

УДК 539.422.23; 531.355

С.В. Астафуров^{1,2}, Е.В. Шилько^{1,2}, С.Г. Псахье¹¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФРАГМЕНТОВ РАЗЛОМНЫХ ЗОН НА ОСОБЕННОСТИ ИХ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ПРИ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Работа посвящена теоретическому исследованию влияния ряда параметров напряженно-состояния фрагментов залеченных разломных зон на особенности их механического отклика при сдвиговом деформировании в условиях неравноосного сжатия. Исследование проводилось на основе компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов. В качестве основного параметра напряженного состояния среды в работе использован безразмерный параметр – степень неравноосности сжатия, характеризующий отношение бокового и нормального напряжений в плоскости деформирования. Основной целью работы являлся анализ зависимостей сдвиговой прочности, величины предельной сдвиговой деформации и изменения объема фрагмента среды (дилатансии) от степени неравноосности сжатия на начальной стадии активизации фрагмента разломной зоны. Показано, что важным фактором, влияющим на условия, при которых происходит активизация залеченной разломной зоны, является степень неравноосности сжатия среды. При этом величина сдвиговых напряжений, действующих во фрагменте среды, а также соответствующие ей уровни предельной сдвиговой деформации и дилатансии, при которых возможна активизация разломной зоны, существенно зависят от динамики изменения и соотношения локальных значений некоторых инвариантов тензора напряжений. Среди них можно выделить такие характеристики напряженного состояния, как давление и интенсивность напряжений. Это связано с тем, что данные параметры определяют возможность функционирования в геологической среде одного из ключевых деформационных механизмов, который связан с формированием и эволюцией повреждений на границах раздела структурных элементов в блочной среде. В частности, снижение во фрагменте среды уровня давления при относительно низких уровнях интенсивности напряжений может приводить к увеличению его предельной сдвиговой деформации и дилатансии в момент начала активизации разломной зоны. В то же время значительное увеличение интенсивности напряжений при одновременном снижении давления может приводить к значительному снижению сдвиговой прочности геосреды.

Ключевые слова: геологическая среда, разломная зона, неравноосное сжатие, сдвиговое деформирование, напряженное состояние, инварианты тензора напряжений, сдвиговая прочность, предельная деформация, дилатансия, проскальзывание, компьютерное моделирование.

S.V. Astafurov^{1,2}, E.V. Shilko^{1,2}, S.G. Psakhie¹

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB, RAS,
Tomsk, Russian Federation

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF STRESS STATE PARAMETERS OF FAULT ZONES ON PECULIARITIES OF THEIR MECHANICAL RESPONSE UNDER SHEAR LOADING

The paper is devoted to theoretical investigation of the influence of stress state parameters of healed fault zones fragments on the characteristics of their mechanical response under shear deformation in the conditions of nonequiaxial compression. Investigation was based on computer-aided simulation by the movable cellular automaton method. Dimensionless parameter, named the degree of nonequiaxiality of compression was used as the basic parameter of stress state of the medium. This parameter characterizes the ratio of lateral and normal stresses in the plane of deformation. The main objective of the paper was to analyze the dependences of the shear strength, ultimate shear strain and value of volume changing (dilatancy) on the degree of compression nonequiaxiality at the initial stage of activation of the fault zone fragment. It is shown that the degree of compression nonequiaxiality of the medium is an important factor affecting the conditions under which healed fault zone could be activated. Here, the value of the shear stresses acting in a fragment of the medium, as well as corresponding ultimate values of shear strain and dilatancy, at which the fault zone could be activated, are essentially dependent on the ratio and dynamics of change of the local values of some stress tensor invariants. Among them are pressure and stress intensity (von Mises stress). This is due to the fact that these parameters determine the ability to operate in the geological medium of one of a key deformation mechanism that is associated with the formation and evolution of damages at the interface of the structural elements in the block structure medium. In particular, the decrease in the pressure in the medium fragment at relatively low levels of stress intensity can lead to an increase in ultimate shear strain and dilatancy at the beginning stages of activation of the fault zone. At the same time a significant increase in the stress intensity while decreasing the pressure could lead to a decrease in the shear strength of the geomedium.

Keywords: geological medium, fault zone, nonequiaxial compression, shear loading, stress state, stress tensor invariants, shear strength, ultimate strain, dilatancy, slip, computer-aided simulation.

Введение

Хорошо известно, что процессы, протекающие в разломно-блоковых геологических средах, связаны с высокими степенями локализации деформации на активных границах раздела фрагментов среды, возникновением и накоплением повреждений, развитием существующих границ раздела и их «залечиванием», возникновением новых межблочных границ разных масштабов или активизацией существующих, но ранее не активных и т.д. [1, 2]. Возникновение новых или активизация залеченных границ раздела зачастую сопровождается значительными сдвиговыми деформациями по разломной зоне и выделением накопленной в среде сейсмической энергии [1–3]. Необходимо отметить,

что фрагменты земной коры находятся в различном и, как правило, сложном напряженно-деформированном состоянии, важнейшей характеристикой которого является стесненность, в значительной степени влияющая на интенсивность и последовательность вовлечения различных механизмов деформирования среды, ее прочностные и дилатансионные свойства [3–7]. Причем вследствие неравномерности распределения напряжений в среде величина сжатия системы в разных направлениях может существенно различаться [2, 4]. Таким образом, эволюция, в том числе и активизация ранее залеченных разломных зон как на значительных глубинах, так и вблизи дневной поверхности, происходит в условиях неравноосного сжатия [2, 6, 7, 8]. Поэтому исследование взаимосвязи характеристик напряженного состояния (в частности, инвариантов тензора напряжений) и особенностей деформирования и разрушения фрагментов разломных зон представляет особый интерес в геомеханике. Проведение подобных исследований на реальных природных системах является чрезвычайно сложной, хотя и решаемой задачей. Поэтому важная информация может быть получена на основе физического [9–11] и компьютерного моделирования [12–15].

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию влияния характеристик напряженного состояния фрагмента залеченной границы раздела на особенности ее механического отклика при сдвиговом деформировании. Исследование проводилось путем компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов [6, 7]. Данный метод является разновидностью метода частиц и на протяжении ряда лет успешно применяется для изучения особенностей деформирования и разрушения консолидированных, сыпучих и слабосвязанных геологических сред [6, 7, 16, 17].

1. Постановка задачи компьютерного моделирования

Для исследования влияния параметров напряженного состояния блочных геологических сред на особенности их механического отклика в работе использовалась двумерная структурная модель фрагмента «залеченной» разломной зоны. При этом рассматривалась блочная среда, характеризующаяся так называемой одноранговой внутренней структурой, то есть состоящая из структурных элементов (блоков) одного масштаба. В рамках используемой модели фрагмент геологической среды представлялся ансамблем блоков (структурных элементов)

одного размера, разделенных границами раздела со свойствами, существенно отличающимися от свойств блоков (рис. 1, а) [6, 7]. При этом межблочные границы представляли собой зоны с пониженными прочностными и деформационными характеристиками. Это связано с более высокой (в сравнении с блоками) степенью их поврежденности и пористости, а на микроуровне – нередко и с другим фазовым составом (связующий зерна цемент). Указанные особенности интерфейсных областей способствуют локализации и накоплению на них необратимых деформаций.

