

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТИ СВОЙСТВ МЕЖБЛОКОВОГО КОНТАКТА НА РЕЖИМ ЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В.С. Мартынов, А.А. Остапчук, В.К. Марков

В серии лабораторных экспериментов в постановке «слайдер»-модели исследовалась возможность изменения режима деформирования модельной трещины, заполненной многокомпонентным гранулированным материалом. Изучены закономерности формирования различных мод деформирования нарушения сплошности, обладающего пространственной гетерогенностью свойств интерфейса. Показана принципиальная возможность изменения режима деформирования при инъекции флюида в малую область межблокового контакта.

Введение

Основной проблемой изучения динамики массивов горных пород является сложность учета всех процессов, протекающих в зонах структурной нарушенности – разломах и крупных трещинах. Долгое время предполагалось, что накопившиеся избыточные напряжения в массиве снимаются либо посредством землетрясений – при «мгновенном» срыве заблокированных участком разломов, либо через непрерывное асейсмическое скольжение. Развитие наблюдательных технологий в науках о Земле показало, что спектр динамических событий, приуроченных к разломам, существенно шире: были открыты и классифицированы такие явления, как низкочастотные и очень низкочастотные землетрясения, события медленного скольжения [Peng and Gomberg, 2010; Кочарян и др., 20146]. Открытие новых явлений в значительной степени изменяет наше понимание того, как реализуется энергия, накопленная в земной коре, и заставляет пересмотреть физические принципы, лежащие в основе геомеханических процессов, протекающих в зонах структурной нарушенности.

В настоящее время, несмотря на большое количество научных публикаций, закономерности пространственных и временных вариаций деформационных режимов на различных участках разломов остаются плохо понятыми, а закономерности трансформации одного режима деформирования в другой – практически неисследованными. Установление закономерностей трансформации одной моды деформирования в другую может быть использовано при постановке и проведении фундаментальных и прикладных работ, направленных на разработку инженерных методов снижения ущерба от природных и техногенных катастрофических событий.

Одним из методов, который может позволить продвинуться в понимании закономерностей деформирования нарушений сплошности массивов горных пород, являются лабораторные эксперименты, в которых исследуются закономерности деформирования модельных разломов, заполненных гранулированным материалом.

Ранее проводились исследования закономерностей деформирования только для трещины, заполнитель которой пространственно однороден по составу. Ис-

следовано влияние размера и формы гранул заполнителя [Anthony, Marone, 2005], наличия флюида и его вязкости [Кочарян, Остапчук, 2015], наличия фракций слоистых силикатов [Saito et al., 2013; Кочарян, Новиков, 2015]. Некоторые авторы проводили исследования трансформации режима скольжения при изменении состава материала-заполнителя [Oohashi et al., 2013; Кочарян и др., 2014a].

Структура и вещественный состав центральной зоны разлома, которые определяют деформационные свойства разлома, могут претерпевать весьма существенные изменения на небольших расстояниях. В этой связи важными вопросами являются исследование режимов деформирования нарушений сплошности, характеризующихся пространственной гетерогенностью свойств, а также выявление возможности изменения режима при воздействии на некоторую локальную область. Изучению данных вопросов и посвящена данная статья.

Методика проведения экспериментов и полученные результаты

Экспериментальная установка представляла собой классическую трибологическую установку в постановке «слайдер» - модели, в которой блок под действием сдвигового усилия скользит по поверхности раздела. Подробно установка описана в [Павлов и др., 2013]. В наших экспериментах гранитный блок размером $8 \times 8 \times 3$ см³ располагался на гранитном основании. Контакт между блоками заполнялся тонким (примерно 2 мм) слоем гранулированного заполнителя. Поверхности блоков были шероховатыми с размером неоднородности ~0,5–0,8 мм.

