

УДК 622.02

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРУШЕНИЯ
ПРИ СДВИГОВОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ МЯГКИХ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД**

Хонбао Чжао, Хуху Ван, Шаоцян Лю, Хой Чен, Чаонань Чен

*Китайский горно-технологический университет,
E-mail: huhuwan.cn@gmail.com, г. Пекин, 100083, Китай*

Установление механизма разрушения при сдвиговой ползучести мягких трещиноватых пород является крайне актуальным вопросом в горнотехнической инженерной практике. С помощью метода дискретных элементов построена численная модель мягких трещиноватых пород, которая имитирует сдвиговую ползучесть массива при различных значениях коэффициента шероховатости трещины (JRC), нормального напряжения и направления сдвига. Выполнен анализ влияния этих факторов на деформацию ползучести мягких пород. Результаты показали, что деформация ползучести значительно снижается при увеличении шероховатости трещины, а также при увеличении нормального напряжения. Влияние направления сдвига на деформацию ползучести относительно небольшое.

Мягкая горная порода, трещины, сдвиговая ползучесть, метод дискретных элементов

DOI: 10.15372/FTPRPI20240506
EDN: SCFFAE

В горнотехнической практике вопрос структурной устойчивости сложных геологических формаций, характеризующихся трещиноватостью и содержанием мягких пород, имеет чрезвычайную важность. Трещины не только снижают прочность и жесткость мягкой породы, но и изменяют поле напряжений и деформаций, что приводит к образованию и развитию микротрещин [1–2]. Под нагрузкой мягкие трещиноватые породы демонстрируют нелинейные, неупругие и необратимые механические свойства, что усложняет характер ползучести по сравнению с другими породами [3].

Теория ползучести горных пород преимущественно базируется на эмпирических и упруго-пластических моделях. В основе эмпирических моделей лежит аппроксимация экспериментальных данных, позволяющая получить логарифмические, экспоненциальные и показательные функциональные зависимости между напряжением, деформацией и временем [4]. В [5] рассмотрен характер проявления ползучести различных пород в условиях одноосного сжатия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда поддержки выдающихся исследователей им. Суня Юэаки (800015Z1179), Фонда экологической целесообразности пров. Хэбэй (E2020402036), Фонда фундаментальных исследований центральных университетов (2009QZ03) и Открытого фонда государственной лаборатории механики и безопасности транспортных инженерных объектов (KF2020-06).

В [6] проведены реологические испытания высокого основания плотины, в [7] — вязкоупругие испытания мягких пород. На основании результатов реологических испытаний выполнен анализ направления упругого вязкопластического потока [8].

Механические свойства мягких трещиноватых пород зависят от прочности и деформируемости внутренних трещин, которые влияют на устойчивость объектов недропользования. В [9] осуществлены прямые испытания различных материалов на сдвиг и установлено, что характеристики заполнителей трещин значительно влияют на их механические свойства. В [10] разработана экспериментальная модель определения прочности трещины на сдвиг, а в [11] рассмотрено влияние на нее различных заполнителей.

В [12] выполнена адаптация системы полигональных элементов для представления трещиноватой структуры горной породы и реализован метод двумерного блокового моделирования. Метод дискретных элементов получил широкое распространение в исследованиях в сфере механики горных пород. В [13] предложена модель ползучести, описывающая характеристики деформации трещин при циклических динамических нарушениях. В [14] разработана модель сдвиговой ползучести на основе классической модели Нишихары, в [15, 16] — аналитическая модель определения прочности трещин на сдвиг.

Несмотря на большой объем исследований механизма сдвигового разрушения трещиноватых пород, количество работ, рассматривающих мягкие породы, относительно мало. В настоящей работе на примере филлита с помощью программного обеспечения PFC2D методом дискретных элементов построена модель мягкой породы с различной шероховатостью трещин. Для более глубокого понимания характеристик сдвиговой ползучести мягких трещиноватых пород проведены соответствующие испытания.

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СДВИГОВОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Подготовка образцов. Для моделирования реальных горнотехнических условий использовано ПО PFD2D, реализующее метод дискретных элементов. В данном ПО построена численная модель, согласующаяся с условиями проведения лабораторных испытаний (рис. 1).

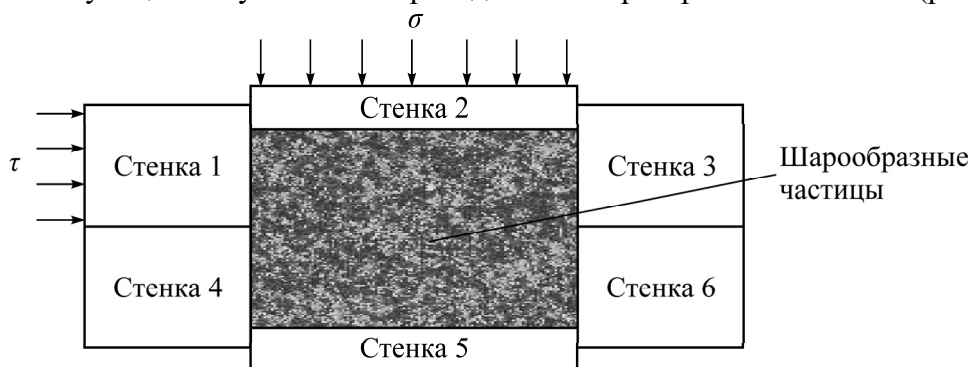


Рис. 1. Модель прямой сдвиговой ползучести: контейнер с жесткими стенками 1–6; σ , τ — вертикальные и горизонтальные напряжения

Для анализа выбраны методы прямого сдвига. Первым шагом построения модели стало создание гексагонального контейнера с жесткими стенками, который заполнялся шарообразными частицами на площади 100×50 мм. Для обеспечения устойчивости модели ее основание ограничено тремя зафиксированными стенками (стенки 4, 5, 6), которые предотвращали любое смещение в процессе приложения нагрузки. Вертикальное напряжение σ приложено к верхней стенке контейнера (стенка 2) и моделирует вертикальную нагрузку. Горизонтальное напряже-

ние τ приложено к левой стенке (стенка 3) с направлением приложения направо. Установка для испытания прямого сдвига выполнена в лабораторных условиях путем точного мониторинга значений и направления напряжений.