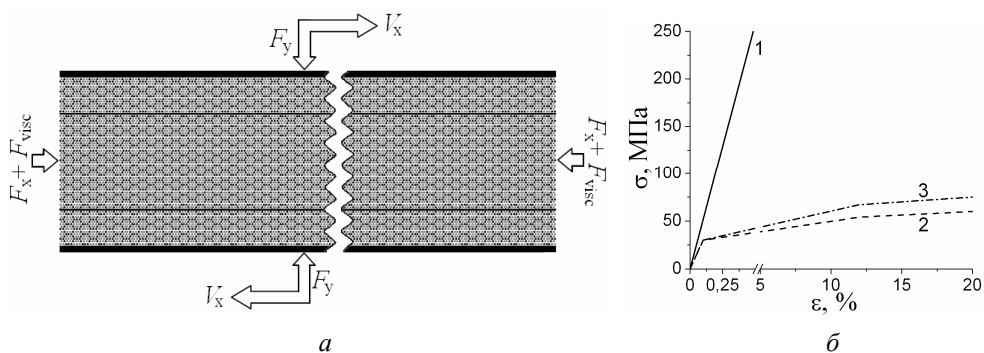


Рис. 1. Структура моделируемого образца и схема нагружения (а); функции отклика автоматов блоков (б): функции отклика блоков (1); функции межблочных границ во внутренней области образца (2); функции «в приповерхностных» слоях образца (3). Волнистой линией на рисунке (а) схематично обозначена условная линия разрыва

В соответствии с поставленной в работе задачей расчеты проводились с использованием реализованной в рамках метода подвижных клеточных автоматов двумерной модели изотропных упругопластических сред [16, 17], построенной на основе деформационной теории пластичности с разгрузкой по упругому закону [18, 19]. Расчет напряженно-деформированного состояния среды проводился в приближении, аналогичном приближению плоско-деформированного состояния. В качестве критерия разрушения использовался критерий Мизеса [16, 17]. Выполнение данного критерия в паре связанных автоматов приводит к разрыву межавтоматной связи и образованию повреждения. Отметим, что отличительными особенностями взаимодействия «несвязанных» (контактирующих) клеточных автоматов являются отсутствие сопротивления растяжению и наличие ограничения на величину силы тангенциального взаимодействия, определяемого силой трения поверхностей элементов.

Для автоматов, моделирующих блоки, задавалась линейная функция отклика, отвечающая высокопрочному материалу, деформирующемуся упруго (кривая 1 на рис. 1, б). Для учета более высокой (в сравнении с блоками) степени поврежденности и пористости межблочных границ раздела для них задавалась функция отклика с пониженными прочностными свойствами и характеризующаяся наличием продолжительного участка накопления необратимых деформаций (кривые 2 и 3 на рис. 1, б). Данный участок имитирует интегральное влияние дефектов и повреждений более низких по отношению к рассматриваемому масштабных уровней (размер повреждений меньше характерной ширины границ раздела), существующих изначально и образующихся в процессе деформирования, на снижение локального сопротивления границы раздела сдвигу. Таким образом, участок накопления необратимых деформаций (кривые 2 и 3 на рис. 1, б) отвечает так называемым процессам «деструктивной деградации» материала интерфейса (далее будем называть их просто «деградацией») [3, 5]. Учет более высокой степени деградации механических свойств среды в «ядре» сдвиговой зоны (на рис. 1, а она выделена тонкими горизонтальными линиями) осуществлялся понижением прочности границ раздела в центре модельного образца (в сравнении с границами раздела в слоях вблизи верхней и нижней поверхностей, кривые 2 и 3 на рис. 1, б) [20–22]. Наличие на границах раздела повреждений, размер которых соизмерим с шириной интерфейсной области, учитывалось заданием несвязанных пар автоматов [16, 17]. Отметим, что механические характеристики материалов, слагающих интерфейсные области и блоки (см. рис. 1, б), качественно соответствовали брекчированным породам (в частности, так называемой глинке трения) и граниту [23–25]. Представленная модель отвечает так называемой «гранулированной» концепции представления зон активных разломов [20]. Как отмечалось в [6, 7], использование такого подхода в совокупности с заданными функциями отклика автоматов блоков и границ раздела позволяет учитывать процессы деформации и разрушения, происходящие в рассматриваемой среде на различных пространственно-структурных уровнях [26, 27].

Известно, что механические свойства геологических сред, особенно на больших глубинах, могут меняться с течением времени. Поэтому в общем случае при моделировании деформирования и разрушения массивов горных пород используются вязкоупругопластические

модели. При этом вязкоупругая часть определяющих соотношений в данных моделях содержит времена релаксации, характерная величина которых составляет сотни, тысячи, а иногда и десятки тысяч лет [28, 29]. Поэтому при моделировании относительно «кратковременных» деформационных процессов (десятки лет) достаточно корректным является использование упругопластического приближения (без учета вязкоупругой составляющей) [9, 12–15]. Данное упрощение используется в настоящей работе при моделировании сдвигового деформирования фрагмента разломной зоны в условиях неравноосного сжатия. Таким образом, в рамках рассматриваемой модели интегральное изменение механических характеристик моделируемого фрагмента геологической среды связано в первую очередь с деградационными процессами, вызванными формированием и накоплением повреждений на границах раздела структурных элементов.

Соотношение линейных размеров моделируемой области (см. рис. 1, *a*) в проводимых расчетах составляло $L/H = 5$, где L – длина (размер в горизонтальном направлении), H – ширина образца (размер в вертикальном направлении). Исходное напряженное состояние образца задавалось путем неравноосного сжатия силами F_x и F_y (см. рис. 1, *a*). Величина F_y во всех расчетах была одинаковой, и ее удельное значение (σ_y) составляло 25 % от величины предела упругости (σ_{yield}) функции отклика материала межблочных границ (кривая 2 на рис. 1, *b*). Стесненный образец подвергался сдвиговому деформированию с малой постоянной скоростью V_x (см. рис. 1, *a*). Для учета инерционных и диссипативных свойств окружения моделируемого фрагмента блочной среды на боковые поверхности образца, помимо сжимающих сил F_x , действовали вязкие силы $F_{visc} = -\alpha V_x$, где V_x – компонента X скорости соответствующего автомата боковой поверхности.

Степень стеснения (определяющая степень неравноосности сжатия) образца характеризовалась безразмерным параметром $C_\sigma^{ne} = (\sigma_y - \sigma_x) / \sigma_y$, где σ_x – удельное значение обжимающей в горизонтальном направлении силы F_x ; σ_y – удельное значение вертикальной сжимающей силы F_y [6,7]. Параметр C_σ^{ne} характеризует относительную величину обжатия системы в направлении сдвига. В представленных в работе расчетах величина C_σ^{ne} варьировалась в диапазоне от 0 до 1

($C_{\sigma}^{ne} = 0$ отвечает равноосному, а $C_{\sigma}^{ne} = 1$ – одноосному сжатию системы в вертикальном направлении).

