

УДК 539.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПОРЯДОЧЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ДВУХМАСШТАБНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПРИ СЖАТИИ

© 2020 г. В. В. Мокряков^а, Н. М. Осипенко^{а,*}

^а *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*

**e-mail: osipnm@mail..ru*

Поступила в редакцию 10.02.2020 г.

После доработки 25.03.2020 г.

Принята к публикации 10.04.2020 г.

Статья содержит анализ кинетики процессов хрупкого разрушения при сжатии двухмасштабной пористой среды, в которой более крупный масштаб, связан с системой отверстий. Работа является продолжением исследований структур разрушения в условиях сжатия. В рамках проекта проведены эксперименты на образцах из пористого хрупкого модельного материала (гипс), содержащих ряд отверстий различной ориентации по отношению к оси сжатия. Они показали, что разрушение в окрестности отверстий в таких материалах при сжатии может развиваться как посредством инициирования трещин нормального разрыва, так и путем локализации компактирования. В модельной ситуации с системой отверстий выбор механизма формирования локальных очагов разрушения зависит от ориентации системы отверстий относительно оси сжатия. Для интерпретации результатов экспериментов проведен расчет напряженного состояния нагружаемой системы. Приведен краткий обзор эффектов локального компактирования при сжатии.

Ключевые слова: структура, разрушение, пористость, компактирование

DOI: 10.31857/S0572329920040108

1. Введение. Работа посвящена анализу процессов разрушения в хрупком пористом модельном материале (гипс) в окрестности линейной системы отверстий и является продолжением исследований структур разрушения в условиях сжатия [1–4].

Собственный масштаб структуры пористой среды дополняется более крупным масштабом, заданным регулярной системой отверстий, в окрестностях которых локально изменяется напряженное состояние пористой среды. Влияние второго выделенного масштаба значительно изменяет характер разрушения. В серии экспериментов на образцах гипса (пористость ~30%) продемонстрировано несколько вариантов формирования структуры разрушения в зависимости от ориентации ряда отверстий относительно оси сжатия. При сжатии со стеснением, вызванным, в частности, влиянием соседних отверстий, наблюдается смена форм разрушения, связанных с активностью элементов структуры меньшего масштаба и реализующихся в областях концентрации напряжений растяжения (трещины нормального разрыва) и сжатия (локальные трещиноподобные области локализация уплотнения – компактирования) в окрестности отверстий. В первом случае очаг разрушения инициируется в области локальных растягивающих напряжений в окрестности контура отверстия в направлении оси сжатия, что соответствует распределению нормальных напряжений на контуре отверстия. Другой характер разрушения – формирование очага разрушения (компактирования) в

области максимального сжатия наблюдается вблизи отверстий только в структурированных (пористых) средах.

Сценарий развития образующихся дефектов меняется от преобладания разрывных нарушений для цепочки отверстий, вытянутой вдоль оси сжатия, до преимущественного развития областей компактирования при значительном отклонении от этой ориентации. В промежуточном варианте ориентации по различным траекториям развиваются оба механизма разрушения, что приводит к образованию отдельностей, формирующих подвижный слой – “третье тело” – в области разрушения между блоками материала вне цепочки отверстий. Для интерпретации экспериментов проведены расчет и анализ напряженного состояния нагружаемой системы отверстий при сжатии. В связи со значимостью эффектов компактирования при сжатии ниже приведен краткий обзор этого аспекта механики разрушения.

2. Компактирование пористых материалов при сжатии (трещины сжатия). В развитой ранее модели хрупкого разрушения пористых сред под действием напряжений, близких к одноосному сжатию [5] посредством ориентированных вдоль главных сжимающих напряжений магистральных разрывов основная роль принадлежит разрушению при локальном растяжении, вызванном структурными концентраторами напряжений (порами, включениями и др.).

В условиях интенсивных сжимающих нагрузок, в высокопористых материалах проявляются специфические формы разрушения, связанные с локализованным уплотнением за счет заполнения порового пространства, либо частичного удаления материала или изменения его фазового или структурного состояния [6, 7]. Инициирование такого вида разрушения может реализоваться в окрестности концентратора напряжений (отверстия). Образующаяся при разрушении вытянутая полость, заполненная уплотненной, но сохраняющей подвижность, средой зарождается в диаметральной плоскости иницирующего отверстия поперек оси сжатия, а ее поперечный размер в развитой концевой части близок к постоянному, и не связан с размером отверстия. Недавние лабораторные исследования показали, что локализация уплотнений является важным механизмом разрушения в пористых горных породах (песчаниках с пористостью от 13 до 28%). Обзор этих работ можно найти, например в [6–8]. Образование зон уплотнения сопровождается всплесками акустической активности и уменьшением нагрузки, приложенной к образцу [9]. Полевые наблюдения также позволяют связать развитие узких полос уплотнения с действием локальной концентрации напряжений. Например, было отмечено образование полос уплотнения вблизи вершины сдвига при сжатии [10]. В лабораторных испытаниях на образцах песчаника было обнаружено, что инициирование зон уплотнения происходит в областях концентрации напряжений сжатия в окрестностях скважин или надрезов. Энергия, необходимая для развития полос уплотнения, оценивалась в диапазоне от 6 до 43 кДж/м² [11]. Это более чем в 10³ раз превышает удельную поверхностную энергию, затрачиваемую при развитии трещин нормального разрыва в горных породах (порядка 1 Дж/м²), но сопоставимо с удельной энергией сдвигового разрушения для горных пород при трехосном сжатии [12]. Микромеханизмы, участвующие в формировании полос уплотнения и сдвига (интенсивное развитие микротрещин, смещение и дробление зерен), похожи и характеризуются необратимым рассеиванием значительного количества энергии. Оценки этой энергии, основанные на лабораторных испытаниях, находятся в хорошем согласии с полевыми наблюдениями (около 40 кДж/м²) [13, 14]. Образующиеся вытянутые дефекты геометрически подобны трещине (их продольный размер много больше характерной толщины), а процессы разрушения в их окрестностях сосредоточены в малых концевых областях. В результате локализации уплотнения происходит потеря проницаемости среды на несколько порядков [10, 15, 16]. Узкие трещиноподобные зоны уплотненного материала, интерпретируемые как трещины сжатия