Для моделирования структурных характеристик мягкой породы ее пористость установлена на значении 5 % (рис. 2а). Для моделирования контакта между частицами использовано сочетание модели параллельной связи и модели Бюргерса (рис. 2б–г) [17–19].

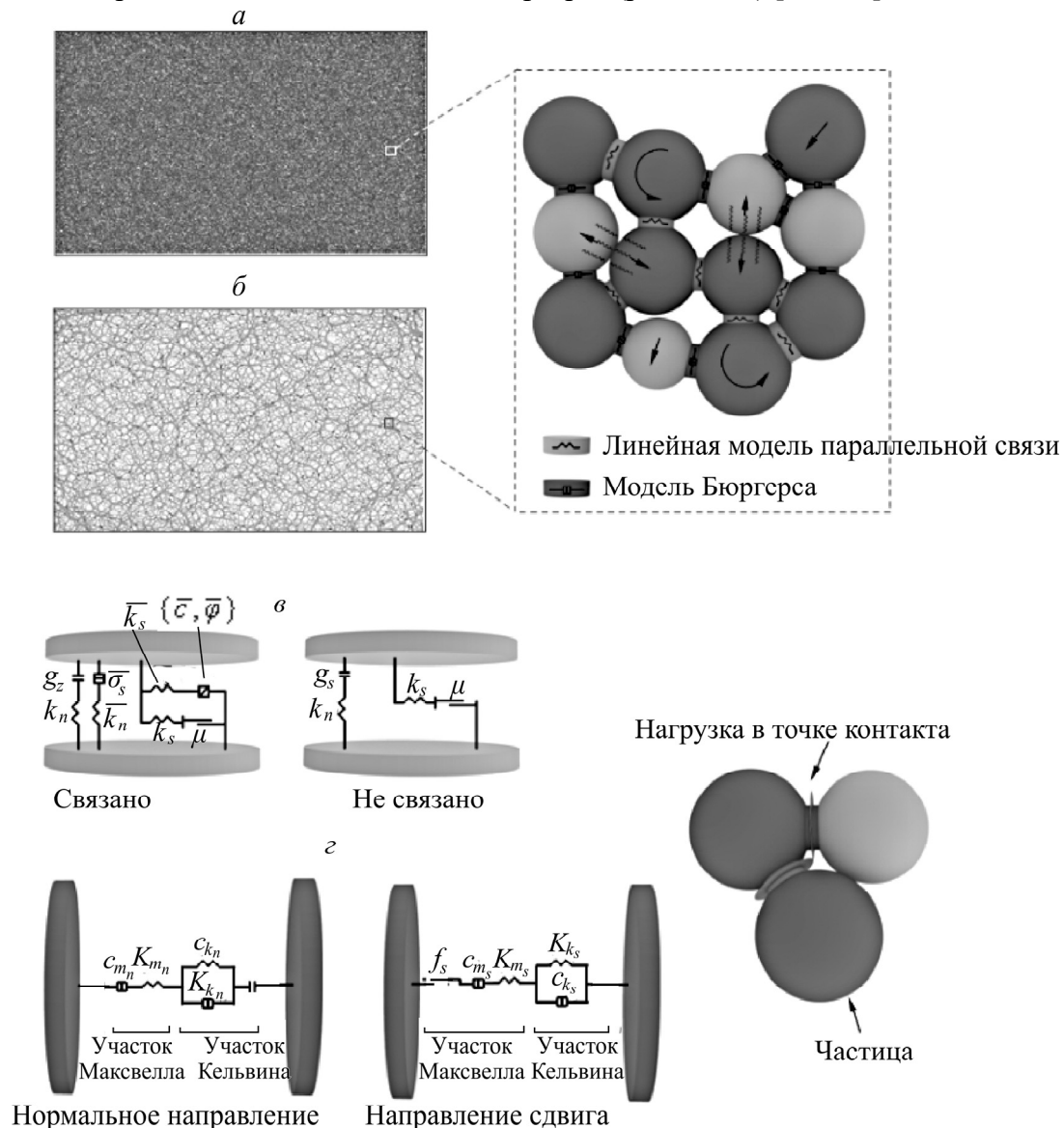


Рис. 2. Схема соприкосновения частиц между собой: а — образец породы; б — силовая цепь соприкосновения частиц; в — линейная модель параллельной связи; г — модель Бюргерса

Калибровка параметров на микроскопическом уровне. Калибровка параметров на микроскопическом уровне в ПО PFC2D необходима для решения задач настоящего исследования. Собственные инструменты калибровки в ПО PFC2D не подходят для модели с множественными контактами. Для решения проблемы выполнена адаптация метода проб и ошибок [20] с помощью

сравнения следующих методов: метода унификации [21], многоцелевого генетического алгоритма [22] и метода XGBoost [23]. Эти методы позволили скорректировать параметры на микроскопическом уровне для соответствия их с параметрами породы на макромеханическом уровне.

Для моделирования макромеханических свойств филлита (рис. 3а [24]) важно правильно установить отношение подобия между макромеханическими свойствами образцов и породного массива. Данный вопрос детально изучен в [25–27]. В настоящей работе определены локальные параметры породного массива и коэффициент подобия в процессе численного моделирования на основе критерия разрушения Хука – Брауна, а также системы классификации пород по индексу геологической прочности GSI [28]:

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}, \quad (1)$$

$$c = \frac{\sigma_c[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}]}{(2+a) \frac{\sqrt{1+[6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}]}{1+2a}}, \quad (2)$$

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60+15D-GSI}{11}}} \right), \quad (3)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (4)$$

$$\sigma_c = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b}, \quad (5)$$

где E_{rm} — модуль упругости испытуемого образца породы; E_i — модуль упругости породного массива на макроуровне; σ_c — прочность образца на одноосное сжатие; σ_{ci} — прочность породного массива на одноосное сжатие на макроуровне; D — коэффициент нарушения; s — когезионная прочность массива; φ — угол внутреннего трения массива; σ_1' — первое девиаторное главное напряжение; e — отношение пористости образца; σ_{3n}' — третье нормальное девиаторное главное напряжение.