На рис. 2 приведены графики зависимости удельного значения силы сопротивления сдвиговому деформированию моделируемой системы (сдвигового напряжения) τ от величины сдвиговой деформации γ для различных степеней неравноосности сжатия (C_{σ}^{ne}). Сдвиговые напряжения τ здесь и далее приведены в безразмерном виде, полученном путем нормирования их абсолютных величин на максимальную силу сопротивления сдвиговому деформированию образца при $C_{\sigma}^{ne} = 0$. Угол сдвига γ определялся как $\gamma = d_x/H$, где d_x – относительное смещение верхней и нижней поверхностей моделируемого образца вдоль оси X (см. рис. 1, а), H – высота образца. Приведенные на рис. 2 кривые характеризуются следующими основными участками, типичными для блочных геологических сред: квазиупругим, квазипластическим, разупрочнения и остаточной прочности [2, 30, 31]. При этом увеличение степени неравноосности сжатия приводит к изменению продолжительности стадии квазипластического течения, а также величины максимальной силы сопротивления сдвиговому деформированию (сдвиговой прочности среды).

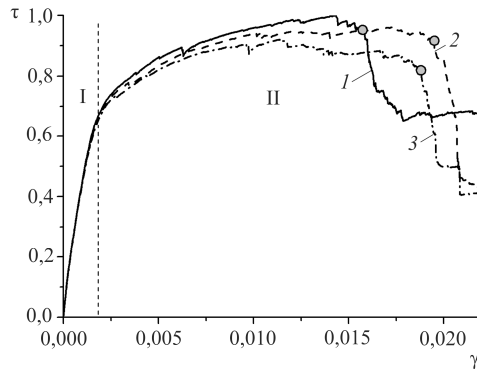


Рис. 2. Графики зависимостей удельной силы сопротивления сдвиговому деформированию моделируемой системы (τ) от угла сдвига (γ): (1) $C_{\sigma}^{ne} = 0$; (2) $C_{\sigma}^{ne} = 0,5$; (3) $C_{\sigma}^{ne} = 1$. На кривых серым кружком показан момент начала стадии быстрого разупрочнения блочной среды

В работах [6, 7] проведено детальное изучение зависимостей основных параметров механического отклика изучаемой системы от сте-

пени неравносности сжатия в момент достижения максимума силы сопротивления сдвиговому деформированию (сдвиговой прочности среды). При этом, как видно из рис. 2 моменты достижения сдвиговой прочности среды и начала стадии «быстрого» разупрочнения сдвиговой зоны (резкого сброса силы сопротивления сдвиговому деформированию) могут значительно (до двух раз) различаться по величине сдвиговой деформации. Это связано с тем, что по достижении сдвиговой прочности моделируемой системы в ней начинают активно накапливаться повреждения. Это сопровождается некоторым снижением интегральной жесткости среды и, как следствие, небольшим снижением величины силы сопротивления сдвиговому деформированию. С дальнейшим увеличением сдвиговой деформации в образце формируется магистральная трещина, с образованием которой связана стадия быстрого разупрочнения среды. В реальных геологических средах это может соответствовать моменту начала динамического проскальзывания по границе раздела и, как следствие, генерации сейсмического события. Поэтому исследование особенностей деформирования и разрушения фрагментов разломных зон в момент активизации динамических подвижек представляет особый интерес в геомеханике. Необходимо отметить, что интенсивность процесса накопления повреждений, определяющая начало стадии быстрого разупрочнения системы, в значительной степени зависит от характеристик напряженного состояния среды (давление, интенсивность напряжений и т.д.). Поэтому настоящая работа посвящена анализу влияния характеристик напряженного состояния модельной блочной среды на особенности ее механического отклика в начале стадии быстрого разупрочнения (далее данный момент времени будем также называть началом активизации разломной зоны).

2. Обсуждение результатов

Анализ диаграмм на рис. 2 показывает, что значения сдвиговых напряжений и деформаций в момент начала стадии быстрого разупрочнения в значительной степени зависят от степени неравносности сжатия. Так, на рис. 3 представлены зависимости силы сопротивления сдвиговому деформированию моделируемого образца τ_u и значения угла сдвига γ_u в момент начала активизации разломной зоны от параметра C_σ^{ne} . В дальнейшем данные характеристики диаграмм сдвигового деформирования будем называть предельной сдвиговой прочностью

и предельной сдвиговой деформацией блочной среды соответственно. Из рис. 3 видно, что данные зависимости имеют ярко выраженный двухстадийный характер. Так, при $C_{\sigma}^{ne} < 0,5$ зависимость предельной сдвиговой прочности практически не зависит от степени неравноосности сжатия, а при $C_{\sigma}^{ne} > 0,5$ кривая $\tau_u(C_{\sigma}^{ne})$ монотонно убывает (рис. 3, а). При этом зависимость предельной сдвиговой деформации от степени стеснения ведет себя противоположным образом (кривая $\gamma_u(C_{\sigma}^{ne})$ возрастает при $C_{\sigma}^{ne} < 0,5$ с последующим выходом на насыщение). Выявленные особенности силового и деформационного отклика модельной разломной зоны с изменением степени неравноосности сжатия в момент начала быстрого разупрочнения среды свидетельствует об изменении характера ее деформирования и разрушения при сдвиговом деформировании с ростом C_{σ}^{ne} .

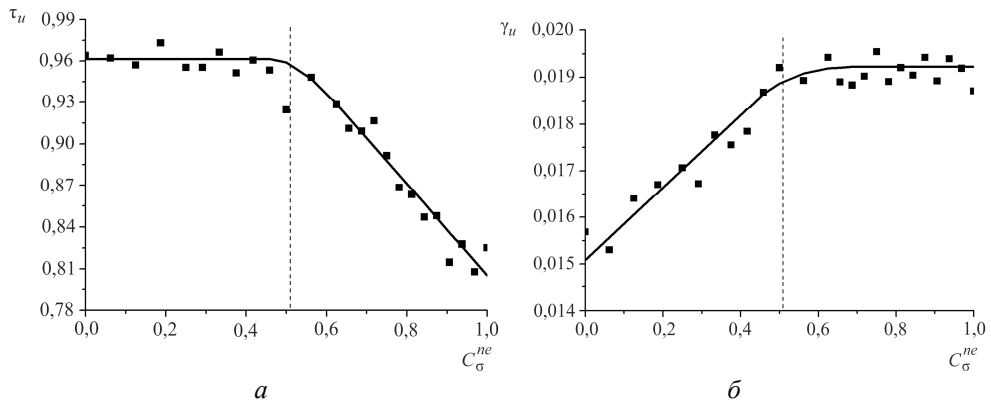


Рис. 3. Зависимости предельной сдвиговой прочности моделируемого образца τ_u (а) и «предельного» значения угла сдвига γ_u (б) в момент начала стадии быстрого разупрочнения от степени неравноосности сжатия (параметра C_{σ}^{ne})

Характер описанных выше закономерностей механического отклика изучаемого модельного фрагмента разломной зоны в значительной степени определяется особенностями напряженно-деформированного состояния среды и процессов локализации необратимых деформаций на межблочных интерфейсах. При этом одним из важнейших деформационных механизмов, определяющим поведение блочной среды при сдвиговом деформировании в условиях неравноосного сжатия,

являются процессы накопления повреждений на границах раздела структурных элементов [6, 7].