(anti-mode 1 crack), наблюдаются и в тектонических структурах сжатия в окрестности вершины разлома (магистрального тектонического сдвига) [10]. Условия предельного равновесия таких дефектов (трещин сжатия) в упругой среде аналогичны условиям равновесия трещин, имеющих начальное раскрытие. Поэтому для анализа разрушения таких объектов (трещин сжатия) может быть привлечен аппарат механики разрушения. В [14] представлена дислокационная модель распространения такого образования (compact band).

Аналогичное представление зоны уплотнения в виде трещины сжатия с подвижным заполнением предложено в [2, 3]. Трещина сжатия представляет собой вытянутую узкую прямолинейную полость, заполненную продуктами разрушения (уплотненной массой). Ось сжатия нормальна к оси трещины. Полость трещины имеет некоторое начальное раскрытие, обусловленное наличием исходной пористости и геометрической возможностью реализации процессов нарушения исходной структуры, приводящей к уплотнению среды в концевой области. В рассмотренном варианте трещины сжатия имеют сложный характер движения, включающий в себя, в частности, неустойчивую фазу и переход к устойчивому развитию при однородном сжатии, чем отличаются от трещин нормального разрыва в ситуации однородных нагрузок [2].

В плоской модели трещина сжатия – прямолинейная полость, заполненная продуктами разрушения или уплотненной массой раздробленного материала, вытянутая по нормали к напряжениям сжатия. Если продукты разрушения имеют возможность перемещаться в полости трещины сжатия, происходит выравнивание внутреннего давления по длине трещины сжатия. Согласно предложенной ранее схеме [3], для упругой заполняющей среды в плоской модели результирующая разница напряжений на берегах трещины сжатия при этом будет

$$\Delta\sigma = \sigma_{\infty} \left(1 + \frac{E^* \ell}{E h_0} \frac{\pi}{(1 - \mu^2)} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

где ℓ – полудлина трещины сжатия, E, E^* – соответственно модуль упругости исходного материала и среды заполнения полости трещины, σ_{∞} – внешнее нормальное давление, μ – коэффициент Пуассона.

Величина $\Delta\sigma$ уменьшается с увеличением длины трещины сжатия. Коэффициент интенсивности напряжений для трещины в однородно нагруженной плоскости приобретает вид

$$K_I = \sqrt{\pi\ell} \left(1 + \frac{v_0}{h_0\ell} - k + \frac{k\sigma_{\infty}}{E^*} \right) \left(\frac{k}{E^*} + \frac{\pi(1 - \mu^2)\ell}{E h_0} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

где v_0 – свободный начальный объем, h_0 – начальное раскрытие трещины сжатия, $k \sim v_f/v_s$ – коэффициент изменения объема при разрушении среды в концевой области (коэффициент уплотнения), v_f – объем среды в конечном (разрушенном) состоянии, v_s – объем в начальном состоянии ($k < 1$ соответствует ситуации уплотнения, $k > 1$ – разрыхления).

Параметр h_0 зависит от условий разрушения в концевой области эффективной трещины сжатия. При хрупком разрушении высокопористой среды образование полости конечной ширины, необходимой для перемещения продуктов разрушения связано с формированием в концевой области свода из фрагментов предварительно нарушенной среды, последующее разрушение (или потеря устойчивости) которого определяют продвижение трещины сжатия. Оценки показывают в частности, что в варианте, когда предельное равновесие на контуре концевой области определяется условиями

устойчивости выстилающего слоя зернистой среды, соотношение между начальным раскрытием и размером зерен (d) имеет вид:

$$h_0 = 2r \approx (6-10)d \quad (2.3)$$

Для демонстрации режима разрушения представляет интерес вариант $v_0 \neq 0$, $k = 1$. Для этого варианта из (2.2) получим

$$K_I = \left(\frac{v_0 E^*}{h_0 \ell} + \sigma_\infty \right) \left(1 + \frac{\pi(1 - \mu^2) E^* \ell}{E h_0} \right)^{-1} \sqrt{\pi \ell} \quad (2.4)$$

Существует физическое ограничение применимости предложенной модели. При некоторой длине трещины сжатия ее берега в средней части должны сомкнуться (либо теряться подвижность слоя продуктов разрушения в области наибольшего сближения берегов), после чего развитие процесса разрушения идет в двух сегментах, разделенных областью смыкания.