Эмпирические параметры m_b и a определяются типом породы и являются безразмерными. Коэффициент s отражает степень фрагментации породного массива и изменяется в диапазоне от 0 до 1. Параметры m_b , a и s определены по методу Хука [28] на основе индекса геологической прочности GSI:

$$\begin{cases} m_b = \exp \frac{GSI-100}{28-14D}; \\ s = \exp \frac{GSI-100}{9-3D}; \\ a = 0.5 + \frac{1}{6} \left[\exp \frac{-GSI}{15} - \exp \frac{-20}{3} \right]. \end{cases} \quad (6)$$

В окружающих тоннели зонах со сложными геологическими условиями мягкие горные породы имеют индекс геологической прочности GSI 20 и коэффициент нарушения 0.2.

Указанные параметры и результаты лабораторных испытаний [24] преобразованы в актуальные параметры локального массива по (1)–(6). Моделирование образца мягкой породы выполнено при отношении подобия 1 : 50, которое является общепринятым значением и позволяет соотносить результаты с другими работами. Параметры массива и образцов представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры породы до и после преобразования

Образец	Порода				Трещина	
	γ , кН/м ³	E , МПа	c , кПа	ϕ , град	c , кПа	ϕ , град
До преобразования	19.68	1593	910	25	100	20
После преобразования	19.68	31.9	18.2	25	2	20

На основе отношения подобия выполнена калибровка параметров образца на микроскопическом уровне методом проб и ошибок (рис. 3, сплошная линия). Путем сравнения этой кривой с кривой “напряжение – деформация” (штриховая линия) и с результатами лабораторных испытаний схожих материалов сделан вывод, что результаты моделирования согласуются с лабораторными результатами, что подтверждает надежность численных экспериментов [24].

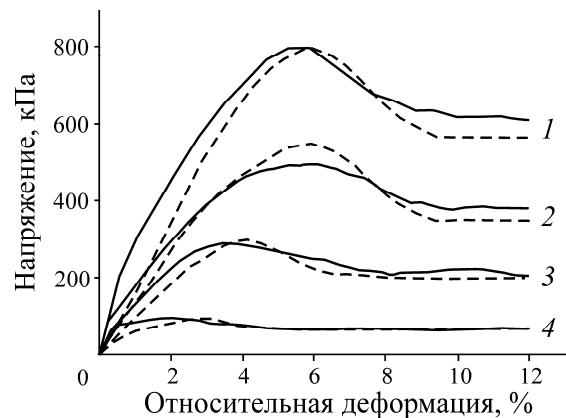


Рис. 3. Калибровка численной модели. Боковое давление, кПа: 1 — 300; 2 — 200; 3 — 100; 4 — 0

Схема испытания сдвиговой ползучести. Для более детального изучения свойств сдвиговой ползучести мягкой трещиноватой породы создан ряд тестовых схем, учитывающих ключевые факторы влияния: коэффициент шероховатости трещины JRC, нормальное напряжение σ , направление сдвига (сдвиг вправо определен как положительное направление). Коэффициент шероховатости определялся по прямой трещине и кривой Бартона [29] для пяти характерных значений, представленных на рис. 4. Для моделирования эффекта ослабления трещины точки соприкосновения частиц на обеих сторонах трещины выбраны с наименьшими параметрами параллельной связи.

С помощью сервоуправления стенкам контейнера обеспечена требуемая нагрузка в вертикальном и горизонтальном направлении с учетом параметров табл. 2. Сначала образец подвергается постоянному нормальному напряжению σ , при этом нижняя торцевая стенка контейнера зафиксирована (рис. 1). Затем к верхней стенке 1 прикладывается горизонтальное постоянное напряжение, обеспечивающее синхронное движение стенок 2, 3, 1 и моделирующее условия сдвиговой ползучести.

Для исключения экспериментальных ошибок, возникающих из-за неравномерности образца, использована унифицированная численная геометрическая модель и механические параметры на микроскопическом уровне, моделирующие различные условия двухосного нагружения.