На рис. 4, *а* показана зависимость количества повреждений, накопленных к моменту начала стадии быстрого разрушения, от степени неравносности сжатия. Можно видеть, что во всем интервале рассматриваемых значений C_{σ}^{ne} данный параметр практически не зависит от степени стеснения. Таким образом, момент начала активизации разломной зоны связан с накоплением на межблочных границах некоторого критического количества повреждений (~5,7 % от общего количества межавтоматных связей в границах раздела к моменту начала сдвигового деформирования), при котором происходит формирование магистральной трещины. При этом на основе анализа данной зависимости нельзя объяснить описанное выше поведение основных параметров механического отклика блочной среды с изменением степени неравносности сжатия. Это означает, что силовой и деформационный отклик модельного фрагмента разломной зоны определяются не только количеством повреждений на границах раздела, но и особенностями их «функционирования» как деформационного механизма мезоскопического масштабного уровня. Так, на начальных этапах квазипластического деформирования геосреды основным деформационным механизмом являются процессы локализации необратимых деформаций на межблочных границах. При исчерпании их релаксационной способности в соответствии с основными положениями концепции структурных уровней деформации и разрушения твердых тел должны активизироваться механизмы деформации более высокого масштабного уровня [26, 27]. В рассматриваемой блочной среде это проявляется через возникновение повреждений, размеры которых сопоставимы с шириной межблочных интерфейсных зон. Действие данного механизма связано с тем, что поверхности изначально существующих и вновь образующихся повреждений могут проскальзывать друг относительно друга, повышая тем самым способность среды претерпевать большие необратимые сдвиговые деформации без формирования разрушающих макротрещин (или деформационную способность среды).

Реализация данного деформационного механизма в значительной степени зависит от характеристик напряженного состояния рассматриваемого фрагмента среды. Так на рис. 4, *б* представлены зависимости давления P и средней интенсивности напряжений σ_i в моделируемой

системе в момент начала сдвигового деформирования от степени неравноосности сжатия (в дальнейшем их также будем называть начальными или исходными значениями давления и средней интенсивности напряжений). Можно видеть, что с ростом параметра C_σ^{ne} величина P монотонно убывает, а интенсивность напряжений незначительно убывает при $C_\sigma^{ne} < 0,33$, после чего монотонно возрастает с ростом степени неравноосности сжатия. При этом зависимости $P(C_\sigma^{ne})$ и $\sigma_i(C_\sigma^{ne})$ пересекаются при $C_\sigma^{ne} \approx 0,51$. Из сопоставления кривых на рис. 3 и 4, б видно, что величина предельной сдвиговой прочности не зависит от степени неравноосности сжатия при $P > \sigma_i$ ($C_\sigma^{ne} < 0,51$) и убывает при $P < \sigma_i$ ($C_\sigma^{ne} > 0,51$). При этом выход на насыщение зависимости $\gamma_u(C_\sigma^{ne})$ происходит в области пересечения кривых $P(C_\sigma^{ne})$ и $\sigma_i(C_\sigma^{ne})$.

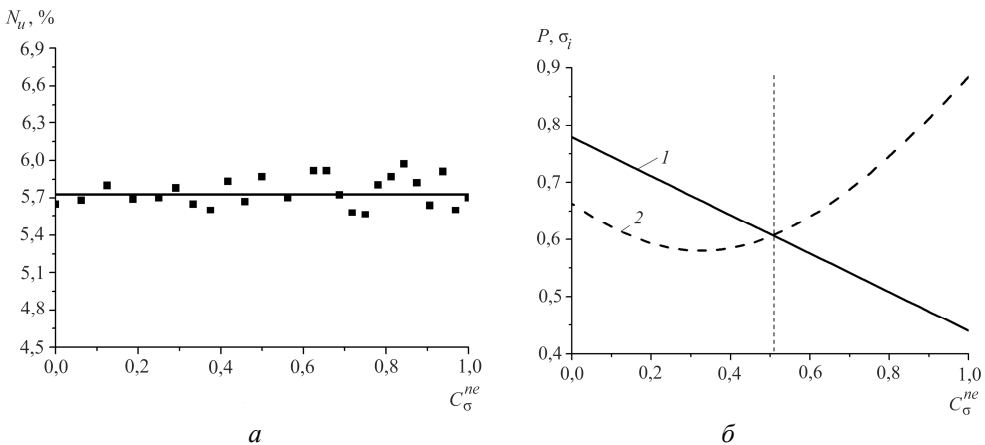


Рис. 4. Зависимости количества накопленных в процессе сдвигового деформирования повреждений N_u к моменту начала стадии быстрого разупрочнения блочной среды (а) и средних значений давления (P) и интенсивности напряжений (σ_i) в образце в момент начала сдвигового деформирования (б) от степени неравноосности сжатия:

1 – давление (P); 2 – интенсивность напряжений (σ_i)

Такая связь параметров механического отклика с характеристиками напряженного состояния среды может быть объяснена особенностью функционирования повреждений как мезоскопического деформационного механизма. Как говорилось выше, в работе в качестве критерия разрушения выступает критическая величина интенсивности напряжений (критерий Мизеса). Поэтому при малых начальных значе-

ниях величины σ_i (при малых C_σ^{ne}) формирование повреждений возможно либо при высоких сдвиговых деформациях, либо в случае быстрой локализации необратимых деформаций на относительно малом количестве границ раздела. Из рис. 3, б видно, что при малых C_σ^{ne} величина предельной сдвиговой деформации мала, следовательно, процесс образования повреждений локализуется на относительно небольшом количестве границ раздела (это, в частности, подтверждается анализом картин разрушения моделируемого фрагмента среды). Причиной этого является то, что при высоких начальных давлениях изначально существующие и вновь образующиеся на границах раздела повреждения являются стесненными и реализация проскальзывания на них затруднена. Поэтому аккомодация среды к возрастающей сдвиговой нагрузке возможна только путем появления все большего количества повреждений. В результате с ростом величины сдвиговой деформации в образце быстро прорастает магистральная трещина, и происходит разрушение. Это, в частности, может быть проиллюстрировано диаграммой нагружения при $C_\sigma^{ne} = 0$ (см. рис. 2, кривая 1), на которой вслед за достижением максимума силы сопротивления сдвиговому деформированию быстро наступает стадия быстрого разупрочнения. В то же время низкий уровень интенсивности напряжений в момент начала сдвигового деформирования, а также стесненность повреждений приводит к тому, что практически равноосно стесненные образцы (при малых степенях неравноосности сжатия) демонстрируют достаточно высокую сдвиговую прочность (см. рис. 3, а).

С ростом степени неравноосности сжатия величина исходного давления снижается, следствием чего является облегчение проскальзывания по поверхностям повреждений и возрастание зависимости $\gamma_u(C_\sigma^{ne})$ (см. рис. 3, б). При этом в момент начала сдвигового деформирования в интервале $0 < C_\sigma^{ne} < 0,51$ значение средней интенсивности напряжений в образцах является относительно низким, что позволяет среде продолжать демонстрировать достаточно высокую предельную сдвиговую прочность (см. рис. 3, а).