Разрушение начинается на границе исходного отверстия в области максимального сжатия и затем, по мере развития полости, очаг разрушения передвигается от границ отверстия вглубь окружающего материала, отслеживая концентрацию максимального сжатия. При этом часть нарушенного материала из очага разрушения выдавливается в сторону свободной границы (контура отверстия). Характерное раскрытие в концевой зоне порядка нескольких размеров зерен, слагающих пористую среду. Важно отметить, что развитие узкой трещиноподобной зоны компактирования под влиянием сопротивления продуктов разрушения по (2.4) происходит в устойчивом режиме, когда для увеличения ее размера требуется увеличить нагрузку. Описанная картина соответствует наблюдениям и экспериментальным данным, опубликованным в последнее время в ряде работ [7]. Узкие трещиноподобные зоны уплотненного материала, интерпретируемые как трещины сжатия (anti-mode 1 crack), наблюдаются и в тектонических структурах сжатия в окрестности вершины разлома (магистрального тектонического сдвига) [10].

Представляет интерес сценарий разрушения при возможности участия двух описанных микромеханизмов хрупкого разрушения двухмасштабной пористой среды, в которой более крупный масштаб задан регулярной системой крупных дефектов (отверстий). Качественная картина разрушения такой среды представляется следующей: При различном сочетании напряжений в окрестности дефектов могут быть инициированы один или оба микромеханизма разрушения. Влияющие на выбор варианта разрушения локальные вариации напряжений в окрестности дефектов зависят, в том числе, от их взаимного расположения. Отметим, что поскольку оба вида разрушения – разрывы и трещины сжатия – в окрестности одиночных отверстий при однородном внешнем сжатии имеют устойчивый режим развития, возможны режимы разрушения, в которых они действуют одновременно. Это дает возможность реализации структур разрушения с выделением фрагментов, границы которых формируются двумя различными механизмами разрушения.

3. Сценарии разрушения структурированной среды при сжатии. Модельные эксперименты. Развитие упомянутых структур разрушения наблюдалось на гипсовых образцах с рядом отверстий. Образцы размером (30 × 45 × 15 мм) с прямолинейным рядом сквозных цилиндрических отверстий диаметром 2 мм, отстоящими друг от друга на фиксированное расстояние (5 мм) и ориентированным под различными углами α к оси нагружения (рис. 1), сжимались между плитами пресса. Работа была дополнена анализом полей напряжений в окрестности отверстий в прямолинейном ряду.

Для построения полей напряжений разработана численная модель и компьютерная программа, основанная на методе конечных суперэлементов. Эффективность метода состоит в том, что он позволяет описать неоднородную область (коррелированную с