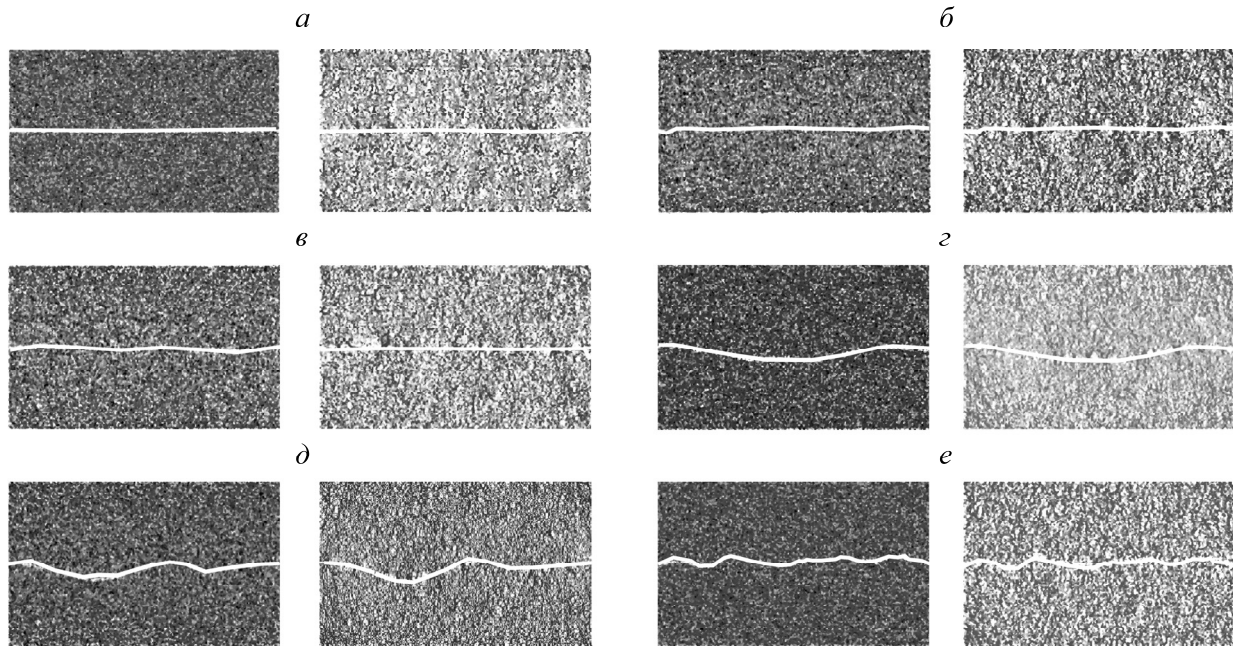


Рис. 4. Шероховатость трещины и силовые цепи соприкосновения частиц при JRC: 0 (а); 2–4 (б); 6–8 (в); 10–12 (г); 14–16 (д); 18–20 (е)

ТАБЛИЦА 2. Параметры проведения экспериментальных исследований

Параметр	JRC	σ , кПа	Направление
Шероховатость трещины	0–20	5	Прямое
Нормальное напряжение	10–12	5–20	Прямое
Горизонтальное напряжение	10–12	5	Прямое / обратное

Для более глубокого анализа механических свойств образца на микроскопическом уровне до численных испытаний активировалась функция `fracture.p2fis` для отслеживания образования и расширения микротрещин. Данная функция представлена в ПО PFC2D и является основным инструментом мониторинга и регистрации разрушения связей между частицами в модели. При разрушении связи данная функция регистрирует это событие и добавляет соответствующую информацию о трещине в дискретную сеть трещин (DFN). Кроме того, эта функция выявляет фрагменты внутри образца, которые потеряли связь с другими частями из-за разрушения связей.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе использовался пошаговый подход к нагружению образца. Для уточнения уровней пошагового нагружения выполнены испытания образцов мягкой породы с различной шероховатостью трещин на прямой сдвиг при различных значениях нормального напряжения. Посредством анализа соотношения напряжения сдвига и деформации определена прочность на сдвиг (рис. 5). Выбраны следующие уровни пошагового нагружения: 60, 70, 80 и 90 % от прочности на сдвиг. Каждое нагружение состояло из 300 тыс. шагов.

На рис. 5 показаны зависимости напряжений сдвига от деформации для образцов мягких пород. Видно заметное снижение напряжения после достижения пикового значения сдвига. Далее напряжение стабилизируется на относительно высоком уровне остаточной прочности.

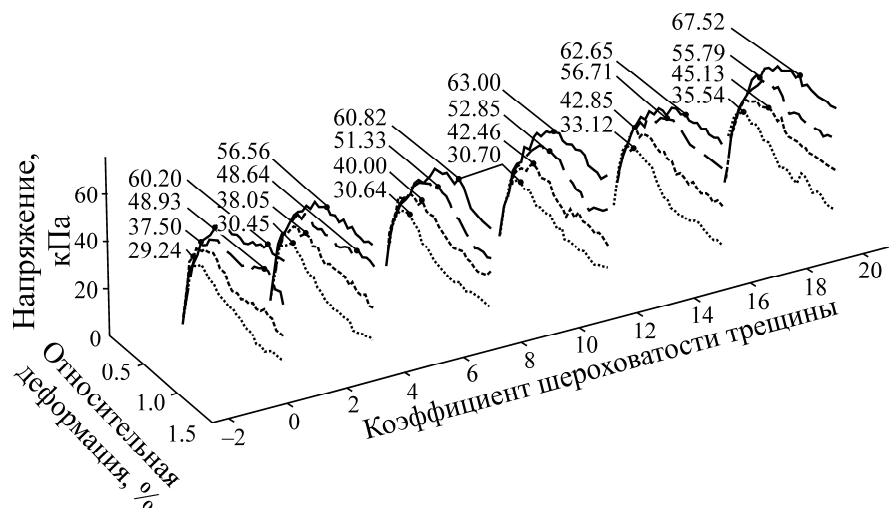


Рис. 5. Кривые “напряжение сдвига– деформация” образцов с различной шероховатостью трещины

По причине мелкозернистой слоистой структуры и наличия козегонных минералов (серицит и хлорит) в филлите, для численного моделирования характеристик связывания частиц между собой использована комбинированная модель, сочетающая модель параллельной связи и модель Бюргерса. Благодаря изменению параметров когезии C_{ks} и C_{ms} из модели Бюргерса образец показал высокую когезию и высокую остаточную прочность после разрушения сдвига. Остаточная прочность повышается при увеличении нормального напряжения.

Характеристики сдвиговой ползучести при различной шероховатости трещин. Использовались шесть кривых Бартона для моделирования различной шероховатости трещин в образцах для испытания прямой сдвиговой ползучести при нормальном напряжении 5 кПа. Деформации образцов с различным уровнем шероховатости трещин при шаговом нагружении показаны на рис. 6.

Рассмотрим в качестве примера образец с коэффициентом шероховатости трещин 18–20. После нагружения до 60 % от предельной прочности на сдвиг образец быстро деформируется за 30 тыс. шагов; деформация достигает 0.32 мм. Затем скорость деформирования заметно снижается, т. е. наблюдается переход в фазу ползучести. Этот цикл повторяется каждые 300 тыс. шагов при увеличении напряжения сдвига от 10 до 90 %. Кривые деформации для различных уровней шероховатости трещины имеют аналогичный тренд развития, однако магнитуды деформации значительно различаются. Чем больше шероховатость, тем меньше деформация ползучести.

