

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ИЗМЕНЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ МЕЖБЛОКОВОГО КОНТАКТА
ПРИ ЕГО СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ.
ЧАСТЬ II**

Д.В. Павлов, И.В. Батухтин

Приведены результаты измерений сдвиговой жесткости модельной трещины на разных стадиях установившегося прерывистого скольжения. Проведено сравнение квазистатической сдвиговой жесткости контакта с динамической. Показано, что динамическая сдвиговая жесткость трещины снижается с уменьшением скорости её сдвигового деформирования.

Введение

Настоящая статья представляет собой вторую часть работы, выполненной коллективом авторов. Напомним, что в первой части [Павлов, Марков, Свинцов, 2013]

была в деталях рассмотрена экспериментальная установка, подробно изложена методика проведения экспериментов и построения диаграмм динамического нагружения модельной трещины в процессе сдвигового деформирования. Последние были использованы для определения сдвиговой жесткости межблокового контакта на разных стадиях прерывистого скольжения. Было показано, что в ходе регулярного прерывистого скольжения, при приближении к динамическому срыву, жесткость межблоковой границы снижается.

Попытки решить проблему прогноза землетрясений предпринимались практически сразу с момента рождения сейсмологии. Так, в 1911 году Б.Б. Голицын предложил первую Российскую программу исследований, направленную на решение этой проблемы [Голицын, 1960]. В течение нескольких десятилетий велись активные поиски предвестников землетрясений, которые к настоящему моменту не дали полностью удовлетворительного результата.

Новый импульс решению этой задачи придали исследования, направленные на изучение механики процессов, происходящих в очаге землетрясения. Важной вехой здесь можно считать работу [Brace & Byerlee, 1966], в которой в качестве основного механизма неглубоких коровых землетрясений предложено считать прерывистое скольжение (стик-слип) вдоль уже существующих разломов.

В лабораторных экспериментах, направленных на исследование свойств модельных нарушений сплошности в ходе сдвигового деформирования, было замечено, что в ходе установившегося стик-слипа деформационные свойства межблокового контакта меняются регулярным образом. В частности, при приближении к динамическому срыву снижается сдвиговая жесткость контакта (нормальная и сдвиговая жесткость межблокового контакта определяются следующим образом: $k_n = d\sigma/dW_n$, $k_s = d\tau/dW_s$, где σ и τ – нормальные и сдвиговые эффективные напряжения, действующие в окрестности разрыва, а W_n и W_s – относительное нормальное и сдвиговое перемещение его берегов). Это было отмечено при просвечивании контакта поперечными волнами [Chen et al., 1993], при построении диаграммы сдвигового нагружения контакта, полученной с помощью датчиков силы и перемещения [Кочарян, Остапчук, 2011] и при возбуждении сдвиговых колебаний блоков друг относительно друга [Павлов, Марков, Свинцов, 2013]. В недавних работах [Kaproth & Marone, 2013; Kaproth & Marone, 2014; Hedayat, Pyrak-Nolte & Bobet, 2014], когда модельные нарушения сплошности просвечиваются поперечными волнами в процессе сдвигового деформирования, отмечаются аналогичные изменения, предшествующие динамическому срыву в ходе регулярного стик-слипа, причем, если в первых двух работах основное внимание уделяется изменениям скорости распространения Р и S волн, то в последней работе речь идет именно об амплитудных изменениях S волны перед срывом и соответствующих изменениях сдвиговой жесткости модельной трещины. Таким образом, делается вывод о том, что, если подобные изменения свойств межблоковых промежутков происходят и в природе, то сейсмический мониторинг соответствующих участков земной коры может дать ключ к нахождению предвестников землетрясений.

Заметим, однако, что во всех четырех процитированных работах американских геофизиков, связанных с просвечиванием образцов поперечными волнами, исследования ведутся на небольших образцах ультразвуковыми методами. Поэтому результаты носят качественный характер или сводятся к использованию кинематических характеристик волн, что существенно снижает разрешающую способность при диагностике межблоковых промежутков. Таким образом, в лабораторном моделировании сейсмогенных процессов далеко не все вопросы ещё решены.