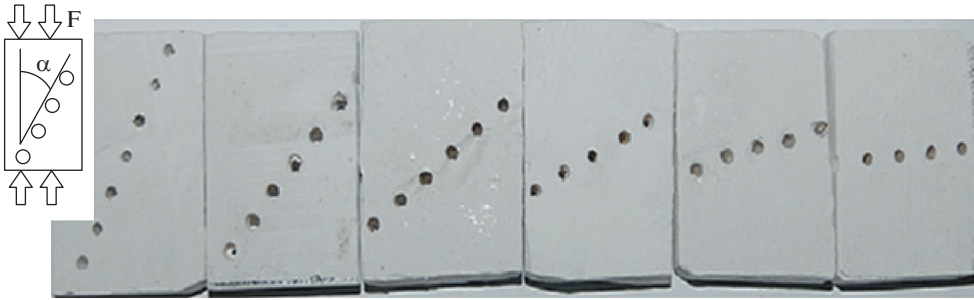


Рис. 1

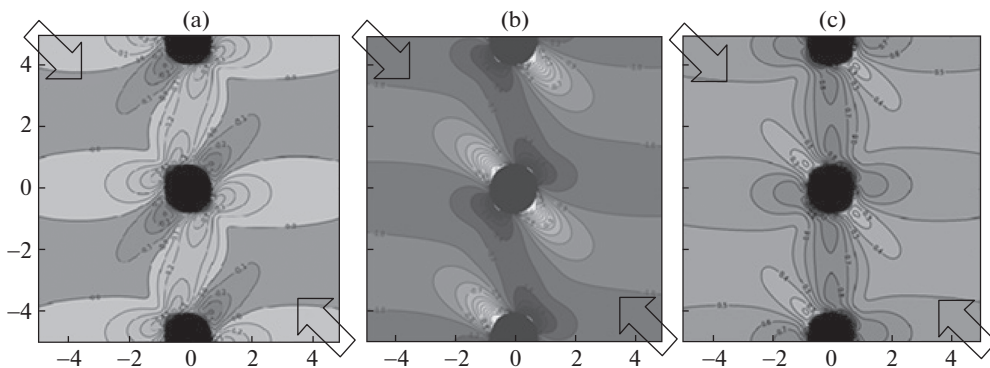


Рис. 2

суперэлементом) с помощью ее граничных значений. Алгоритм исключает из расчета узлы, описывающие напряженно-деформированное состояние внутренней части описываемой области, используя только узлы (или параметры), относящиеся к поверхности области. Рассматривается задача теории упругости для области, содержащей ряд отверстий при однородном вертикальном давлении. Предложенная модель равномерно описывает физическую структуру суперэлемента без построения сетки для каждого отдельного суперэлемента [17]. На рис. 2 показан пример расчета полей главных напряжений при сжатии упругой пластины с цепочкой отверстий, расположенной под углом 45° к оси сжатия (a – σ_{\max} , b – σ_{\min} , c – τ_{\max}).

В серии экспериментов на образцах гипса (пористость $\sim 30\%$) продемонстрировано несколько вариантов формирования структуры разрушения в зависимости от ориентации ряда отверстий при фиксированном расстоянии между ними. Наблюдается смена форм разрушения, связанных с активностью элементов структуры меньшего масштаба и реализующихся в областях концентрации растяжения (трещины нормального разрыва) и сжатия (локальные трещиноподобные области компактирования) в окрестности отверстий.

На рис. 3b показана начальная фаза разрушения в окрестности отверстий в гипсе. Можно видеть, что при увеличении угла α происходит переход от развития макроразрывов при слиянии микроразрывов у соседних концентраторов растяжения (отверстий) к комбинированной системе, в которой образуются также области компактирования, а затем к варианту разрушения, в котором система нарушений формируется

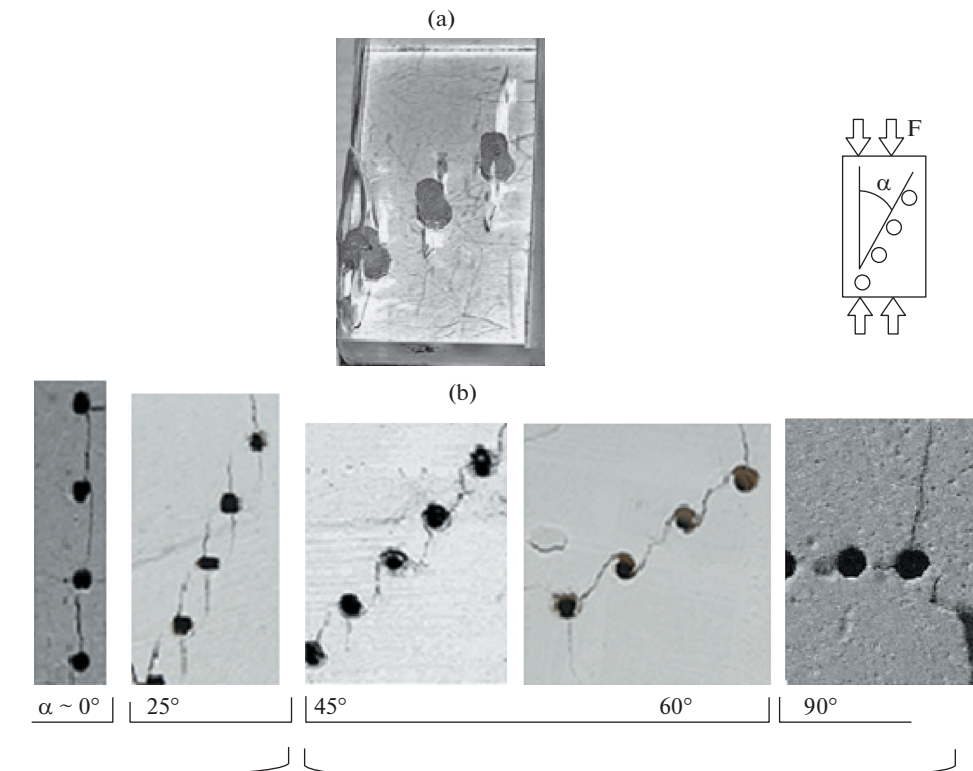


Рис. 3

в основном структурами компактирования. Для сравнения на рис. 3а приведен снимок образца стеклоподобного материала (ПММА) с таким же рядом отверстий (при $\alpha = 45^\circ$). При разрушении таких материалов характерно развитие только трещин нормального разрыва вдоль оси сжатия вплоть до ситуаций потери устойчивости системы образующихся стержней.

Форма разрушения в виде сливающихся продольных разрывов доминирует в ряде отверстий, ось которого близка к оси сжатия. Инициирование трещин происходит в областях растяжения. Затем следует устойчивое подрастание и слияние трещин с образованием магистрального разрыва с ориентацией, близкой к продольной (рис. 3, область (a)). Картина разрушения совпадает со сценарием развитой ранее модели разрывов, ориентированных вдоль главных сжимающих напряжений в окрестности дефектов в однородных средах под действием напряжений, близких к одноосному сжатию [5], когда основная роль принадлежит разрушению при локальном растяжении, вызванном структурными концентраторами напряжений (порами, включениями и др.).