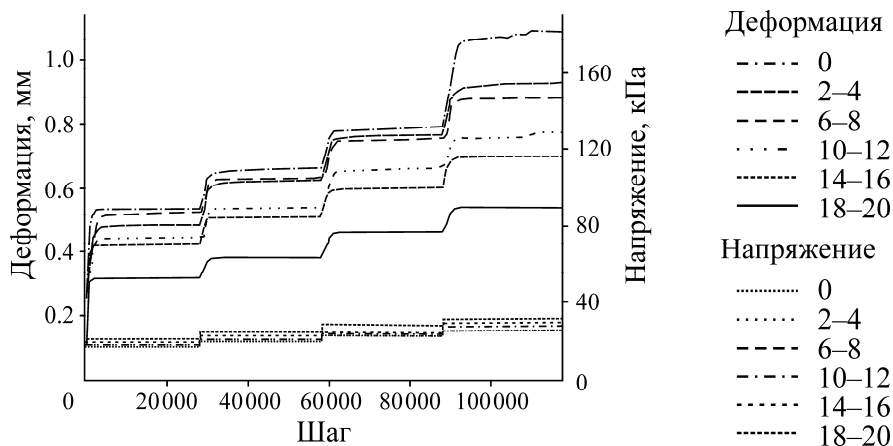


Рис. 6. Изменение деформации и напряжений сдвига образцов с различной шероховатостью трещины при пошаговом нагружении

На рис. 7 представлены деформация и развитие трещины в образцах с различной шероховатостью в процессе испытаний на прямую сдвиговую ползучесть. Характер разрушения в значительной мере связан с шероховатостью трещины. При приложении напряжения сдвига образец разрушается вдоль трещин. Из-за механических свойств более низких иерархических уровней в образце развиваются микротрещины. Также наблюдается отрицательная корреляция между деформацией ползучести и шероховатостью трещины, т. е. при увеличении шероховатости деформация сдвиговой ползучести уменьшается.

Для выявления механизма деформации ползучести при пошаговом нагружении выполнен микроскопический анализ образцов различных уровней напряжения с помощью данных о смещении, диаграмм развития трещин и диаграмм силовых цепей. Поскольку процесс деформации каждого образца примерно аналогичен, рассмотрен процесс деформации образца с шероховатостью 10–12 при различных уровнях напряжения (рис. 8).

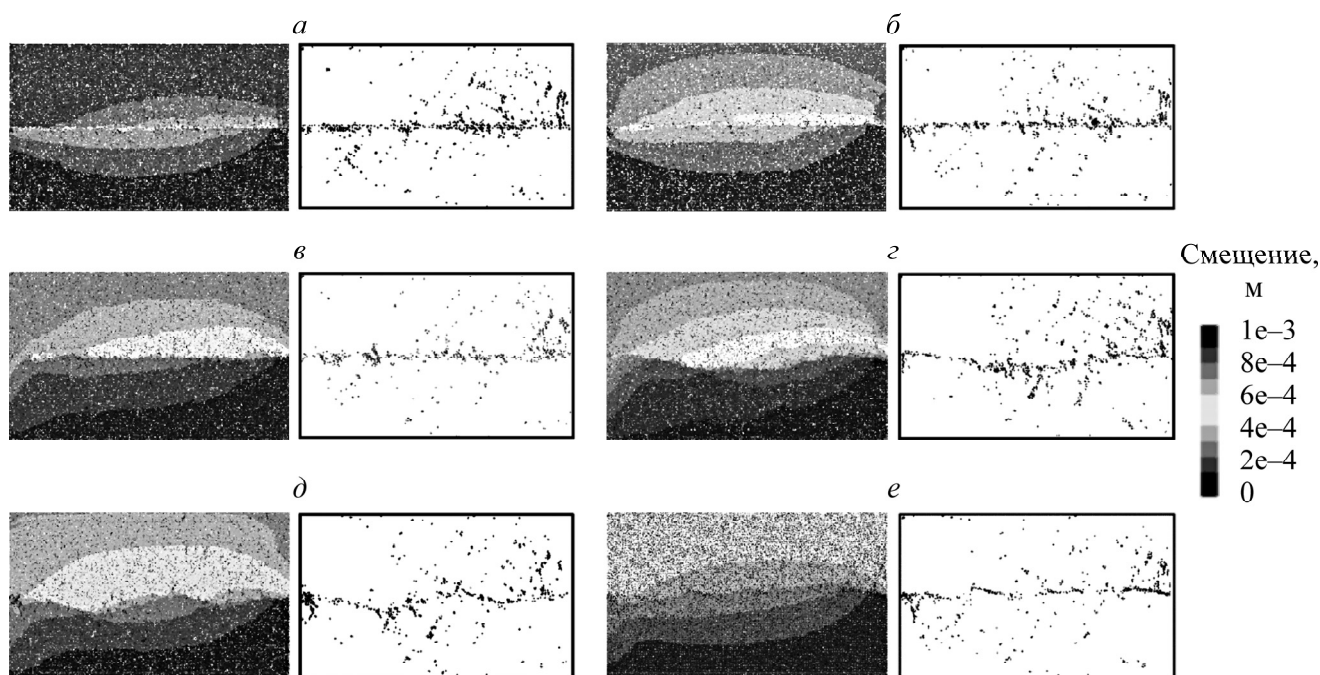


Рис. 7. Деформации сдвига и картины развития микротрещин в образцах с различной шероховатостью основной трещины: *a* — JRC=0; *б* — JRC=2–4; *в* — JRC=6–8; *г* — JRC=10–12; *д* — JRC=14–16; *е* — JRC=18–20