При высоких степенях неравноосности сжатия ($C_\sigma^{ne} > 0,51$) исходное давление продолжает снижаться при значительном возрастании величины σ_i . Причем при $C_\sigma^{ne} > 0,51$ величина P становится меньше,

чем σ_i (см. рис. 4, б). Рост средней интенсивности напряжений, действующих в среде в момент приложения сдвигового деформирования, приводит к тому, что для формирования повреждений среде не требуется претерпевать значительных локальных деформаций в процессе сдвигового нагружения. В результате повреждения на границах раздела формируются достаточно равномерно во всем объеме модельной разломной зоны. Это приводит к снижению эффективной жесткости среды и, как следствие, значительному снижению предельной сдвиговой прочности (до 20 %) в интервале $0,51 < C_{\sigma}^{ne} < 1$. Необходимо отметить, что физическим смыслом величины интенсивности напряжений является сопротивление формоизменению материала, то есть величина σ_i характеризует сопротивление среды сдвиговому деформированию. Поскольку в интервале $0,51 < C_{\sigma}^{ne} < 1$ наблюдается значительный рост величины σ_i , то на фоне значительного снижения давления возрастает сопротивление формоизменению модельных образцов. Это приводит к тому, что вклады от двух «противодействующих» факторов (сопротивление сдвиговому деформированию с ростом σ_i и облегчение проскальзывания с убыванием P) практически компенсируют друг друга. Следствием этого является выход на насыщение зависимости $\gamma_u(C_{\sigma}^{ne})$ при больших степенях неравноосности сжатия.

Еще одной важной характеристикой механического отклика блочной геологической среды при сдвиговом деформировании является изменение ее объема, или дилатансия. Результатом дилатансии являются изменение структуры блочной геосреды, ее волновых и механических свойств [3, 32]. Дилатансия играет особую роль в деформационных процессах, происходящих в земной коре, и в частности при землетрясениях. С ней связаны процессы разупрочнения и упрочнения горных пород, она способствует распространению флюидов в земной коре и т.д. [3, 32–34]. Так, на рис. 5 представлены зависимости изменения объема модельной разломной зоны ϵ_v от величины угла сдвига γ при различных степенях неравноосности сжатия. Величина ϵ_v в работе определялась как относительное изменение объема образца: $\epsilon_v = (V - V_0)/V_0$, где V_0 – объем моделируемого образца в момент начала сдвигового деформирования; V – текущее значение объема. Окончание кривых на рис. 5 соответствует моменту начала стадии быстрого разу-

прочнения разломной зоны. Анализ зависимостей $\varepsilon_V(\gamma)$, соответствующих различным степеням стеснения образца (различным значениям C_σ^{ne}), показал их двухстадийный характер (см. рис. 5). При этом выделенные стадии в значительной степени связаны с соответствующими стадиями силового отклика модельной системы (крайнеупругим (I) и квазипластическим (II) участками на рис. 2). Как видно из рис. 5, быстрое увеличение объема моделируемой разломной зоны начинается при выходе диаграмм сдвигового нагружения на стадию квазипластического деформирования. При этом, как и в случае, описанном в [7], величина изменения объема в начале стадии быстрого разупрочнения в значительной степени зависит от степени стеснения фрагмента блочной среды. Так, на рис. 6 (кривая 1) показана зависимость изменения объема блочной среды в момент начала стадии быстрого разупрочнения ε_V'' от степени неравноосности сжатия. Из рис. 6 видно, что данная зависимость ведет себя подобно кривой $\gamma_u(C_\sigma^{ne})$ (см. рис. 3, б) с выходом на насыщение при $C_\sigma^{ne} > 0,5$.

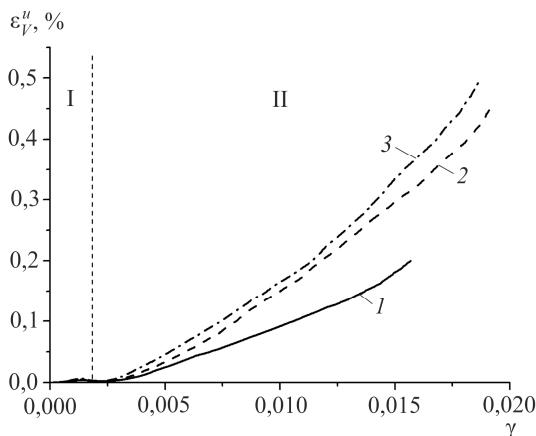


Рис. 5. Зависимости изменения объема модельной разломной зоны ε_V от величины угла сдвига γ при различных степенях неравноосности сжатия: (1) $C_\sigma^{ne} = 0$; (2) $C_\sigma^{ne} = 0,5$; (3) $C_\sigma^{ne} = 1$. Окончание кривых соответствует моменту начала стадии быстрого разупрочнения разломной зоны

В работе [7] показано, что для изучаемой модельной среды при сдвиговом деформировании в условиях неравноосного сжатия доминирующим дилатансионным механизмом (вносящим основной вклад

в изменение объема среды) является механизм, связанный с функционированием повреждений. При этом действие данного механизма определяется вкладом двух основных факторов (в дальнейшем их также будем называть механизмами): проскальзыванием по поверхностям существующих и вновь образующихся повреждений и увеличением пористости (раскрытием/расширением повреждений). В настоящей работе проанализирован вклад каждого из данных «элементарных» механизмов в интегральную дилатансию моделируемого фрагмента геосреды. Так, на рис. 6 показаны зависимости изменения объема, вызванного проскальзыванием поверхностей повреждений (ϵ_V^{slip} , кривая 2) и увеличением пористости (ϵ_V^{pore} , кривая 3) от степени неравноосности сжатия. В проведенных расчетах величина объема ϵ_V^{pore} оценивалась через объем пустот («пор»), ограниченных несвязанными и невзаимодействующими клеточными автоматами. Вклад от проскальзывания рассчитывался на основе следующего соотношения: $\epsilon_V^{slip} = \epsilon_V^u - \epsilon_V^{pore}$. Из рис. 6 видно, что вклад в изменение объема от изменения величины ϵ_V^{pore} в момент начала стадии быстрого разупрочнения практически не зависит от степени неравноосности сжатия (кривая 3 незначительно возрастает только при малых значениях параметра C_σ^{ne}). При этом характер зависимости $\epsilon_V(C_\sigma^{ne})$ полностью определяется вкладом, связанным с проскальзыванием поверхностей повреждений. Как видно из рис. 6, зависимость $\epsilon_V^{slip}(C_\sigma^{ne})$ монотонно возрастает при $C_\sigma^{ne} < 0,5$, что и обеспечивает возрастание зависимости $\epsilon_V(C_\sigma^{ne})$.

Отметим, что возрастание вклада от проскальзывания в изменение объема среды происходит при $C_\sigma^{ne} < 0,5$. Это соответствует достаточно низким уровням начальной интенсивности напряжений и связано со снижением исходного давления в образце, вызванным внешней нагрузкой (сравним рис. 6 и 4, б). Причиной этого является то, что снижение давления с ростом степени неравноосности сжатия сопровождается облегчением проскальзывания по поверхностям повреждений. В результате вклад от этого элементарного дилатансионного механизма в интегральное изменение объема среды возрастает. В области высоких значений степени неравноосности сжатия ($C_\sigma^{ne} > 0,5$) происходит

значительное возрастание величины σ_i (интенсивность напряжений становится больше давления). При этом возрастает сопротивление сдвиговому деформированию и, как следствие, проскальзыванию. Однако действие данного фактора в значительной степени компенсируется дальнейшим снижением действующего в среде давления, что сопровождается выходом на насыщение зависимости $\varepsilon_V^{slip} (C_\sigma^{ne})$ (см. рис. 6).