При увеличении наклона цепочки отверстий начинает влиять локализация разрушения и компактирования в областях концентрации сжатия (рис. 3, область (b)). Трещиноподобные зоны уплотнения становятся ведущими структурообразующими дефектами при увеличении угла наклона цепочки отверстий (при углах $\alpha \geq 45^\circ$). Они распространяются между областями концентрации сжатия у соседних отверстий.

Картина инициирования разрушения на линии отверстий при сжатии под углом $\alpha = 55^\circ$ показана на рис. 4, где а – общий вид области разрушения, б – изолинии ми-

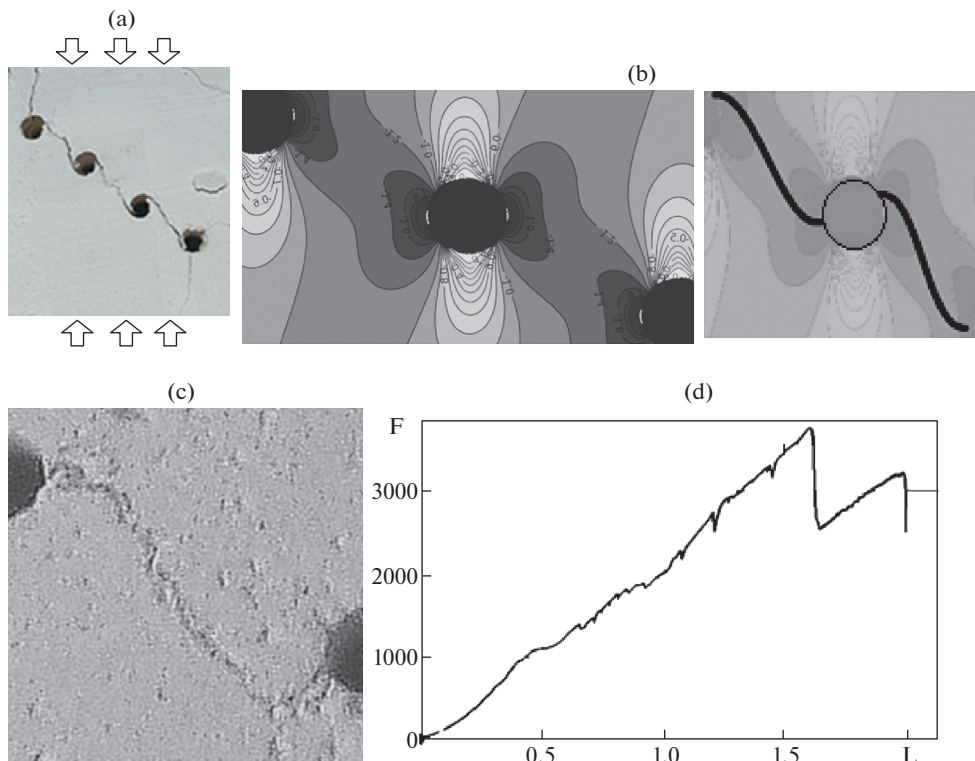


Рис. 4

нимального главного напряжения и схемы соответствия полей напряжения и контуров образующихся поверхностей, с – фрагмент траектории локализованного компактирования между отверстиями, d – диаграмма нагружения (усилие F [Н] в функции перемещения L [мм]). Ступенчатый характер диаграммы на заключительном этапе свидетельствует о наличии неустойчивых фаз развития дефектов и их слияния. На Рис. 4а горизонтальными стрелками показано инициирование элементов следующего масштаба разрушения – после объединения трещин сжатия у нескольких (в данном случае у четырех) соседних отверстий. Частичное проскальзывание по этим трещинам приводит к развитию концентрации растяжения и сжатия в конечных областях образующегося обобщенного элемента, вследствие чего там возникают разрывы. Этот этап разрушения аналогичен развитию трещин оперения в системе “wing crack” [18].

При дальнейшей деформации гипсовых образцов с наклоном цепочки отверстий ($\alpha \geq 45^\circ$) происходит сдвиг и смыкание стенок отверстий при сбросе нагрузки, образующееся “зубчатое зацепление” является препятствием для смещения по линии отверстий (рис. 5). Затем по мере взаимного сдвига блоков вдоль линии отверстий происходит обламывание “зубцов”. Образующиеся остроугольные фрагменты служат материалом для “третьего тела” на поверхности контакта и трения между блоками.