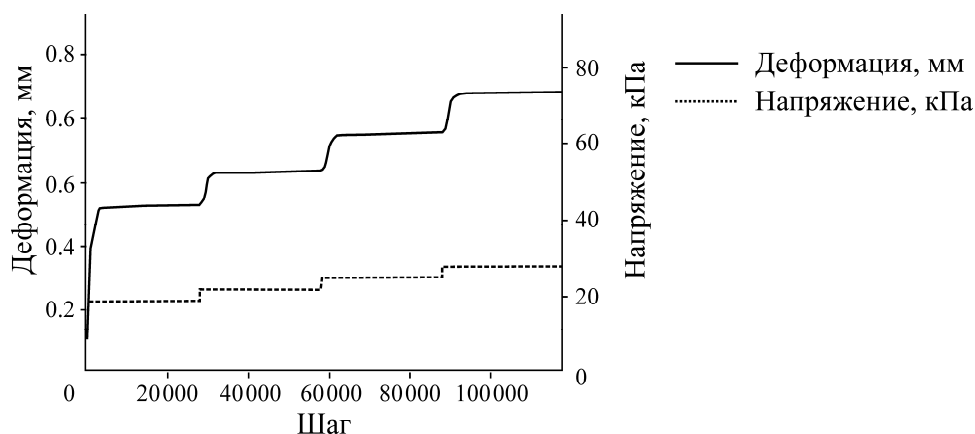


Рис. 8. Изменение напряжений и деформаций при пошаговом нагружении образца с шероховатостью 10–12

На рис. 9 показано распределение силовых цепей и развитие трещины в образце с шероховатостью трещины 10–12 при уровнях напряжения 60 и 90 % от предельного. Видно (рис. 9а), что в результате постоянного воздействия нормального напряжения и напряжения сдвига в образце образуется наклонная волокнообразная структура силовых цепей. Данная структура отчетливо прослеживается в местах концентрации напряжений в окрестностях трещины, особенно на ее продолжении. В окрестностях основной трещины образуются микротрещины. При увеличении уровня напряжения до 90 % от предельного наклон структуры силовых цепей становится более выраженным; повышается концентрация напряжений вблизи основной трещины, что приводит к большему количеству микротрещин, приближая образец к разрушению.

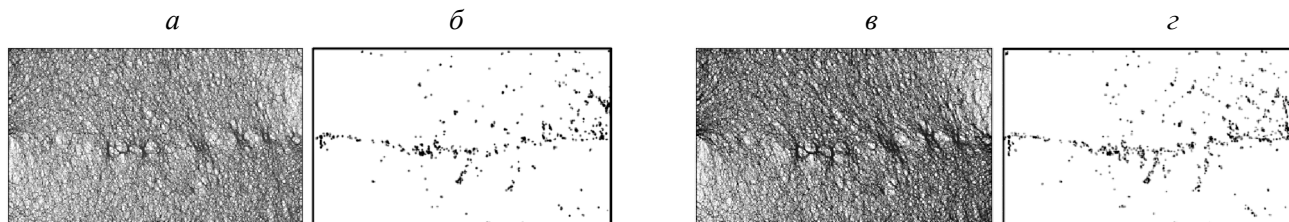


Рис. 9. Развитие трещин и силовых цепей для различных уровней напряжений при пошаговом нагружении: а, б — 60 %; в, г — 90 % от предельного уровня

Характеристики сдвиговой ползучести при различных нормальных напряжениях. Выполнено испытание образцов на прямую сдвиговую ползучесть при шероховатости трещины 10–12 при следующих нормальных напряжениях: 5, 10, 15 и 20 кПа. Результаты испытаний показали, что сдвиговая ползучесть имеет аналогичный характер развития при изменении нормального напряжения (рис. 10). В процессе нагружения образцы проходили через стадии быстрой деформации, устойчивой ползучести, повышения напряжения и последующей стадии ускоренной деформации, которая достигла пика при 90 % от предельного напряжения сдвига. Значения деформаций зависят от нормального напряжения, т. е. чем больше нормальное напряжение, тем меньше деформация.

На рис. 11 представлено развитие трещины при различных значениях нормального напряжения. При нормальном напряжении 5 кПа образец разрушается вдоль основной трещины из-за напряжения сдвига с образованием микротрещин. При увеличении нормального напряжения наблюдается образование трещин в массиве образца ввиду малой прочности мягкой породы. Также наблюдается отрицательная корреляция между деформацией ползучести и нормальным напряжением, т.е. чем больше нормальное напряжение, тем меньше деформация ползучести.

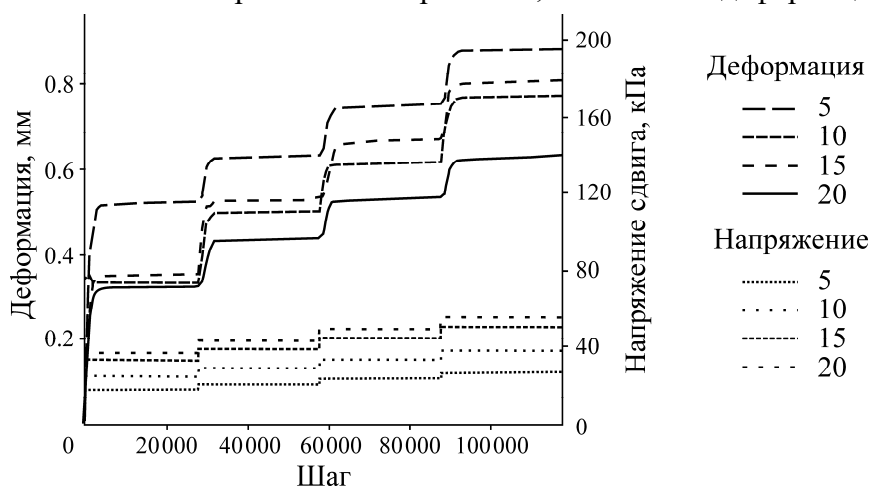


Рис. 10. Кривые деформаций и напряжений сдвига при различных значениях нормального напряжения