Во время экспериментов нормальная нагрузка составляла $N = 45$ кг, что соответствовало нормальному напряжению $\sigma_n = 69$ кПа. В качестве заполнителя модельной трещины использовались различные гранулированные материалы: кварцевый песок, поваренная соль, сухая глина, крахмал. С помощью набора сит выделялась определенная фракция материала. В серии экспериментов часть площади межблокового контакта увлажнялась водой или глицерином. Были проведены 2 серии экспериментов по деформированию модельной трещины, заполнитель которой состоял из соли и песка. При этом в первой серии межблоковый интерфейс заполнялся равномерно перемешанной смесью соли и песка (постановка «смесь»), во второй – контакт содержал отдельные зоны соли и песка (постановка «зона»), как показано на рис. 1. В ходе серии изменялось процентное содержание соли и песка в зоне межблокового контакта либо путем изменения массового содержания соли в постановке «смесь», либо путем увеличения площади зоны соли в постановке «зона».

Изменение вещественного состава интерфейса приводит к кардинальному изменению параметров динамических событий: максимальной скорости скольжения, величины сброса сдвигового усилия, продолжительности. Можно видеть, что для интерфейса, состоящего из однородной смеси песка и соли, увеличение доли соли приводит к линейному изменению значений параметров событий, в то же время для интерфейса с выраженной гетерогенностью свойств характерно нелинейное изменение параметров. В случае «зона» при доле площади соли менее 40% параметры практически не меняются, но при увеличении более 40% наблюдается резкий нелинейный рост, причем изменение скорости полностью согласуется с изменением силы. Аналогичные закономерности изменения параметров режима были получены в работе [Остапчук и др., 2015]. Проведенный анализ за-

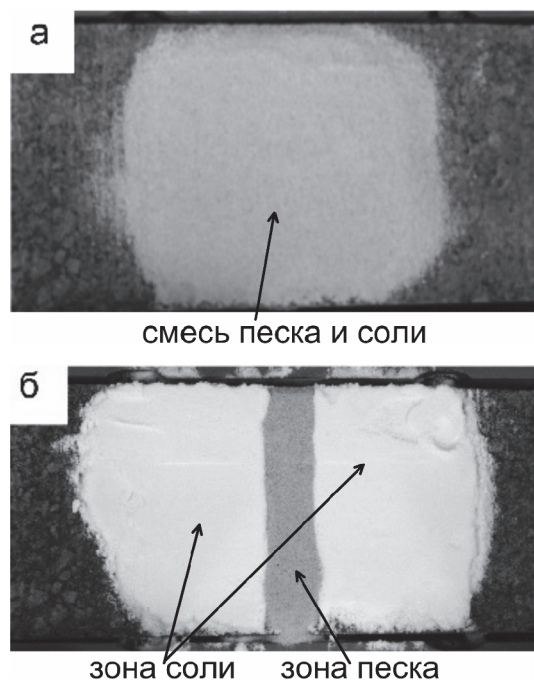


Рис. 1. Межблоковые контакты с пространственно однородной (а) и пространственно неоднородной (б) структурами

кономерностей изменения параметров режима показывает, что величина относительного изменения скорости в среднем в 3,2 раза превосходит относительное изменение площади зоны соли (зоны, для которой характерно прерывистое скольжение).

Таким образом, для контакта, характеризующегося пространственной гетерогенностью свойств интерфейса, наблюдается нелинейное резкое изменение параметров событий при изменении площади зоны межблокового контакта, для которой характерно прерывистое скольжение.

Для выявления закономерностей изменения параметров режима деформирования при увлажнении локальной области контакта была проведена следующая серия экспериментов. На блоке тefлоновыми перегородками выделялось три зоны. Центральная зона (от 0,5 до 2 см) заполнялась одним гранулированным материалом, две зоны по краям заполнялись другим гранулированным материалом. Материал центральной области выбирался таким образом, чтобы увлажнение существенно изменяло его деформационные свойства [Кочарян, Остапчук, 2015]. Эксперименты выполнялись парами. В первом эксперименте центральная часть оставалась сухой, во втором – смачивалась флюидом (~10% по массе). Тefлоновые перегородки предотвращали попадание флюида в краевые зоны.