Особо хотелось бы выделить один из результатов, полученных Г.А. Соболевым [Соболев, 2011].

Им были обработаны записи близкорасположенных к эпицентру землетрясения на о. Суматра 26.12.2004 г. ($3^{\circ}32'$ ю.ш., $95^{\circ}85'$ в.д., $M = 9,2$) станций сети IRIS: СНТ, КМІ, ХАН, СОСО. «Необычным обстоятельством было то, что за 2,5 сут до землетрясения на о. Суматре в южном полушарии случилось другое сильное землетрясение с $M = 7,9$, эпицентр которого с координатами ($49^{\circ}31'$ ю.ш., $161^{\circ}35'$ в.д.) находился к юго-западу от Новой Зеландии (в районе хребта Маккуори). Колебания от этого землетрясения в сотни раз превосходили уровень микросейсм на вышеуказанных станциях, а поверхностные волны с периодами 300–500 с несколько раз обогнули земной шар». После землетрясения на хребте Маккуори на вышеуказанных станциях сети IRIS были зарегистрированы синхронно возникшие периодические колебания с постепенным удлинением преобладающих периодов колебаний от нескольких до десятков минут [Соболев, 2011], а уже после этого произошло землетрясение на о. Суматра.

Можно предположить, что воздействие от землетрясения Маккуори явилось триггером для начала собственных колебаний некоего блока земной коры, причем частота этих колебаний снижалась в течение примерно двух суток с 0,4 до 0,1 Гц, после чего интенсивность этих колебания резко снизилась, а спустя примерно 8 часов произошло землетрясение Суматра. Снижение частоты собственных колебаний блока соответствует снижению жесткости межблокового промежутка, на котором эти колебания происходят.

Перейдем теперь к изложению полученных результатов.

Результаты экспериментов

Целью экспериментов было, во-первых, провести измерения сдвиговой жесткости модельного нарушения сплошности на разных стадиях стик-слипа при разных скоростях сдвиговой деформации. А, во-вторых, сравнить «динамическую» и «квазистатическую» жесткости.

Поясним последнее. Квазистатическая жесткость определялась по диаграмме сдвигового нагружения контакта, построенной по записям датчиков силы и перемещения. Динамическая жесткость определялась по реакции системы на короткий импульс с использованием акселерометров, регистрирующих движение основания и подвижного блока. Дело в том, что значения динамической сдвиговой жесткости, полученные в первой части работы [Павлов, Марков, Свинцов, 2013] варьируются в пределах 25–50 МПа/мм, в то время как максимальное значение квазистатической жесткости, определенное на этой же установке, но в другой серии опытов, составило 0,2 МПа/мм [Кочарян, Остапчук, 2011].

Эксперименты проводились на установке и по методике, подробно рассмотренным в работе [Павлов, Марков, Свинцов, 2013]. В качестве заполнителя модельной трещины также использовался кварцевый песок, фракция 0,3 мм, с добавлением 0,25% глицерина по весу. Толщина модельной трещины также составляла около 2,5 мм. После того, как установка собиралась, сверху прикладывалась нормальная нагрузка $N = 1$ кН. В таком виде установка оставлялась на 1 час. После этого нормальная нагрузка снижалась до 0,3 кН и начинался собственно эксперимент по сдвиговому деформированию.

Во время сдвига верхнего подвижного блока по нижнему неподвижному блоку-основанию по последнему производились удары молотком, которые регистриро-