Для промежуточных значений угла наклона наблюдается вариант разрушения при совместном участии двух типов локальных механизмов разрушения. Так, при углах наклона $\alpha = 15^\circ - 45^\circ$ к трещинам нормального разрыва, образующим эшелон, приуроченный к областям концентрации растяжения соседних отверстий, добавляются

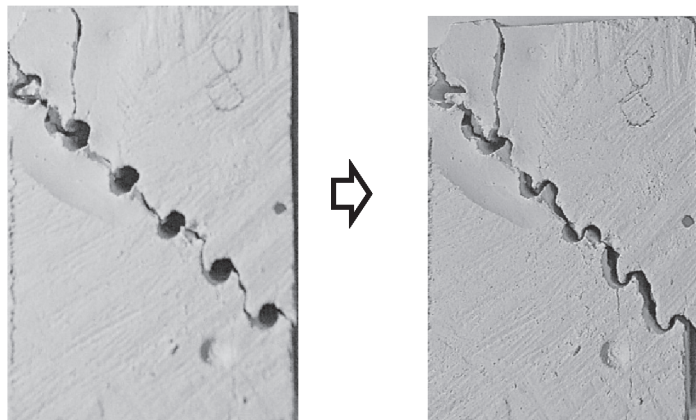


Рис. 5

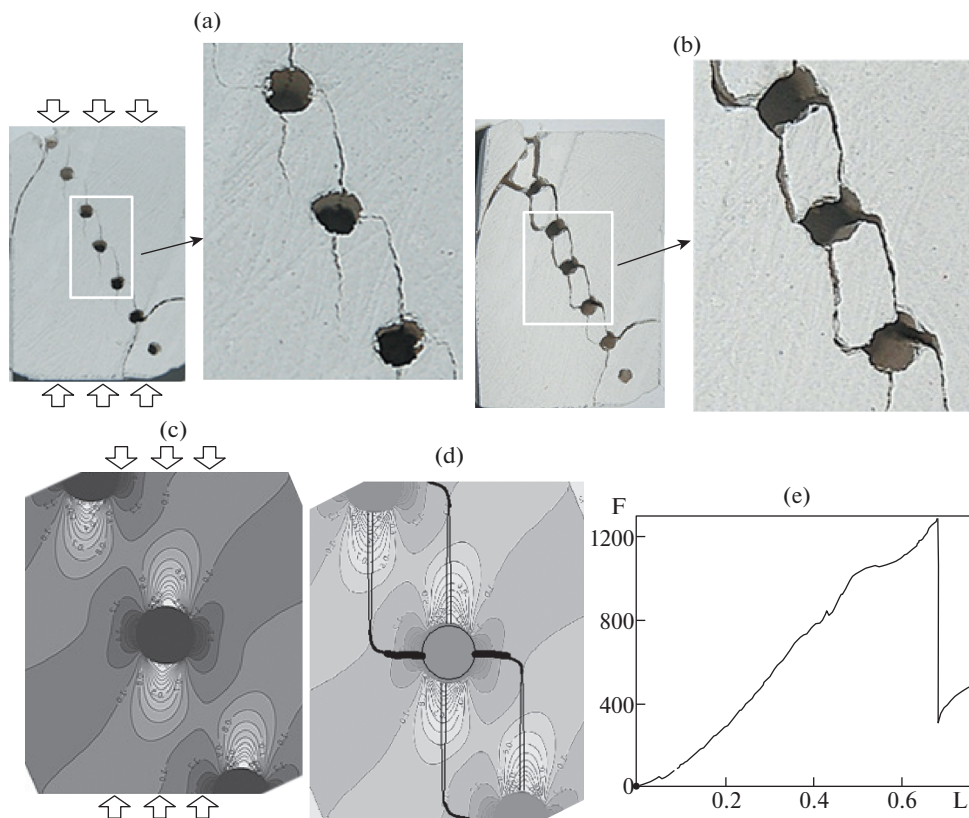


Рис. 6

очаги разрушения (компактирования) в областях концентрации сжатия. Их совместное действие при росте трещин разрывов и соединении их с очагами компактирования у соседних отверстий приводит к обособлению фрагментов, ограниченных этими нарушениями, (см. рис. 6 ($\alpha = 25^\circ$)).

