

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

И.В. Батухтин, А.А. Остапчук, Д.В. Павлов

В серии лабораторных экспериментов в постановке «слайдер»-модели исследовалась возможность изменения режима деформирования модельной трещины, заполненной многокомпонентным гранулированным материалом. Показано, что основным параметром, определяющим закономерности процесса разупрочнения контакта, является структура заполнителя трещины. Обнаружен критический переход от динамики «медленных» событий к «быстрым». Данный переход происходит при определенном изменении структуры заполнителя и сопровождается изменением закономерностей излучения накопленной упругой энергии.

Введение

Исследование возможности изменения режима деформирования определенного участка разломной зоны является чрезвычайно актуальной задачей, в силу приуроченности землетрясений к данным нарушениям сплошности [Кочарян и др., 2010]. Для того, чтобы продвинуться в решении задачи контроля деформационного режима, необходимо, в первую очередь, изучить закономерности деформирования разломных зон. Модели процессов зарождения и эволюции динамических перемещений по границам структурных блоков могут быть развиты на основе лабораторных экспериментов, в которых исследуются закономерности деформирования трещины, заполненной гранулированным материалом [Кочарян и др., 2013]. При этом важным является тот факт, что состав и структура центральной части соседних участков разломных зон могут существенно различаться [Bradbury et al., 2014]. В процессе деформирования механические свойства гранулированных сред определяются закономерностями формирования самоорганизующихся конгломератов нагружен-

ных частиц. В процессе сдвига данные структуры испытывают повторяющиеся циклы формирования, нагружения и разрушения.

Ранее проводимые лабораторные и численные эксперименты были посвящены изучению закономерностей деформирования трещин, заполненных 1- или 2-х компонентными средами. В данных работах исследовалось влияние многих факторов на параметры режима деформирования. В работе [Eber, 2004] при численном моделировании выявлена зависимость «макроскопического» коэффициента трения, используемого при описании поведения ансамбля частиц, от «микроскопического» коэффициента трения контакта отдельных гранул. В численных расчетах [Morgan, Boettcher, 1999] установлено, что параметром, определяющим при нагружении поведение ансамбля сферических частиц, является количество контактирующих между собой частиц. При малых, так называемых числах согласования Z , наблюдается сильная локализация напряжений и прерывистый режим деформирования, при больших Z наблюдается рассеянная локализация напряжений и стабильный режим деформирования. Лабораторные эксперименты [Mair et al., 2002; Кочарян и др., 2013] показали, что увеличение доли угловатых частиц приводит к увеличению числа Z и трансформации прерывистого скольжения в стабильное. Не меньшее влияние на режим деформирования оказывает наличие флюида и его вязкость [Reber et al., 2014; Кочарян, Остапчук, 2015]. Например, увлажнение кварцевого песка жидкостью малой вязкости на несколько десятых долей процента приводит к переходу от стабильного скольжения к прерывистому, причем, угол внутреннего трения заполнителя практически не изменяется. Изменение вязкости увлажняющего флюида до 1 Па·с приводит к постепенному росту величины сброшенных напряжений при увеличении вязкости флюида; дальнейшее незначительное увеличение вязкости флюида (до 2–3 Па·с) приводит к уменьшению величины сброшенных напряжений в 5 раз.

В настоящей статье мы хотим акцентировать внимание на деформировании трещины, заполненной трехкомпонентной гранулированной средой, и сравнить полученные результаты с двухкомпонентным случаем.

