связи, соединяющие частицы включения. Этот результат наглядно иллюстрирует рис. 8, *b*, на котором показаны *Z*-координаты разрушающихся связей.

Аналогичную картину мы наблюдаем и при разрушении образцов IV типа (рис. 9).

Таким образом, в случае прочного включения в низкомодульной матрице независимо от свойств интерфейса, в первую очередь разрушаются прочные связи с высоким модулем.

4. Заключение

Построена компьютерная модель, основанная на методе дискретных элементов, которая позволяет выявлять особенности развития разрушения в материалах, представляющих собой однородную матрицу с внедренным в нее включением, отличающимся физико-механическими свойствами. Изучено влияние свойств интерфейса (границы между матрицей и включением) на развитие процесса разрушения. Рассмотрено два типа материалов: I тип — включение имеет более низкий модуль упругости и предел прочности, чем материал матрицы; II тип — прочное включение в пластичной матрице.

Установлено, что в материале I типа в случае прочного интерфейса в первую очередь разрушается низкомодульное включение. Если же интерфейс обладает более низким модулем и прочностью по сравнению с матрицей, то в первую очередь разрушаются высокомодульные (высокопрочные) связи матрицы. Таким образом, проведенные компьютерные эксперименты позволили выявить определяющую роль свойств границы между включением и матрицей в развитии разрушения.

В материале II типа, независимо от свойств интерфейса, в первую очередь разрушаются прочные связи с высоким модулем.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Lisjak, G. Grasselli. J. Rock Mech. Geotech. Eng. **6**, *4*, 301 (2014).
[2] P.A. Cundall. Proceed. Symp. Int. Soc. Rock Mech. **1**, 11, Nancy, France (1971).
[3] X.P. Zhang, L.N.Y. Wong. Rock Mech. Rock Eng. **45**, *5*, 711 (2012).
[4] J.F. Hazzard, R.P. Young. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. **41**, *8*, 1365 (2004).
[5] S. Invernizzi, A. Carpinteri, G. Lacidogna, A. Manuello. In: Experimental Mechanics on Emerging Energy Systems and Materials, v. **5**. Springer (2010). Pp. 109–116.
[6] D. Krajcinovic. Mech. Mater. **8**, *2-3*, 117 (1998).
[7] В.Л. Гиляров, Е.Е. Дамаскинская. ФТТ **64**, *6*, 676 (2022). [V.L. Hilarov, E.E. Damaskinskaya. Phys. Solid State **64**, *6*, 664 (2022).]

[8] Ш.К. Гиматудинов, А.И. Ширковский. Физика нефтяного и газового пласта. Недра, М. (1982). 310 с.
[9] Т.Б. Кочина, В.Н. Спиридонова, Н.Н. Родионцев, И.А. Круглов. Физика пласта: Учебное пособие. Изд. Нижневарт. гос. ун-та, Нижневартовск (2017). 214 с.
[10] D.O. Potyondy, P.A. Cundall. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. **41**, *8*, 1329 (2004).
[11] M. Dosta, V. Skorych. SoftwareX **12**, 100618 (2020).
[12] V.L. Hilarov, E.E. Damaskinskaya. Mater. Phys. Mech. **53**, *1*, 38 (2025).

Редактор Е.В. Толстякова