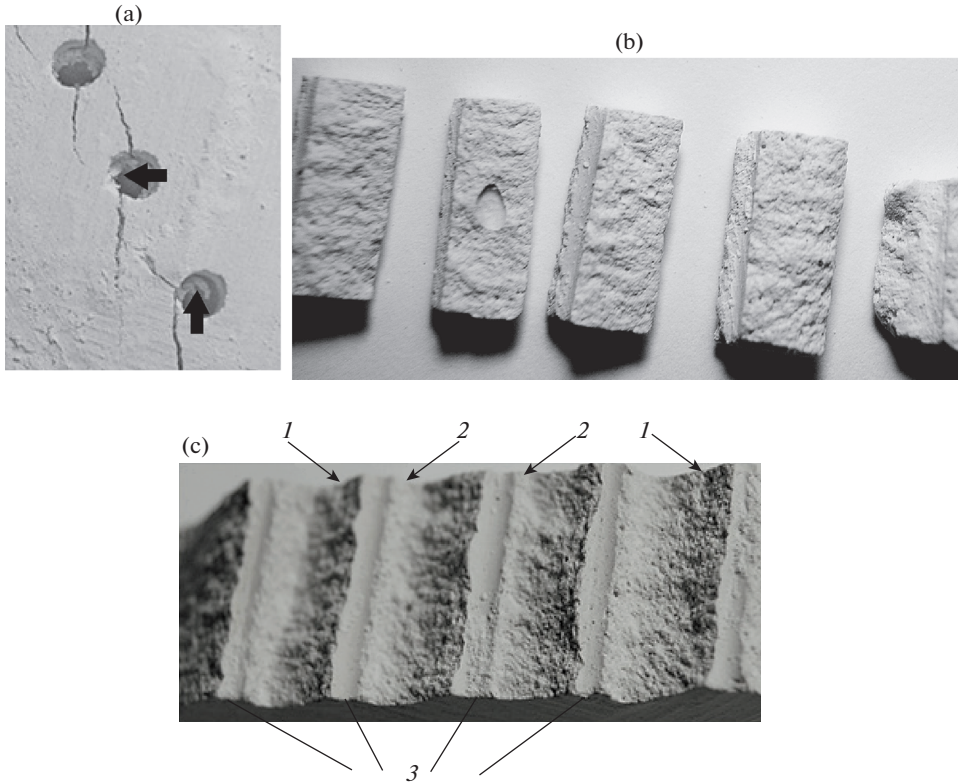


Рис. 7

Инициирование разрушения на линии отверстий при сжатии под углом $\alpha - 25^\circ$ показано на рис. 6, где a, b – начальная и конечная стадии образования системы отдельностей по линии отверстий, e – диаграмма нагружения (обозначения как на рис. 4d). Приведенная на рис. 6c, d схема изолиний главных напряжений σ_{\min} и контур образующихся отдельностей в таком образце показывают связь очагов разрушения с концентрацией напряжений растяжения и сжатия в окрестностях соседних отверстий. Система малых фрагментов, образующаяся по такому сценарию на линии отверстий, при продолжении деформирования образца формирует “третье тело” – структуру разрушения, активность которой (в данном случае способность к перекатыванию фрагментов) характерна для дальнейшего взаимодействия между оставшимися ненарушенными блоками образца – сдвига по этой линии (рис. 6b). Представляется, что такой сценарий описывает один из механизмов инициирования подвижной структуры в области трения в пористой среде.

Важные детали процесса показаны на рис. 7. На образце с развитыми формами разрушения растяжения и компактирования в глубине отверстий видны выдавленные из области компактирования фрагменты (рис. 7a). Справа на рис. 7b показаны отдельные, сформированные при слиянии разрывов и зон компактирования (рис. 6b), а на рис. 7c вид поверхности разрушения после их удаления. Выделены поверхности трещин-разрывов – 1, граничные поверхности областей уплотнения при сжатии – 2, и контуры отверстий – 3.

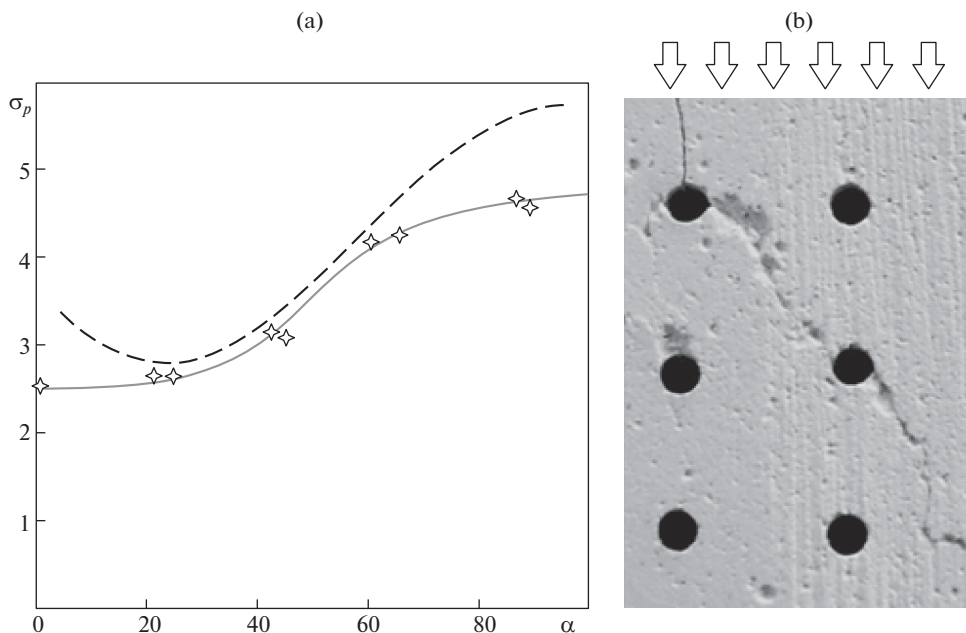


Рис. 8

Изменение эффективной прочности образцов при вариациях ориентации системы отверстий показано на рис. 8а. Значение напряжения, относящееся к $\alpha \sim 0^\circ$ соответствует моменту слияния отверстий вдоль оси сжатия. Образец при этом сохраняет несущую способность, разделяясь на две колонны. Отметим также, что при $\alpha \sim 90^\circ$ происходит прорастание областей уплотнения между отверстиями (рис. 3 справа). Вблизи боковой поверхности образца из-за влияния свободной границы может развиваться параллельный оси сжатия разрыв. В целом из-за нарушения сплошности промежутков между отверстиями система становится чувствительной к поперечным нагрузкам и сдвигу по ослабленной поверхности раздела, сохраняя несущую способность по отношению к продольному сжатию. Таким образом, в блоке с одним рядом отверстий в пористом теле при внешнем одноосном сжатии сценарий разрушения включает в себя развитие промежуточных структур нарушений, объединяющих цепочку отверстий.