В одной из серий экспериментов материалы выбирались таким образом, чтобы центральная зона изменяла характерный режим с прерывистого на стабильное, в то время как краевые области характеризовались по-прежнему – прерывистым скольжением. В качестве заполнителя центральной области была выбрана

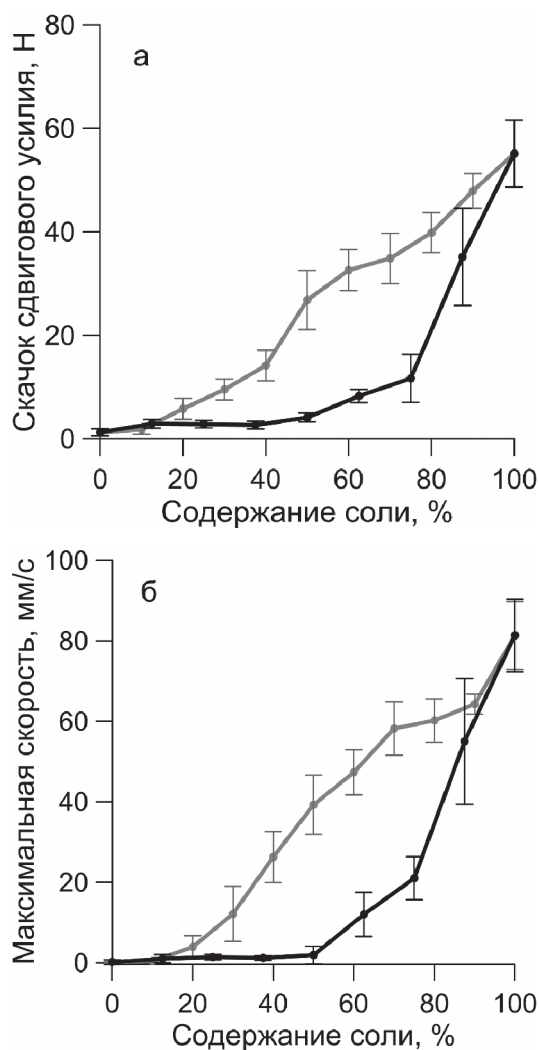


Рис. 2. Зависимости скачка сдвигового усилия (а) и максимальной скорости (б) от процентного содержания соли.

Серая линия соответствует постановке «смесь», черная – постановке «зона». В экспериментах «зона», величина «содержание соли» соответствует площади зоны контакта, заполненной солью

смесь кварцевого песка (80%) и крахмала (20%), краевых зон – увлажненный глицерином кварцевый песок. Стоит заметить, что максимальные сдвиговые усилия при деформировании контакта, заполненного увлажненным песком и смесью песка с крахмалом, примерно совпадают.

Выполненные эксперименты показали, что увлажнение центральной зоны смеси песка и крахмала приводит к кардинальному изменению параметров реализуемых событий (рис. 3). Так, увлажнение центральной зоны, составляющей всего 6,5% площади контакта, приводило к уменьшению максимальной скорости в 6,5 раз, а скачка сдвигового усилия – в 7 раз. Если же площадь центральной зо-