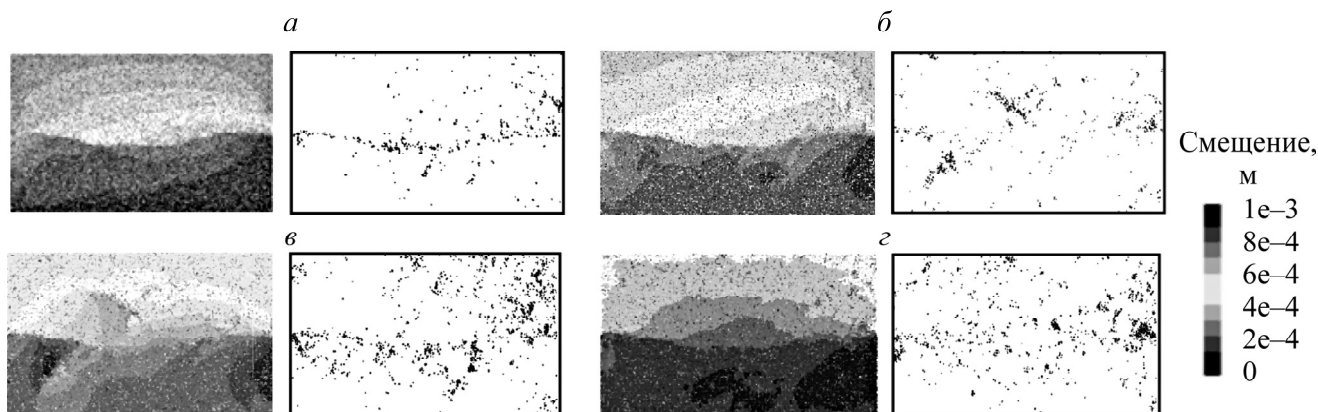


Рис. 11. Диаграммы деформаций сдвига и развития микротрещин при различных значениях нормального напряжения, кПа: а — $\tau = 18.42$; б — $\tau = 21.49$; в — $\tau = 24.56$; г — $\tau = 27.63$

Характеристики сдвиговой ползучести при различных направлениях сдвига. Испытывались образцы с шероховатостью трещины 10–12 при нормальном напряжении 5 кПа в прямом и обратном направлении сдвига. Результаты показали аналогичный характер сдвиговой ползучести в разных направлениях сдвига (рис. 12, 13).

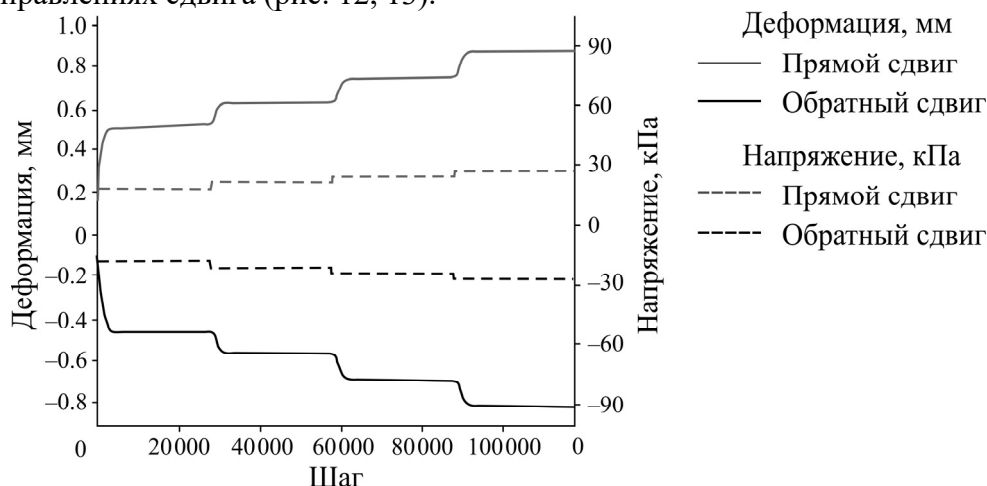


Рис. 12. Кривые деформаций и напряжений при прямом и обратном направлении сдвига

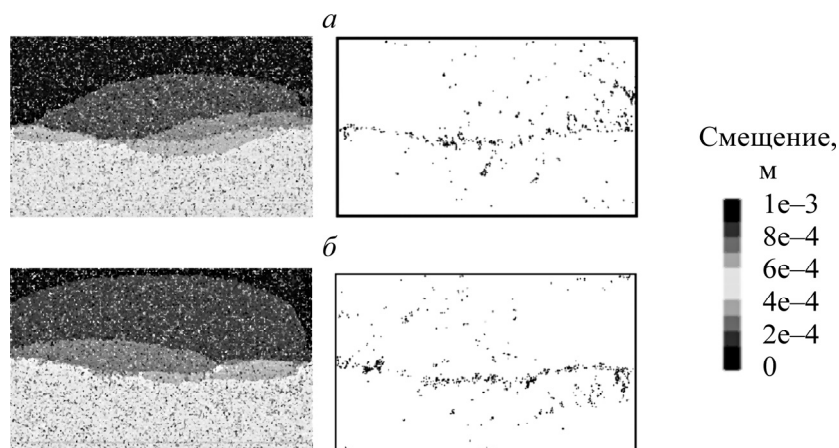


Рис. 13. Диаграммы деформаций и развития трещин в образцах при различных направлениях сдвига: а — прямое направление; б — обратное

Подобно результатам предыдущих испытаний, образцы прошли через стадии быстрой деформации, устойчивой ползучести, повышения напряжения и снова быстрой деформации. Из-за неравномерного строения трещины деформация при обратном сдвиге немного превышает деформацию при прямом.

Диаграммы развития микротрещин в зависимости от направления сдвига (рис. 13) показывают, что характер разрушения образца слабо зависит от направления сдвига. Вне зависимости от направления сдвига в ходе нагружения образуются микротрещины вблизи основной трещины, которые приводят к разрушению образца.

ВЫВОДЫ

По результатам комплексного исследования сдвиговой ползучести мягких трещиноватых пород выполнен детальный анализ корреляций между шероховатостью трещины (JRC), нормальным напряжением, направлением сдвига и морфологическим характером разрушения образца, а также характером развития микротрещин. С помощью ПО PFC2D, реализующего метод дискретных элементов, построены модели породных образцов в различных условиях нагружения, позволяющие смоделировать сдвиговую ползучесть при пошаговом нагружении.