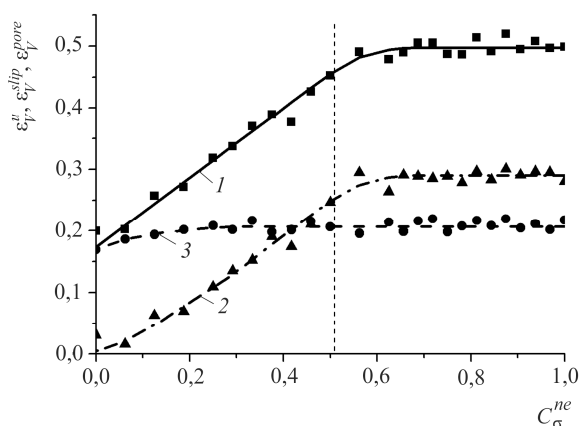


Рис. 6. Зависимости изменения объема модельной разломной зоны ε_V^u (кривая 1) и вкладов в изменение объема от механизма проскальзывания ε_V^{slip} (кривая 2) и изменения объема пор ε_V^{pore} (кривая 3) в момент начала стадии быстрого разупрочнения от степени неравноосности сжатия (параметра C_σ^{ne})

Заключение

Результаты компьютерного моделирования сдвигового деформирования фрагментов залеченных разломных зон показали, что важным фактором, влияющим на условия активизации границы раздела, является степень неравноосности сжатия среды. При этом величина действующих в системе сдвиговых напряжений, уровень сдвиговых деформаций и величина дилатансии, при которых возможна активизация разломной зоны, существенно зависят от особенностей напряженного состояния системы и соотношения локальных значений инвариантов тензора напряжений. Это связано с тем, что степень стеснения существенно влияет на особенности формирования повреждений и особенности их функционирования как деформационного и дилатансионного механизмов мезоскопического масштабного уровня, важнейшей особенностью которых является возможность реализации относительного

проскальзывания поверхностей повреждений. В работе показано, что вклад от проскальзывания поверхностей повреждений в интегральный механический отклик фрагмента разломной зоны при сдвиговом деформировании в значительной степени определяется не только абсолютной величиной, но и соотношением таких инвариантов тензора напряжений, как давление и интенсивность напряжений. В частности, снижение во фрагменте среды давления при низких значениях интенсивности напряжений может приводить к увеличению его предельной сдвиговой деформации и дилатансии в момент начала активизации разломной зоны. В то же время значительное увеличение сопротивления формоизменению при одновременном снижении давления может приводить к значительному снижению сдвиговой прочности геосреды.

Таким образом, полученные в работе результаты показывают принципиальную возможность оценки прочностных, деформационных и дилатансионных характеристик разломных зон на ранних стадиях их активизации. Подобные оценки могут быть получены на основе анализа динамики изменения действующих в изучаемом фрагменте разломной зоны давления и интенсивности напряжений. При этом определение данных характеристик напряженного состояния может быть осуществлено с использованием различных методик оценки компонентов тензора напряжений в земной коре. Среди них можно выделить такие методы, как метод катакластического анализа разрывных смещений и сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений и измерения напряжений в скважинах и др. [35–38].

Работа выполнена в рамках проекта Ш.23.1.4 Программы фундаментальных исследований СО РАН (на 2013–2016 гг.)

Библиографический список

1. Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Нарушение и залечивание зон локализации деформаций в массиве горных пород // *Физическая мезомеханика*. – 2007. – Т. 10, №1. – С. 5–18.
2. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: Академкнига, 2003. – 423 с.
3. Гольдин С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения // *Физическая мезомеханика*. – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 5–14.

4. Адушкин В.В., Цветков В.М. Напряженное состояние и его связь со структурой горного массива // Физические процессы в геосферах при сильных возмущениях. – М.: Изд-во РАН, 1996. – С. 111–116.

5. Николаевский В.Н. Трещиноватость земной коры как ее генетический признак // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 5. – С. 646–656.

6. Астафуров С.В., Шилько Е.В., Псахье С.Г. Влияние стесненных условий на характер деформирования и разрушения блочных сред при сдвиговом нагружении // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 6. – С. 23–32.

7. Исследование влияния неравноосности сжатия на дилатансионные процессы в блочной среде в условиях сдвигового деформирования / С.В. Астафуров, Е.В. Шилько, А.В. Андреев, С.Г. Псахье // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 2. – С. 47–55.

8. Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном горизонтальном сдвиге блоков его фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. – М.: Наука, 1987. – С. 41–57.

9. Ревуженко А.Ф. Механика упругопластических сред и нестандартный анализ. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. – 428 с.

10. Косых В.П. Исследование особенностей сдвигового деформирования сыпучих материалов в стесненных условиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2006. – № 6. – С. 63–67.

11. Бишоп А.У. Параметры прочности при сдвиге ненарушенных и перемятых образцов грунта // Определяющие законы механики грунтов / под ред. В.Н. Николаевского. – М.: Мир, 1975. – С. 7–75.

12. Нелинейная механика геоматериалов и геосред / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Ю.П. Стефанов [и др.]. – Новосибирск: Гео, 2007. – 235 с.

13. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16, № 1. – С. 5–26.

14. Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А., Смолин А.Ю. О закономерностях локализации деформации в горизонтальных слоях среды при разрывном сдвиговом смещении основания // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 83–88.

15. Структура и стадии формирования разломной зоны в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания / Ю.П. Сте-

фанов, Р.А. Бакеев, Ю.Л. Ребецкий, В.А. Конторович // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16, № 5. – С. 41–52.

16. Development of a formalism of movable cellular automaton method for numerical modeling of fracture of heterogeneous elastic-plastic materials / S. Psakhie, E. Shilko, A. Smolin, S. Astafurov // Fracture and Structural Integrity. – 2013. – No. 24. – P. 26–59. doi:10.3221/IGF-ESIS.24.04

17. Развитие подхода к моделированию деформирования и разрушения иерархически организованных гетерогенных, в том числе контрастных, сред / С.Г. Псахье, Е.В. Шилько, А.Ю. Смолин [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 27–54.

18. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.

19. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высш. шк., 2002. – 400 с.

20. Ben-Zion Y., Sammis C.G. Characterization of fault zones // Pure and Applied Geophysics. – 2003. – Vol. 160. – No. 3–4. – P. 677–715. doi: 10.1007/PL00012554

21. Шерман С.И. Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных разломов литосферы и проблема среднесрочного прогноза землетрясений // Геофизический журнал. – 2005. – Т. 27, № 1. – С. 20–38.

22. Wibberley C.A.J., Yielding G., Toro G. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review // The internal structure of fault zones: implications for mechanical and fluid-flow properties / eds. C.A.J. Wibberley, W. Kurz, J. Imber, R.E. Holdsworth, C. Collettini. – London, Geological Society, Special Publications, 2008. – P. 5–33. doi:10.1144/SP299.2

23. Bell F.G. Engineering properties of soils and rocks. 4th ed. – Wiley-Blackwell, 2000. – 482 p.

24. Aadnoy B., Looyeh R. Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design. – Oxford, Gulf Professional Publishing, 2011. – 376 p

25. Kahraman S., Alber M. Triaxial strength of a fault breccia of weak rocks in a strong matrix // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2008. – Vol. 67. – No. 3. – P. 435–441. doi:10.1007/s10064-008-0152-3

26. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Псахье С.Г. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия развития, проблемы и перспективы // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Спец. вып. Ч 1. – С. I-25–I-40.

27. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Егорушкин В.Е. Основы физической мезомеханики структурно-неоднородных сред // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2010. – № 4. – С. 8–29.

28. Thermo-mechanical model of the Dead Sea Transform / S.V. Sobolev, A. Petrunin, Z. Garfunkel, A.Y. Babeyko // Earth and Planetary Science Letters. – 2005. – Vol. 238. – P. 78–95. doi:10.1016/j.epsl.2005.06.058

29. Gerya T.V., Yuen D.A. Robust characteristics method for modelling multiphase visco-elasto-plastic thermo-mechanical problems // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2007. – Vol. 163. – P. 83–105. doi:10.1016/j.pepi.2007.04.015

30. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород / В.Н. Опарин, Б.Д. Аннин, Ю.В. Чугуй [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 320 с.

31. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 247, № 4. – С. 829–831.

32. Mas D., Chemenda A.I. Dilatancy factor constrained from the experimental data for rocks and rock-type material // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2014. – Vol. 67. – P. 136–144. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.12.014.

33. Ребецкий Ю.Л. Дилатансия, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в естественном залегании // Флюид и геодинамика. – М.: Наука, 2006. – С. 120–146.

34. Onasch C.M., Farver J.R., Dunne W.M. The role of dilation and cementation in the formation of cataclasite in low temperature deformation of well cemented quartz-rich rocks // Journal of Structural Geology. – 2010. – Vol. 32. – No. 12. – P. 1912–1922. doi: 10.1016/j.jsg.2010.04.013.

35. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. – М.: Академкнига, 2007. – 406 с.

36. Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряженное состояние и деформации земной коры алтае-саянской горной области // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 2. – С. 271–291.

37. Schmitt D.R., Currie C.A., Zhang L. Crustal stress determination from boreholes and rock cores: Fundamental principles // Tectonophysics. – 2012 – Vol. 580. – P. 1–26. doi: 10.1016/j.tecto.2012.08.029.

38. Zang A., Stephansson O. Stress Field of the Earth's Crust. – London: Springer, 2010. – 322 p.

References

1. Kocharyan G.G., Pavlov D.V. Narushenie i zalechivanie zon lokalizatsii deformatsii v massive gornyykh porod [Violation and healing of strain localization zones in the rock massifs]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2007. vol. 10, no. 1, pp. 5-18.
2. Kocharyan G.G., Spivak A.A. Dinamika deformirovaniia blochnyykh massivov gornyykh porod [Dynamics of deformation of block-structured rock massifs]. Moscow: Akademkniga, 2003. 423 p.
3. Goldin S.V. Makro- i mezostrukturny ozhagovoi oblasti zemletriaseniia [Macro- and mesostructure earthquake focus]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2005, vol. 8, no. 1, pp. 5–14.
4. Adushkin V.V., Tsvetkov V.M. Napriazhennoe sostoianie i ego svyaz' so strukturoi gornogo massiva [Stress state and its connection with the structure of rock massif]. *Fizicheskie protsessy v geosferakh pri sil'nykh vozmushcheniiakh*; Rossiyskaya akademiya nauk. Moscow, 1996. P. 111–116.
5. Nikolaevskiy V.N. Fractured structure of the crust as its genetic feature. *Russ. Geol. Geophys.*, 2006, vol. 47(5), pp. 646-656.
6. Astafurov S.V., Shilko E.V., Psakhie S.G. Influence of constrained conditions on the character of deformation and fracture of block media under shear loads, 2010, *Phys. Mesomech.*, vol. 13(3-4), pp. 164-172. doi: 10.1016/j.physme.2010.07.008
7. Astafurov S.V., Shilko E.V., Andreev A.V., Psakhie S.G. Effect of compression nonequiality on shear-induced dilatation in a block-structured medium, 2012, *Phys. Mesomech.*, vol. 15(1-2), pp. 80-87. doi: 10.1134/S1029959912010080.
8. Rebetsky Yu.L. Napriazhennoe sostoianie sloia pri prodol'nom gorizontol'nom sdvige blokov ego fundamenta [Stress state of layer at longitudinal horizontal shear of blocks of its foundation]. *Polia napriazhenii i deformatsii v zemnoi kore*. Moscow: Nauka, 1987. P. 41-57.
9. Revuzhenko A.F. Mekhanika uprugo-plasticheskikh sred i nestandartnyy analiz [Mechanics of elastic-plastic media and non-standard analysis]. Novosibirskiy gosudarstvennyi universitet, 2000. 428 p.
10. Kosykh V.P. Shear deformation peculiarities for granular materials under constrained conditions, 2006, *J. Min. Sci.*, vol. 42(6), pp. 578-582. doi: 10.1007/s10913-006-0102-z.

11. Bishop A.W. Shear Strength Parameters for Undisturbed and Remoulded Soil Specimens, in *Proc. Roscoe Memorial Symp.* Cambridge, 1971.

12. Makarov P.V., Smolin I.Yu., Stefanov Yu.P. [et al.] *Nelineinaiia mekhanika geomaterialov i geosred* [Nonlinear mechanics of geomaterials and geomeia]. Novosibirsk: Geo, 2007. 235 p.

13. Makarov P.V., Eremin M.O. Fracture model of brittle and quasi-brittle materials and geomeia, 2013, *Phys. Mesomech.*, vol. 16(3), pp. 207-226. doi: 10.1134/S1029959913030041

14. Stefanov Yu.P., Bakeev R.A., Smolin I.Yu. O zakonomernostiakh lokalizatsii deformatsii v gorizontaľnykh sloiakh sredy pri razryvnom sdvigovom smeshchenii osnovaniia [On the regularities of strain localization in horizontal layers of the medium at breaking shear displacement of foundation]. *Fizicheskaia mezomekhanika*, 2009, vol. 12, no. 1, pp. 83-88.

15. Stefanov Yu.P., Bakeev R.A., Repetsky Yu.L., Kontorovich V.A. Struktura i stadii formirovaniia razlomnoi zony v sloe geosredy pri razryvnom gorizontaľnom sdvige osnovaniia [Structure and formation stage of the fault zone in the layer of geomeium at breaking the horizontal shift of foundation]. *Fizicheskaia mezomekhanika*, 2013, vol. 16, no. 5, pp. 41-52.

16. Psakhie S., Shilko E., Smolin A., Astafurov S. Development of a formalism of movable cellular automaton method for numerical modeling of fracture of heterogeneous elastic-plastic materials, 2013. *Fracture and Structural Integrity*, no. 24, pp. 26-59. doi:10.3221/IGF-ESIS.24.04

17. Psakhie S.G., Shilko E.V., Smolin A.Yu. [et al.] Approach to simulation of deformation and fracture of hierarchically organized heterogeneous media, including contrast media, *Phys. Mesomech.*, 2011, vol. 14(5-6), pp. 224-248. doi: 10.1016/j.physme.2011.12.003.

18. Rabotnov Yu.N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of strained rigid body]. Moscow: Nauka, 1988. 712 p.