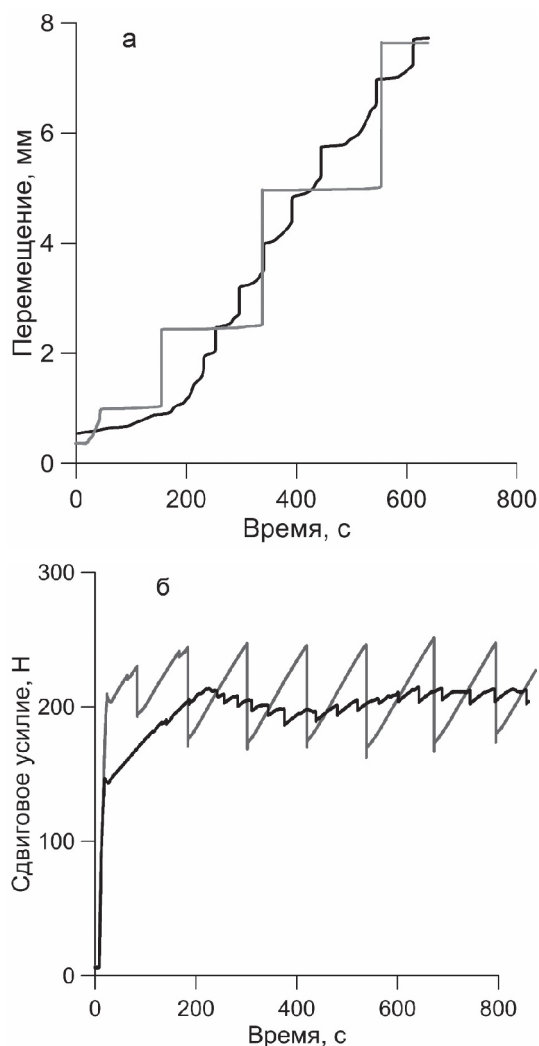


Рис. 3. Увлажнение локальной области межблокового контакта, состоящего из зон увлажненного глицирином песка и смеси песка (80%) с крахмалом (20%).

Относительная площадь центральной зоны – 6,5%.

Зависимости: перемещения от времени (а), силы сопротивления от времени (б).

Линии: серая – сухой наполнитель центральной зоны, черная – увлажненный наполнитель центральной зоны

ны составляла 12%, то максимальная скорость уменьшалась в 183 раза, а скачок сдвигового усилия – в 47 раз: режим становился практически стабильным.

Полученный эффект существенного изменения параметров режима деформирования при увлажнении центральной зоны, состоящей из смеси песка (80%) и крахмала (20%), был использован для изменения параметров режима уже в процессе сдвигового деформирования путем инъекции флюида. Так, после установления режима регулярного прерывистого скольжения, в тот момент, когда уровень сдвигового усилия составлял 70% от максимального значения, была осуще-

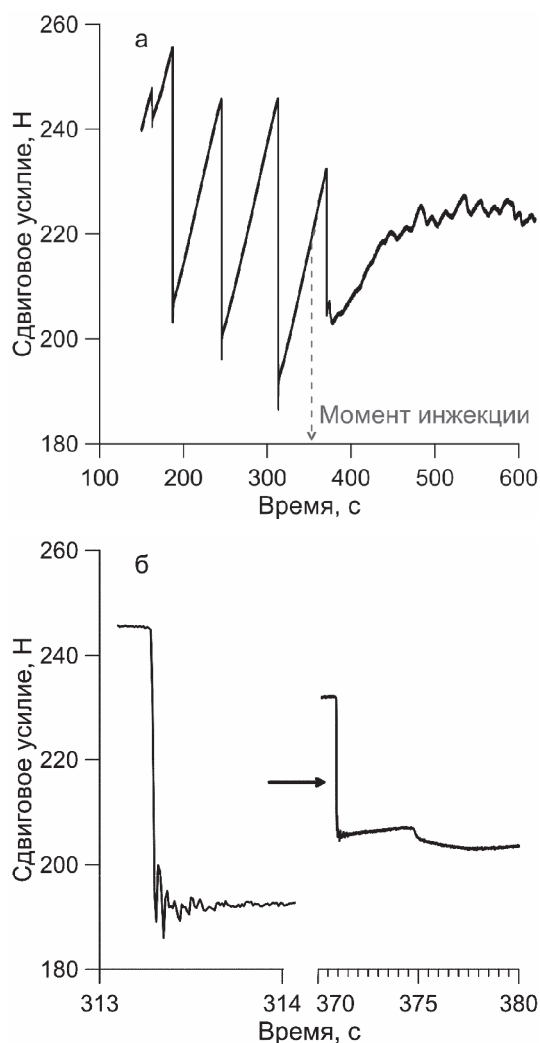


Рис. 4. Зависимость сдвигового усилия от времени при инъекции флюида в центральную зону контакта (а); сравнение двух последовательных актов разупрочнения до и после инъекции (б)

ствлена инъекция воды в центральную часть зоны контакта. В результате инъекции произошло радикальное изменение режима (рис. 4). Можно видеть, что относительное изменение амплитуды скачка сдвигового усилия и продолжительности стадии разгрузки для двух последовательных событий (до инъекции и сразу после нее) составляет соответственно – 50 и 130%.