В процессе сдвига образец мягкой породы проходит через следующие стадии: быстрая деформация, устойчивая ползучесть, повышение напряжения и последующая быстрая деформация. Напряжения сдвига концентрируются в окрестностях основной трещины, в результате чего образуются и развиваются микротрещины. При увеличении уровня напряжения в этих областях заметно увеличивается количество трещин, что в конечном итоге приводит к разрушению образца.

Шероховатость трещины и нормальное напряжение оказывают основное влияние на сдвиговую ползучесть образцов мягкой породы. При увеличении шероховатости и нормального напряжения деформация ползучести уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bryan L. M.** Fluid Mechanics, Trittech digital media: 2018-08-24.
2. **Sun Jun.** Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2007, Vol. 26, No. 6. — P. 1081–1106.
3. **Li Ya-li, Yu Huai-chang, Liu Han-dong.** Study of creep constitutive model of silty mudstone under triaxial compression, 2012, Vol. 33, No. 7. — P. 2035–2040.
4. **Kabwe E.** Verification and Implementation of a creep model considering the duvaut-lion overstress function, Mining, Metallurgy and Exploration, 2021, Vol. 38, No. 7. — P. 1761–1771.
5. **Griggs D.** Creep of rocks, J. Geol., 1939, Vol. 47, No. 3. — P. 225–251.
6. **Zhang Z.L., Xu W.Y.; Wang W., et al.** Triaxial creep tests of rock from the compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba Hydropower Station, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2012, No. 50. — P. 133–139.
7. **Yang S. Q. and Cheng L.** Non-stationary and nonlinear visco-elastic shear creep model for shale, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2011, Vol. 48, No. 6. — P. 1011–1020.
8. **Li J., Zhu L., Zhou K., et al.** Non-linear creep damage model of sandstone under freeze-thaw cycle, J. Cent. South Univ., 2021, No. 28. — P. 954–967.
9. **Tulinov R. and Molokov L.** Role of joint filling material in shear strength of rocks, Symp. Int. Soc. of Rock Mechanics, Nancy, 1971.
10. **Indraratna B., Haque A., and Aziz N.** Shear behaviour of idealized infilled joints under constant normal stiffness, Geotechnique, 1999, Vol. 49, No. 3. — P. 331–355.

11. **Papaliangas T., Lumsden A., Hencher S., et al.** Shear strength of modelled filled rock joints, Rock Joints, 1990.
12. **Cundall P. A.** A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky system, Proc. Symp. Int. Soc. for Rock Mechanics, 1971. — P. 129–132.
13. **Yu Y., Yang Y., Liu, J., et al.** Experimental and constitutive model study on the mechanical properties of a joint of a rock mass under dynamic disturbance, Sci. Rep., 2022, No. 12. — P. 21238.
14. **Li G., Wang, Y., Hu, Y., et al.** Shear creep mechanical properties and damage model of mudstone in open-pit coal mine, Sci. Rep., 2022, No. 12. — P. 5148.
15. **Son M.** Shear strength of rock joints and its estimation, KSCE J. Civ. Eng., 2020, 24. — P. 2931–2938.
16. **Barton N.** Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions, J. Rock Mech. and Geotechnical Eng., 2013, Vol. 5, No. 4. — P. 249–261.
17. **Chang X. and Burger M.** Burger's bonded model for distinct element simulation of the multi-factor full creep process of soft rock, J. Mar. Sci. Eng., 2020, No. 8. — P. 1–18.
18. **Cho N., Martin C. D., and Segol D. C.** A clumped particle model for rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2007, No. 44. — P. 997–1010.
19. **Itasca.** Users' manual for particle flow code in 2 dimensions PFC2D, Version 6.0; Itasca Consulting Group, Inc.: Minneapolis, MN, USA, 2018.
20. **Xu Z., Wang Z., Wang W., Lin P. and Wu J.** An integrated parameter calibration method and sensitivity analysis of micro-parameters on mechanical behavior of transversely isotropic rocks, Comput. Geotech., 2022, 142. — P. 104573.
21. **Li Z. and Rao Q.** Quantitative determination of PFC3D microscopic parameters, J. Cent. South Univ., 2021, 28. — P. 911–925.
22. **Do H. Q., Aragón A. M. and Schott D. L.** A calibration framework for discrete element model parameters using genetic algorithms, Adv. Powder Technol., 2018, No. 29. — P. 1393–1403.
23. **Zhou Z., Bai, S., Chu K., et al.** Calibration of DEM macro and micro parameters via XGBoost method, Granular Matter, 2022, 106. — P. 24.
24. **Pan Wen-tao, Yang Wen-bo, Wu Fang-yin, He Chuan, Zhao Liang-liang, Yao Ren-jie, and Fu Jian-feng.** Layered soft rock simulation based on uniaxial and triaxial tests and direct shear test, Rock and Soil Mech., 2022, 43(12). — P. 3437–3452.
25. **Li Tong-lu, Luo Shi-yi, He Jian, et al.** Determination and application of mechanical parameters for jointed rock masses, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2004, 23(13). — P. 2182–2186.
26. **Zhao Wei, Wu Shun-chuan, Gao Yong-tao, et al.** Numerical modeling and mechanical parameters determination of jointed rock mass, Chinese J. Eng., 2015, 37(12). — P. 1542–1549.
27. **Chai Bo, Tao Yang-Yang, Du Juan, et al.** Energetics parameters estimation of joint rock mass based on Hoek-Brown failure criterion, Bull. Geological Sci. Technol., 2020, 39(1). — P. 78–85.
28. **Hoek E., Carranza-Torres C., and Corkum B.** Hoek Brown failure criterion, Proc. North Am. Rock Mechanics Soc. NARMS-TAC, Toronto; University of Toronto Press, 2002. — P. 267–273.
29. **Barton N.** Review of a new shear strength criterion for rockjoints, Eng. Geology, 1973, Vol. 7. — P. 579–602.

Поступила в редакцию 20/X 2023

После доработки 23/V 2024

Принята к публикации 24/IX 2024