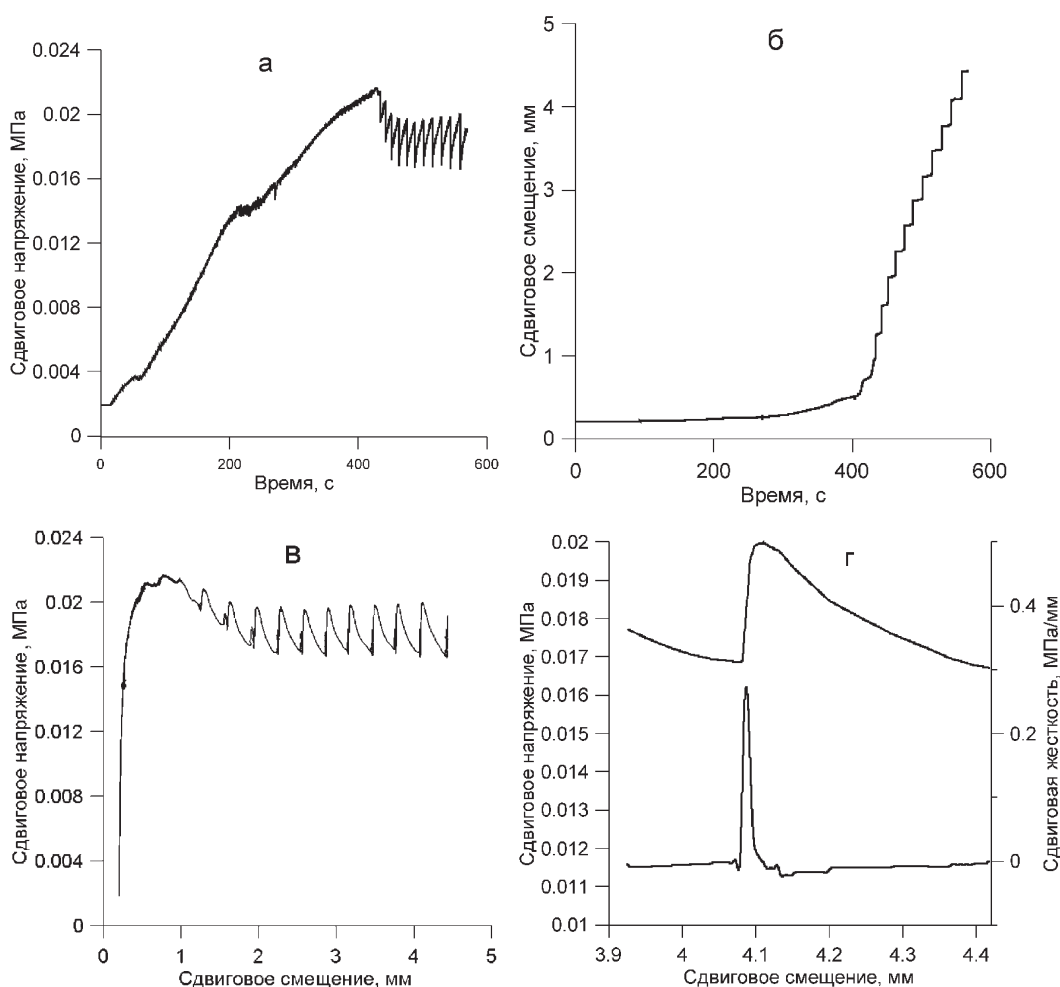


Рис. 1. Построение квазистатической диаграммы сдвигового нагружения модельной трещины: а – запись датчика силы; б – запись датчика перемещения; в – диаграмма «сила-перемещение»; г – вверху: один цикл стик-слипа (последний на рис. 2,в), внизу: соответствующее изменение жесткости в течение этого цикла

вались акселерометрами. Одновременно регистрировались перемещение верхнего блока относительно нижнего и сила, действующая на верхний блок.

По записям акселерометров строились динамические диаграммы нагружения межблокового контакта. Методика построения таких диаграмм и определения динамической жесткости подробно рассмотрена в работе [Павлов, Марков, Свинцов, 2013].

По записям датчиков перемещения и силы строилась квазистатическая диаграмма нагружения контакта (рис. 1). Для определения квазистатической жесткости выбирался один из циклов установившегося стик-слипа. Жесткость контакта определялась по максимуму производной кривой нагружения (нижняя кривая на рис. 1,г).