Методика проведения экспериментов и полученные результаты

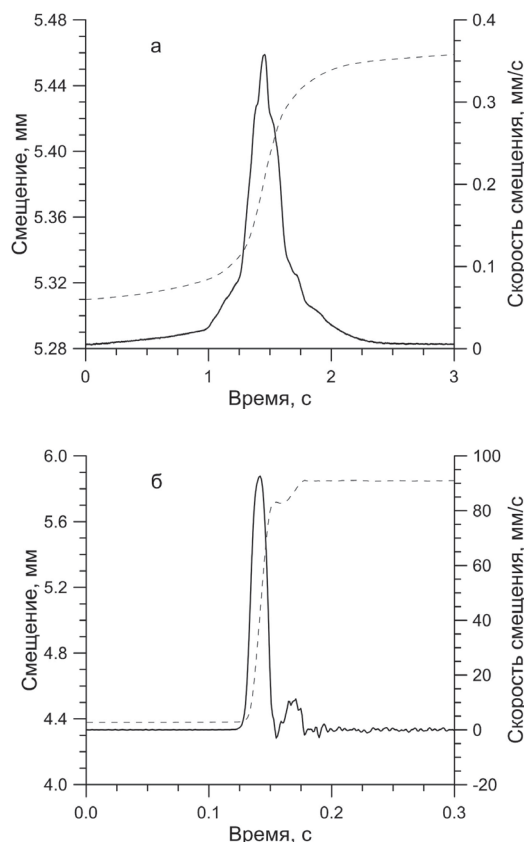
Эксперименты проводились в классической постановке «слайдер»-модели, в которой верхний блок под действием приложенного сдвигового усилия скользит по поверхности раздела. Подробно установка описана в [Павлов и др., 2013]. В ходе экспериментов нормальное напряжение, создаваемое на межблоковом контакте, составляло 50 кПа. Сдвиговое усилие, приводящее к относительному смещению берегов модельной трещины, прикладывалось через пружинный элемент с жесткостью $K = 40$ Н/мм и скоростью $V_c = 20$ мкм/с.

Контакт между шероховатыми поверхностями блоков заполнялся слоем гранулированного материала толщиной 3 мм. В качестве компонент заполнителя использовались кварцевый песок с фракцией 0,16–0,32 мм, хлорид натрия 0,16–0,32 мм (далее «соль») и пиррофиллит 0,05–0,16 мм. Данные гранулированные материалы существенно различаются по своим внутренним свойствам. Гранулы соли характеризуются сильным межгранулярным взаимодействием вследствие сильных ионных связей молекулы NaCl. В свою очередь, кварцевый песок и пиррофиллит характеризуются слабым межгранулярным взаимодействием; а для пиррофиллита, более того, характерна существенная анизотропия свойств по разным направлениям плоскостей межгранулярного взаимодействия.

Рис. 1. Примеры деформационных событий различного типа.

Линии: пунктирная – зависимость изменения смещения блока со временем, сплошная – зависимость изменения скорости смещения блока от времени.

а – «медленное» динамическое событие; заполнитель – смесь соли и пиррофиллита в соотношении 1:1; б – «быстрый» динамический срыв; заполнитель – смесь соли и кварцевого песка в соотношении 3:1



В ходе экспериментов удалось получить широкий спектр режимов деформирования от стабильного до прерывистого скольжений. Использование заполнителей с узкой шириной распределения гранул по размерам [Кузнецов, 1977] позволило в процессе деформирования реализовывать квазирегулярно повторяющиеся динамические события с хорошей повторяемостью параметров при повторных циклах нагружения. К динамическим событиям относятся акты относительного смещения блоков с максимальной скоростью смещения более 20 мкм/с. Можно выделить два типа динамических событий: со скоростью менее 2 мм/с – «медленные» динамические события, со скоростью более 2 мм/с – «быстрые» динамические срывы. Примеры таких событий показаны на рис. 1.

Различие внутренних свойств используемых материалов приводит к существенному изменению параметров режимов деформирования. Например, при деформировании трещины, заполненной сухим кварцевым песком, наблюдается условно стабильное скольжение с максимальной скоростью смещения (V_m) не более 40 мкм/с; в то же время использование в качестве заполнителя соли, характеризующейся сильным межгранулярным взаимодействием, способствует формированию «быстрых» динамических срывов с $V_m = 120$ мм/с.

Используя в качестве заполнителя трещины смесь кварцевого песка и соли, взятых в разных долях, нам удалось отследить постепенный переход от стабильного скольжения к прерывистому (рис. 2, а). На начальном этапе при концентрации частиц соли ν от 0 до 45% максимальная скорость смещения V_m изменяется относи-