Заключение

В ходе выполненных исследований выявлено сильное влияние пространственной гетерогенности свойств межблокового контакта на режим его деформи-

рования. Незначительное изменение свойств локальной области может привести к существенному изменению параметров режима деформирования. В природе подобное изменение свойств может происходить в зонах структурной нарушенности [Frank et al., 2015; Кочарян, Остапчук, 2015]. Это, в свою очередь, может объяснить пространственно-временные вариации деформационного режима локального участка [Villegas-Lanza et al., 2015].

Результат, представленный на рис. 4, показывает принципиальную возможность изменения режима деформирования нарушения сплошности путем инъекции жидкости. На наш взгляд, в лабораторных экспериментах именно дилатантные свойства водного раствора крахмала позволили при незначительном увлажнении локальной области существенно изменить параметры готовящегося события вследствие изменения реологических свойств.

Задача контролируемого изменения деформационного режима является очень актуальной, например, при разработке месторождений полезных ископаемых, [Schultz et al., 2016]. При этом необходимо отметить одно важное обстоятельство: чтобы перевести нагруженный участок разлома в режим скольжения с низкой интенсивностью излучения сейсмической энергии не обязательно "сбрасывать" накопившиеся избыточные напряжения, как считалось раньше, а достаточно изменить реологические свойства контакта на стадии разгрузки [Адушкин и др., 2016].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-05-00694).

Литература

Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. О параметрах, определяющих долю энергии, излучаемой при динамической разгрузке участка массива горных пород // Доклады академии наук. 2016. Т. 467. № 1. С. 86-90.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Влияние вязкости тонких пленок флюида на закономерности трения при взаимодействии блоков горной породы // Доклады академии наук. 2015. Т. 463. № 1. С. 757-759.

Кочарян Г.Г., Новиков В.А. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 1. Лабораторные эксперименты // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 4. С. 94-104.

Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // Физическая мезомеханика. 2014а. Т. 17. № 2. С. 123-133.

Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А. Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований // Геодинамика и тектонофизика. 2014б. Т. 5. № 4. С. 863-891.

Остапчук А.А., Батухтин И.В., Павлов Д.В. Управление режимом деформирования трещины в лабораторном эксперименте // Динамические процессы в геосферах. Вып. 7: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2015. С. 15-21.

Павлов Д.В., Марков В.К., Свицов 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.

Anthony J.L. and Marone C. Influence of particle characteristics on granular friction // Journal of Geophysical Research. 2005. Vol. 110. Issue B 8.

Frank W.B., Shapiro N.M., Husker A.L. et al. Along-fault pore-pressure evolution during a slow-slip event in Guerrero, Mexico // Earth and Planetary Science Letters. 2015. Vol. 413. P. 135-143.

Oohashi K., Hirose T. and Shimamoto T. Graphite as a lubricating agent in fault zones: An insight from low- to high-velocity friction experiments on a mixed graphite-quartz gouge // *Journal of Geophysical Research*. 2013. Vol. 118. Issue 5. P. 2067-2084.

Peng Z. and Gomberg J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // *Nature Geosciences*. 2010. Vol. 3 (9). P. 599-607.

Saito T., Ujiie K., Tsutsumi A. et al. Geological and frictional aspects of very-low-frequency earthquakes in an accretionary prism // *Journal of Geophysical Research*. 2013. Vol. 40. P. 703-708.

Schultz R.A., Mutlu U., Bere A., Critical issues in subsurface integrity// *Materials of 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. 2016. ARMA 16-037.

Villegas-Lanza J.C., Nocquet J.-M., Rolandone F. et al. A mixed seismic–aseismic stress release episode in the Andean subduction zone // *Nature Geoscience*. 2015. 9(2). P. 150-154.