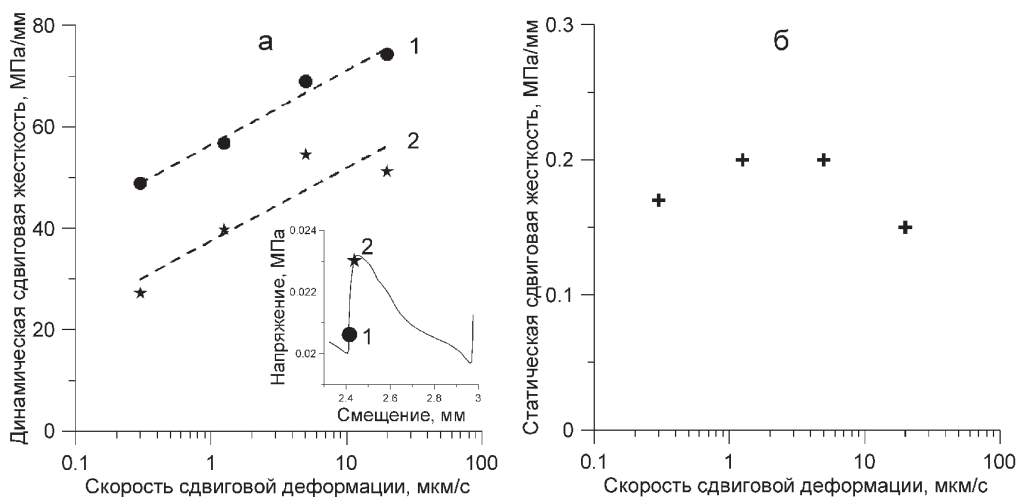


Рис. 2. Зависимость жесткости модельной трещины от скорости сдвиговой деформации: а – динамическая, б – квазистатическая. На врезке рис. 2,а – моменты ударов молотком по неподвижному нижнему блоку: 1 – на начальной стадии цикла стик-слипа, на стадии роста напряжения; 2 – непосредственно перед срывом. Пунктирные линии на рис. 2,а – наилучшие приближения для кривых 1 и 2. Наклон обеих линий соответствует показателю степени $n = 6,3$.

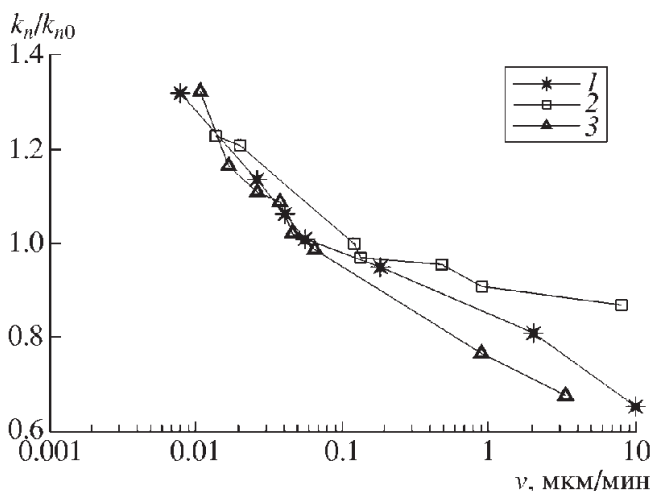
Одной из целью работы было попытаться понять, почему так сильно отличаются квазистатическая и динамическая жесткости контакта (на три порядка по результатам предыдущих измерений). Для этой цели решено было попытаться повлиять на статическую жесткость – «включить» залечивание контакта в процессе сдвиговой деформации, уменьшив скорость деформирования. Редуктор, имевшийся на установке, позволял реализовать четыре скорости сдвиговой деформации: 20, 5, 1.25 и 0.3 мкм/с.

На рис. 2 показаны результаты измерения квазистатической и динамической сдвиговой жесткости для четырех значений скорости деформации. Сразу обратим внимание на то, что динамическая жесткость контакта снижается при приближении к динамическому срыву (разница между кривыми 1 и 2 на рис. 2, а) примерно на 20 МПа/мм – результат аналогичен тому, что был получен в работе [Павлов, Марков, Свинцов, 2013], причем происходит это на всех скоростях деформации. Заметим, однако, что статическая жесткость трещины перед срывом снижается до нуля (рис. 1,г). Кроме того, хорошо видно, что динамическая сдвиговая жесткость снижается с уменьшением скорости сдвиговой деформации. И, наконец, так же как и в предыдущих экспериментах динамическая жесткость превышает статическую примерно на два порядка.