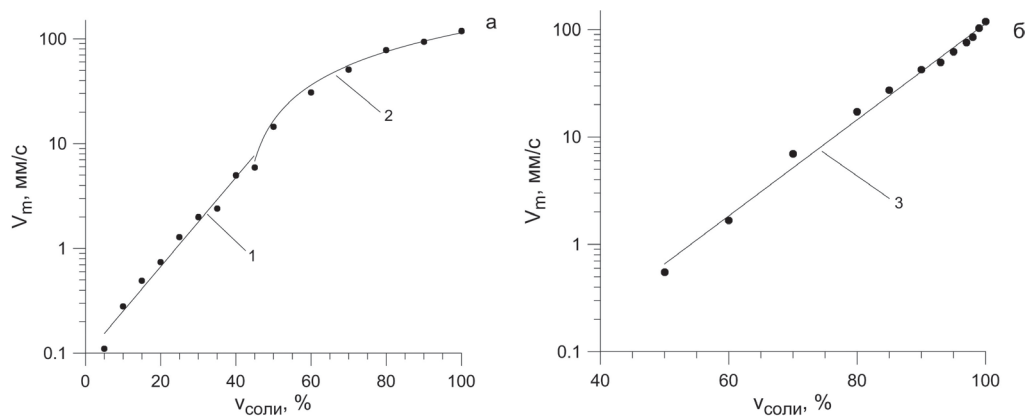


Рис. 2. Зависимости максимальной скорости смещения блока V_m от процентного содержания гранул соли v в заполнителе трещины: а – заполнитель, состоящий из кварцевого песка и соли, б – заполнитель, состоящий из пиррофиллита и соли.
Линии: 1 – зависимость $V_m = 0.1e^{0.1v_{\text{соли}}}$, 2 – зависимость $V_m = 2.1v_{\text{соли}} - 89.2$, 3 – зависимость $V_m = 4 \cdot 10^{-3}e^{0.1v_{\text{соли}}}$

тельно медленно и может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией: $V_m = 0.09e^{0.1v}$. Дальнейшее увеличение количества гранул соли приводит к быстрому линейному изменению максимальной скорости: $V_m = 2.14v$.

При деформировании трещины, заполненной смесью соли и пиррофиллита, картина изменения параметров динамических событий существенно иная. Так, увеличение доли гранул соли вплоть до 40% не приводит к изменению режима деформирования трещины: наблюдается стабильное скольжение с постоянной скоростью 20 мкм/с. Дальнейшее увеличение количества соли приводит к радикальному изменению – наблюдается быстрый экспоненциальный (а не линейный) рост V_m , что, вероятно, обусловлено анизотропией свойств пиррофиллита.

Использование в качестве заполнителя трещины 3-х компонентных сред позволяет оценить влияние наличия отдельных компонент на процесс высвобождения накопленной энергии деформации. На рис. 3 представлена область возможных (ре-

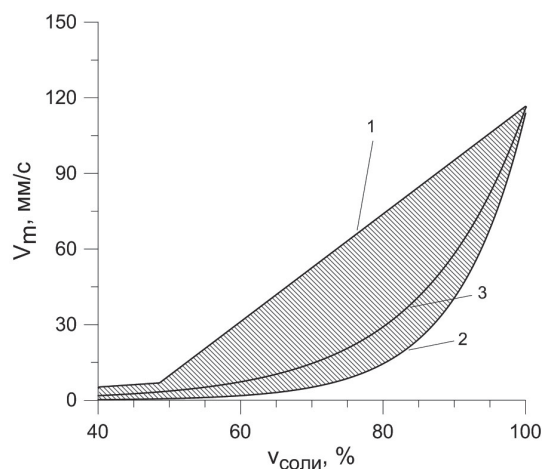


Рис. 3. Изменение пределов вариации V_m при изменении структуры заполнителя трещины.

Линии: 1 – соответствует событиям, реализованным при деформировании трещины, заполненной смесью кварцевого песка и соли, 2 – смесь пиррофиллита и соли, 3 – смесь кварцевого песка, пиррофиллита и соли, песок и пиррофиллит взяты в соотношении 2:1

ализованных) значений V_m в зависимости от процентного содержания соли («главной» компоненты). Результаты экспериментов показали, что для используемых компонент наблюдается нелинейное увеличение скорости смещения с уменьшением относительного содержания пиррофиллита. Так, например, при относительном содержании соли 80% изменение содержания пиррофиллита от 20 до 7% (уменьшение в 3 раза) приводит к увеличению скорости V_m с 17 до 33 мм/с (увеличение в 2,0 раза), а уменьшение относительного содержания с 7 до 4% (в 1,75 раза) – увеличивает V_m в 2,5 раза до 82 мм/с.

В процессе разупрочнения межблокового контакта накопленная упругая энергия деформации переходит не только в энергию упругих колебаний, но также тратится на разрушение силовых мезоструктур и на работу против сил трения, действующих на подвижный блок в плоскости разлома. В этой связи важным «энергетическим» параметром, характеризующим динамические события, является приведенная излученная энергия $e = E_s / M_0$ – отношение величины излученной энергии к сейсмическому моменту. Данная величина характеризует излучательную эффективность источника, другими словами, «КПД» источника.