Удельные нагрузки при развитии нарушений в образцах с одним рядом отверстий отражены на рис. 8а (напряжение σ_p [МПа] при ориентации ряда отверстий α [°]). Исчерпание несущей способности образцов на заключительной стадии деформирования зависит от возможности реализации поперечных смещений фрагментов образца. Для условий одноосного сжатия испытанных образцов этот уровень показан пунктирной линией. Наименьшая результирующая прочность блока по отношению к сжатию связана с формированием наклонной поверхности разрушения с элементами качения, возникающими, как показано выше, в процессе совместной реализации двух механизмов локального разрушения пористого тела – разрывов и компактирования при углах наклона $\alpha = 15^\circ - 45^\circ$. Это подтверждается экспериментами с двоякопериодической системой отверстий в таком же пористом модельном материале при одноосном сжатии (рис. 8б) – магистральное нарушение, инициированное компактированием, выбирает траекторию распространения между отверстиями под углом $\sim 45^\circ$ к оси сжатия.

4. Заключение. Представлена и экспериментально проверена модель сценария разрушения при сжатии двухмасштабного пористого тела, в котором более крупный масштаб задан линейной системой отверстий. Показаны диапазоны ориентации системы отверстий, в которых ведущую роль играют различные механизмы разрушения – нормальный разрыв и локализованное уплотнение (трещина сжатия) и их совместное действие в сценарии разрушения. Продемонстрирован механизм образования регулярной системы отдельностей – структуры третьего тела в области сдвига и трения вдоль цепочки отверстий. Аналогичный подход может быть применен при анализе ситуаций, в которых роль структуры более крупного масштаба играет регулярная система плоскостей скольжения в пористой матрице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Модель хрупкого разрушения пористых материалов при сжатии // Математическое моделирование систем и процессов. 2009. № 17. С. 47–57.
2. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Некоторые модели и эффекты разрушения в условиях сжатия. В сб. Актуальные проблемы механики. 50 лет Институту проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. М.: Наука. 2015. С. 338–356.
3. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Структуры разрушения в условиях интенсивного сжатия. В сб: Проблемы механики деформированного твердого тела и горных пород. М.: Физматлит. 2006. С. 152–166.
4. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Влияние вида элементов структуры материала на сценарий разрушения при сложном напряженном состоянии // Известия РАН. МТТ. 2015. № 2. С. 44–59.
5. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Структуры в процессах разрушения // Изв. РАН. МТТ. 1999. № 5. С. 49–71.
6. Haimson B., Klaetsch A. Compaction bands and the formation of slot-shaped breakouts in St. Peter sandstone, January 2007, Geological Society London Special Publications 284(1). P. 89–105.
7. Haimson B., Lee H. Borehole breakouts and compaction bands in two high-porosity sandstones // Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 2004. V. 41. P. 287–301.
8. Wu H., Guo I N., Zhao J. Multiscale modeling and analysis of compaction bands in highporosity sandstones // Acta Geotechnica, 2018. V. 13. P. 575–599.
9. Fortn J., Stanchits S., Dresen G., Gueguen Y. Acoustic emission and velocities associated with the formation of compaction bands in sandstone // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № 10. B10203. 16p.
10. Mollema P.N., Antonellini M.A. Compaction bands: A structural analog for anti-mode I cracks in Eolian sandstone // Tectonophysics, 1996. V. 267. P. 209–228.
11. Tembe S., Vaidova V., Wong T.-F., Zhu W. Initiation and propagation of strain localization in circumferentially notched samples of two porous sandstone // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № 2. B02409. 20p.
12. Lockner D.A. et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite // Nature, 1991. V. 350. № 6313. P. 39–42.
13. Rudnicki J.W., Sternlof K.R. Energy release model of compaction band propagation // Geophys Res Lett . 2005. V. 32: L16303. 4 p.
14. Rudnicki J.W. Models for compaction band propagation. In: David C., Le Ravalec-Dupin M. (eds) Rock physics and geomechanics in the study of reservoirs and repositories // Geol Soc London Spec Publ. 2007. V. 284. P. 107–125.
15. Shahin G., Marinelli F., Buscarnera G. Viscoplastic Interpretation of Localized Compaction Creep in Porous Rock // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019. V. 124. № 10. P. 9977–10648.
16. Haimson B.C. Borehole breakouts in Berea sandstone reveal a new fracture. Pure and Applied Geophysics. 2003. V. 160. P. 813–831.
17. Mokryakov V.V. Numerical simulation of functionally graded plane elastic medium by finite super-element method // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 1922. P. 030004. 1–10.
18. Germanovich L.N., Salganik R.L., Dyskin A.V., Lee K.K. Mechanisms of brittle fracture of rock with multiple pre-existing cracks in compression // Pure and Applied Geophysics, 1994. V. 143. № 13. P. 117–149.