Что касается квазистатической жесткости, то уменьшение скорости сдвигового деформирования не привело к заметному её росту (рис. 2, б). Объяснить это, по-видимому, можно тем, что в наших экспериментах не удалось достичь критической скорости деформации межблокового контакта, при переходе через которую залечивание контакта во время деформации начинает превалировать над его разрушением.

На рис. 3 показана зависимость из работы [Кочарян и др., 2008], в которой сдвиговым испытаниям подвергалась модельная трещина, аналогичная нашей и с тем же заполнителем. Речь там идет об изменениях нормальной жесткости, однако, можно

Рис. 3. Зависимость отношения начальных и конечных жесткостей контактов в зависимости от скорости межблочного перемещения при разных заполнителях трещин и нормированных сжимающих усилиях (N): 1 – кварцевый песок, 600 Н; 2 – кварцевый песок, 1200 Н; 3 – корунд, 600 Н [Кочарян и др., 2008].



предположить, что критическая скорость деформации – параметр, имеющий одинаковое значение, как для нормальной, так и для сдвиговой жесткости. На рис. 4 хорошо видно, что конечная нормальная жесткость трещины начинает превышать начальную при скоростях деформации меньших 0,1 мкм/мин, или 0,002 мкм/с. В нашем случае для проявления эффекта залечивания необходимо было уменьшить скорость деформации ещё, по крайней мере, на два порядка, что было невозможно реализовать редуктором, имеющимся на установке.

Выводы

В результате выполненных экспериментов проведено сравнение динамической и статической сдвиговой жесткости модельной трещины в процессе её сдвиговой деформации при разных скоростях последней и на разных стадиях регулярного прерывистого скольжения. Показано, что динамическая жесткость при приближении к срыву снижается примерно на 20 МПа/мм, причем, происходит это на всех скоростях сдвигового деформирования. Статическая сдвиговая жесткость перед динамическим срывом в этих же экспериментах снижается более радикально – вплоть до нуля.

Было показано, что динамическая сдвиговая жесткость модельной трещины снижается с уменьшением скорости сдвиговой деформации. Параметры установки не позволили достичь критического значения скорости сдвиговой деформации, поэтому для квазистатической сдвиговой жесткости не удалось получить заметного увеличения с уменьшением скорости деформирования.

Полученные значения динамической сдвиговой жесткости превысили соответствующие значения квазистатической жесткости примерно на два порядка. Такое сильное отличие пока не удастся объяснить. По крайней мере, попытка изменить это соотношение, уменьшив скорость деформации трещины, не принесла результата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00719).

Литература

Голицын Б.Б. Избранные труды. Т. 2. Сейсмология. М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 490 с.

Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. О критической скорости деформации разломных зон // ДАН. 2008. Т. 418. № 3. С. 1–4.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Изменение жесткости разломной зоны в ходе сейсмического цикла // ДАН. 2011. Т. 441. № 3. С. 384–387.

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.

Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН, 2011.

Brace W.F. and J.D. Byerlee (1966) Stick-Slip as a Mechanism for Earthquakes // Science, Vol. 153, No. 3739, pp. 990–992.

Chen W.-Y., Lovell C.W., Haley G.M. and Pyrak-Nolte L.J. (1993) Variation of Shear-Wave Amplitude During Frictional Sliding // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 30, pp. 779–784.

Hedayat, A., L.J. Pyrak-Nolte, and A. Bobet (2014), Precursors to the shear failure of rock discontinuities // Geophys. Res. Lett., 41, 5467–5475, doi:10.1002/2014GL060848.

Kaproph B.M. and C. Marone (2013). Slow Earthquakes, Preseismic Velocity Changes, and the Origin of Slow Frictional Stick-Slip // Science, V. 341, pp.1229–1232.

Kaproph, B.M., and C. Marone (2014), Evolution of elastic wave speed during shear-induced damage and healing within laboratory fault zones // J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, 4821–4840, doi:10.1002/2014JB011051.