Анализ наблюдательного материала обнаруживает существенные различия в доле энергии деформирования, затраченной на сейсмическое излучение, для деформационных событий различного типа. Так, если для «нормальных» землетрясений $e \sim 10^{-6} - 10^{-5}$, то для медленных землетрясений эта величина составляет $10^{-8} - 10^{-7}$ [например, Kocharyan et al., 2014]. В этой связи имеет смысл исследовать закономерности изменения приведенной энергии в лабораторных экспериментах.

В лабораторных экспериментах излученную в виде упругих колебаний энергию удобно оценить в координатной плоскости перемещение-напряжение (рис. 4). Излученная энергия E_s пропорциональна площади, заключенной между кривой изменения фрикционного сопротивления сдвигу контакта и линией разгрузки массива (в наших экспериментах – снижение усилия пружины). При этом лабораторным аналогом приведенной излученной энергией является величина $e_{lab} = E_s / K \cdot U \cdot l$, где U и l – амплитуда смещения во время срыва и длина блока соответственно.

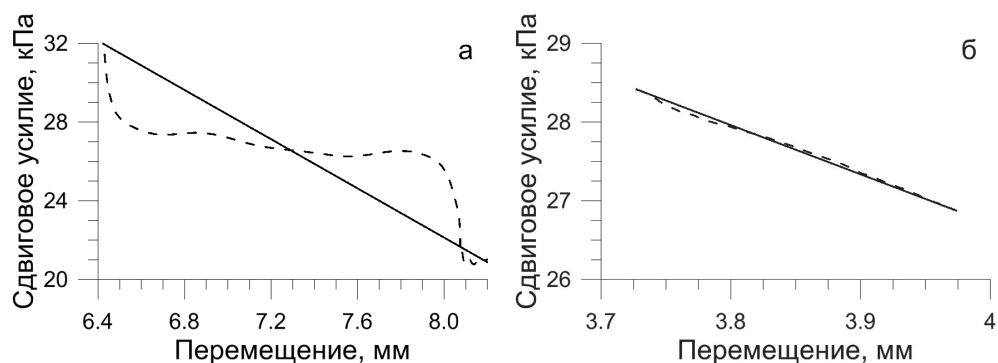


Рис. 4. Примеры диаграмм сдвиговое усилие-перемещение, построенные по результатам измерений.

Линии: сплошная – усилие пружины, пунктир – фрикционное сопротивление контакта.

а – «быстрый» динамический срыв; соотношение песка, пиррофиллита и соли в заполнителе 2:1:30;

б – «медленное» динамическое событие; соотношение песка, пиррофиллита и соли в заполнителе 2:1:2

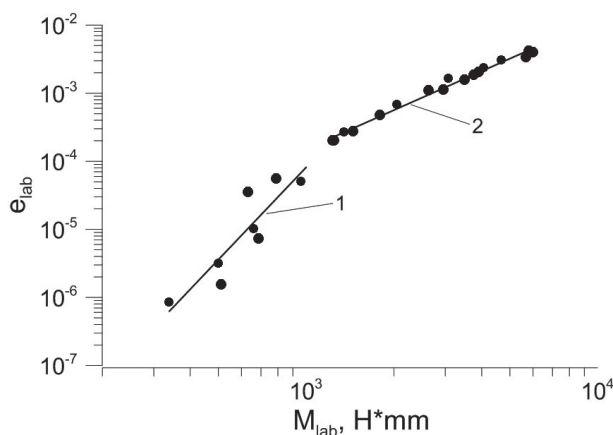


Рис. 5. Зависимость величины приведённой излученной энергии e от величины условного сейсмического момента.