19. Aleksandrov A.V., Potapov V.D. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the elasticity and plasticity theory]. Moscow: Vysshiaia shkola, 2002. 400 p.

20. Ben-Zion Y., Sammis C.G. Characterization of fault zones. *Pure and Appl. Geophys.*, 2003, vol. 160(3-4), pp. 677-715. doi: 10.1007/PL00012554

21. Sherman S.I. Tektonofizicheskii analiz seismicheskogo protsessa v zonakh aktivnykh razlomov litosfery i problema srednesrochnogo prognoza zemletriasenii [Tectonophysical analysis of seismic process in active fault

zones of the lithosphere and the problem of mid-term earthquake prediction]. *Geofizicheskii zhurnal*, 2005, vol. 27, no. 1, pp. 20-38.

22. Wibberley C.A.J., Yielding G., Toro G. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. *The internal structure of fault zones: implications for mechanical and fluid-flow properties*. Eds C.A.J. Wibberley, W. Kurz, J. Imber, R.E. Holdsworth, C. Collettini. London, Geological Society, Special Publications, 2008, pp. 5-33. doi:10.1144/SP299.2

23. Bell F.G. Engineering properties of soils and rocks. 4th ed. Wiley-Blackwell, 2000. 482 p.

24. Aadnoy B., Looyeh R. Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2011. 376 p.

25. Kahraman S., Alber M. Triaxial strength of a fault breccia of weak rocks in a strong matrix, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2008, vol. 67(3), pp. 435-441. doi:10.1007/s10064-008-0152-3

26. Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Psakhie S.G. Fizicheskaya mezomekhanika: dostizheniia za dva desiatiletiia razvitiia, problemy i perspektivy [Physical Mesomechanics: achievements over two decades of development, problems and prospects]. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, 2004, vol. 7. Special issue 1, pp. I-25-I40.

27. Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Egorushkin V.E. Foundations of physical mesomechanics of structurally inhomogeneous media, *Mech. Solids*, 2010, vol. 45(4), pp. 501-518. doi: 10.3103/S0025654410040023

28. Sobolev S.V., Petrunin A., Garfunkel Z., Babeyko A.Y. Thermo-mechanical model of the Dead Sea Transform, *Earth and Planet. Sci. Let.*, 2005, vol. 238, pp. 78-95. doi:10.1016/j.epsl.2005.06.058

29. Gerya T.V., Yuen D.A. Robust characteristics method for modelling multiphase visco-elasto-plastic thermo-mechanical problems, *Phys. Earth and Planet. Interiors*, 2007, vol. 163, pp. 83-105. doi:10.1016/j.pepi.2007.04.015

30. Oparin V.N., Annin B.D., Chuguy Yu.V., etc. Metody i izmeritel'nye pribory dlia modelirovaniia i naturnykh issledovaniia nelineinykh deformatsionno-volnovykh protsessov v blochnykh massivakh gornykh porod [Methods and measuring equipment for modeling and natural studies of nonlinear deformation-wave processes in a block-structure rock massifs]. Novosibirsk. Sibirskoe otdelenie RAN, 2007. 320 p.

31. Sadovsky M.A. O estestvennoi kuskovatosti gornykh porod [On the natural block-structure of rocks]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1979, vol. 247, no. 4, pp. 829-831.

32. Mas D., Chemenda A.I. Dilatancy factor constrained from the experimental data for rocks and rock-type material, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2014, vol. 67, pp. 136-144. doi: 10.1016/j.ijrmmms.2013.12.014.

33. Rebetsky Yu.L. Dilatansii, porovoe davlenie fluida i novye dannye o prochnosti gornykh massivov v estestvennom zaleganii [Dilatancy, pore fluid pressure, and new data on the strength of rock massifs in natural stratification]. *Fluid i Geodinamika*. Moscow: Nauka, 2006, pp. 120-146.

34. Onasch C.M., Farver J.R., Dunne W.M. The role of dilation and cementation in the formation of cataclasite in low temperature deformation of well cemented quartz-rich rocks, *J. Struct. Geol.*, 2010, vol. 32(12), pp. 1912-1922. doi: 10.1016/j.jsg.2010.04.013.

35. Rebetsky Yu.L. Tektonicheskie napriazheniia i prochnost' prirodnykh massivov [Tectonic stress and strength of natural massifs]. Moscow: Akademkniga, 2007. 406 p.

36. Rebetsky Yu.L., Marinin A.V., Kuchai O.A. Stress state and deformation of the Earth's crust in the altai-sayan mountain region, *Russ. Geol. Geophys.*, 2013, vol. 54(2), pp. 206-222. doi: 10.1016/j.rgg.2013.01.011

37. Schmitt D.R., Currie C.A., Zhang L. Crustal stress determination from boreholes and rock cores: Fundamental principles, *Tectonophysics*, 2012, vol. 580, pp. 1-26. doi: 10.1016/j.tecto.2012.08.029.

38. Zang A., Stephansson O. Stress Field of the Earth's Crust. London: Springer, 2010. 322 p.

Об авторах

Астафуров Сергей Владимирович (Томск, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории компьютерного конструирования материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН (634055, Томск, Академический пр., 2/4); научный сотрудник лаборатории многоуровневого динамического анализа материалов и конструкций Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Томск, пр. Ленина, 36, e-mail: svastafurov@gmail.com).

Шилько Евгений Викторович (Томск, Россия) – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории компьютерного конструирования материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН (634055, Томск, Академический

пр., 2/4); профессор кафедры физики металлов Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Томск, пр. Ленина, 36, e-mail: shilko@ispms.tsc.ru).

Псахье Сергей Григорьевич (Томск, Россия) – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института физики прочности и материаловедения СО РАН (634055, Томск, Академический пр., 2/4, e-mail: sp@ms.tsc.ru).

About the authors

Sergey V. Astafurov (Tomsk, Russian Federation) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Scientific Associate of Laboratory of Computer-Aided Design of Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science SB, RAS (2/4, Akademicheskii av., 634055, Tomsk, Russian Federation, e-mail: svastafurov@gmail.com), Scientific Associate of Laboratory of Multiscale Dynamical Analysis of Materials and Constructions, National Research Tomsk State University (36, Lenina av., 634050, Tomsk, Russian Federation,).

Evgeny V. Shilko (Tomsk, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of Laboratory of Computer-Aided Design of Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science SB, RAS (2/4, Akademicheskii av., 634055, Tomsk, Russian Federation, e-mail: shilko@ispms.tsc.ru), Professor of Physics of Metals Department of National Research Tomsk State University (36, Lenina av., 634050, Tomsk, Russian Federation,).

Sergey G. Psakhie (Tomsk, Russian Federation) – Corresponding Member of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of Institute of Strength Physics and Materials Science SB, RAS (2/4, Akademicheskii av., 634055, Tomsk, Russian Federation, e-mail: shilko@ispms.tsc.ru).

Получено 29.04.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Астафуров С.В., Шилько Е.В., Псахье С.Г. Исследование влияния параметров напряженного состояния фрагментов разломных зон на особенности их механического отклика при сдвиговом деформировании // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 2. – С. 76–101.

Please cite this article in English as:

Astafurov S.V., Shilko E.V., Psakhie S.G. Investigation of influence of stress state parameters of fault zones on peculiarities of their mechanical response under shear loading. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 2. P. 76-101.