Линии: 1 – зависимость $e_{\text{lab}} = 2,5 \cdot 10^{-18} M_{\text{lab}}^{4,5}$, 2 – зависимость $e_{\text{lab}} = 3 \cdot 10^{-10} M_{\text{lab}}^{1,9}$

На рис. 5 представлена зависимость величины приведенной излученной энергии e_{lab} от «сейсмического» момента M_{lab} . На графике $e_{\text{lab}}(M_{\text{lab}})$ можно выделить две области, характеризующиеся различными степенными зависимостями $e_{\text{lab}}(M_{\text{lab}})$. Первая область – область «медленных» событий. Данные события характеризуются достаточно высокой продолжительностью от 0,1 до 0,5 с и низкой величиной «ко-сейсмического» смещения менее 0,35 мм, которая, вероятно, обуславливается «характерным» размером элементов межблокового контакта – размер гранул соли. Более того, «медленные события» реализуется только при деформировании трещины с заполнителем, содержащем менее 40–50% гранул соли. Наилучшей аппроксимацией зависимости изменения величины приведенной излученной энергии для «медленных» событий является функция:

$$e_{\text{lab}} = 2,5 \cdot 10^{-18} M_{\text{lab}}^{4,5} \quad (1)$$

В свою очередь, область «быстрых» динамических срывов характеризуется низкой продолжительностью событий от 0,02 до 0,08 с, большими амплитудами смещения (до 2 мм) и содержанием гранул соли в заполнителе трещины более 50%. В данной области наилучшее приближение зависимости изменения e дает функция:

$$e_{\text{lab}} = 3 \cdot 10^{-10} M_{\text{lab}}^{1,9} \quad (2)$$

Обсуждение и выводы

Выполненные лабораторные эксперименты позволили рассмотреть особенности деформационного процесса трещины, заполненной 3-х компонентной средой. Незначительное изменение состава заполнителя трещины может привести не только к существенному изменению параметров режима деформирования, но и изменить сам режим. Установлено, что существует критический переход от «медленных» событий к «быстрым», заключающийся в резком увеличении амплитуды и скорости смещения блока при достижении определённого количества гранул «главной» компоненты. Более того, переход от «медленных» событий к «быстрым» сопровождается изменением закономерности излучения накопленной упругой энергии деформации. Вероятно, данный переход обусловлен изменением механики процесса.

Понятно, что простейшая «слайдер-модель» не в состоянии воспроизвести все процессы, происходящие в реальном горном массиве, однако данные лабораторных экспериментов будут полезны при построении геомеханических моделей природных объектов. Полученные результаты показали, что основным параметром, определяющим формирование различных режимов деформирования, является состав и внутренние свойства материала-заполнителя нарушения сплошности. И, если изменение напряженно-деформированного состояния может стать триггером динамического события, то закономерности высвобождения накопленной упругой энергии определяются именно свойствами материала-заполнителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №13-05-00780, НШ-3345.2014.5).

Литература

Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А. Сейсмический портрет разломной зоны. Что может дать анализ тонкой структуры пространственного расположения очагов слабых землетрясений? // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 4. С. 419–440.

Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // Физическая мезомеханика. 165. (2013), с. 5–15.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Влияние вязкости тонких пленок флюида на закономерности фрикционного взаимодействия блоков горной породы // ДАН. 2015. Т. 463. 33. С. 343–346.

Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела // Новосибирск. Наука. 1977.

Павлов Д.В., Марков В.К., Свинцов И.С. Экспериментальное исследование изменения жёсткости контакта при его сдвиговом деформировании // Динамические процессы в геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН. Вып. 4. М.: ГЕОС. 2013. С. 110–117.

Bradbury K., Dacis C., Shervais J., Janecke S., Evans J. Composition, Alteration, and Texture of Fault-Related Rocks from Safod Core and Surface. Outcrop Analogs: Evidence for Deformation Processes and Fluid-Rock Interactions // Pure and Applied Geophysics. doi: 10.1007/s00024-014-0896-6.

Morgan J., Boettcher M. Numerical simulations of granular shear zones using the distinct element method // Journal Geophysical Researches. 1999. V. 104. № B2. P. 2703–2719.

Eber W. Friction measurements in granular media // PRE. V. 69. 2004. 021303.

Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Novikov V.A., Ostapchuk A.A. 2014. Slow slip events: parameters, conditions of occurrence, and future research prospects // Geodynamics & Tectonophysics 5 (4). doi:10.5800/GT-2014-5-4-0160. P. 863–891.

Mair K., Frye K.M., Marone C. Influence of grain characteristics on the friction of granular shear zones. // Journal Geophysical Researches. 2002. V. 107. № 10. P. 2219.

Reber J., Hayman N., Lavie L. Stick-slip and creep behavior in lubricated granular material: Insights into the brittle-ductile transition // Geophysical Research Letters. doi: 10.1002/2014GL059832. P. 3471–3477.