УДК 550.34.016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ МЕЖБЛОКОВОГО КОНТАКТА ПРИ ЕГО СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Д.В. Павлов, В.К. Марков, И.С. Свинцов

В лабораторных экспериментах с помощью зондирующих импульсов проведены прямые измерения сдвиговой жесткости межблокового контакта на разных этапах его сдвигового деформирования. Проведено сопоставление результатов, полученных на разных стадиях прерывистого скольжения с ранее полученными экспериментальными данными.

Введение

Характеристикой, чрезвычайно чувствительной к изменениям механических свойств разломной зоны является её жесткость, нормальная k_n и сдвиговая k_s:

$$k_n = \frac{d\sigma}{dW_n},\ k_s = \frac{d\tau}{dW_s}, \quad (1)$$

где σ и τ – нормальное и сдвиговое напряжения, действующие в окрестности разлома, W_n и W_s – относительное нормальное и сдвиговое смещения его берегов.

Как уже было экспериментально показано [Кочарян, Остапчук, 2011; Кочарян, Остапчук, Марков, 2011], сдвиговая жесткость межблокового контакта меняется на разных стадиях прерывистого скольжения, её значение снижается по мере приближения контакта к динамическому срыву.

Задачей настоящей работы было в лабораторных экспериментах провести прямые измерения сдвиговой жесткости на разных этапах сдвигового деформирования межблокового контакта – во время стабильного скольжения (крипа), при переходе к прерывистому скольжению (стик-слипу) и на разных стадиях прерывистого скольжения. В отличие от вышеупомянутых работ, где квазистатическое значение жесткости межблокового промежутка оценивалось по наклону реологической кривой, в данной работе использовался зондирующий импульс, и определялась динамическая жесткость контакта.

Эксперимент и его результаты

Эксперименты проводились по традиционной для моделирования прерывистого скольжения схеме (рис. 1). Жесткий блок лежит на жестком основании, на прослойке из сыпучего геоматериала. Блок прижимается к основанию нормальной нагрузкой *N*. Сдвиговое усилие *T* передается блоку через пружину с жесткостью *k*. В ходе эксперимента измеряются перемещение блока относительно основания и сдвиговая сила.

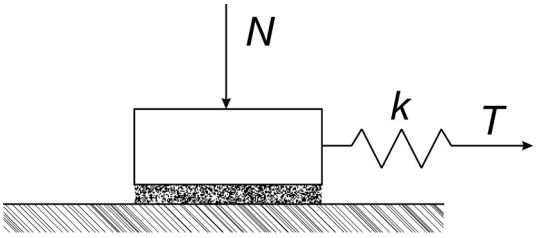

Рис. 1. Схема эксперимента по моделированию прерывистого скольжения

Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 2. На неподвижном гранитном блоке 1 (размер блока 20×10×3 см) на слое песка 3 толщиной 2,5 мм (кварцевый песок, фракция 0,3 мм, увлажненный глицерином в соотношении 1:0,0025 по весу) был помещен подвижный мраморный блок 2 (размер блока 8×8×3 см, масса 552 г), соединенный пружиной 5 с мотором 6, редуктор которого задавал скорость растяжения пружины 20 мкм/с. На касающиеся слоя песка поверхности блоков была нанесена искусственная шероховатость. Сдвиговое усилие, действовавшее на блок 2, измерялось пьезодатчиком силы 4 (CFT/5kN, HBM,

Германия). Относительное смещение блоков регистрировалось лазерным датчиком перемещения 7 (LD1627-4, Micro-Epsilon, Германия). Молоток 10 (стальной шарик ∅ 4,5 мм, припаянный к стальной спице, общий вес 2 г) с электромеханическим приводом и таймером, производил удары в торец блока 1 с частотой около 1 Гц. Акселерометры 11 (Bruel & Kjaer 8309) и 12 (Bruel & Kjaer 4344) регистрировали ускорения блоков. Показания датчиков смещения и силы, а также акселерометров записывались двумя цифровыми регистраторами с частотой кодирования 5 МГц/канал. Во время экспериментов нормальная нагрузка составляла $N = 30$ кг. Между штоком нагружающего устройства 8 и подвижным блоком 2 ставился стальной шарик, исключавший передачу тангенциальных усилий.

Эксперимент проводился следующим образом. Включался мотор 6, растягивающий пружину 5, на верхний блок 2 начинало действовать нарастающее сдвиговое усилие, которое регистрировалось датчиком силы 4. Практически сразу начиналось стабильное скольжение блока 2 по прослойке из песка, скорость которого увеличивалась с увеличением сдвигового усилия. Перемещение блока 2 регистрировалось лазерным датчиком 7. После начала перемещения включался молоток, производивший удары в торец блока 1. Эксперимент заканчивался, когда лазерный датчик LD1627-4 выходил за границу рабочего диапазона (4 мм).

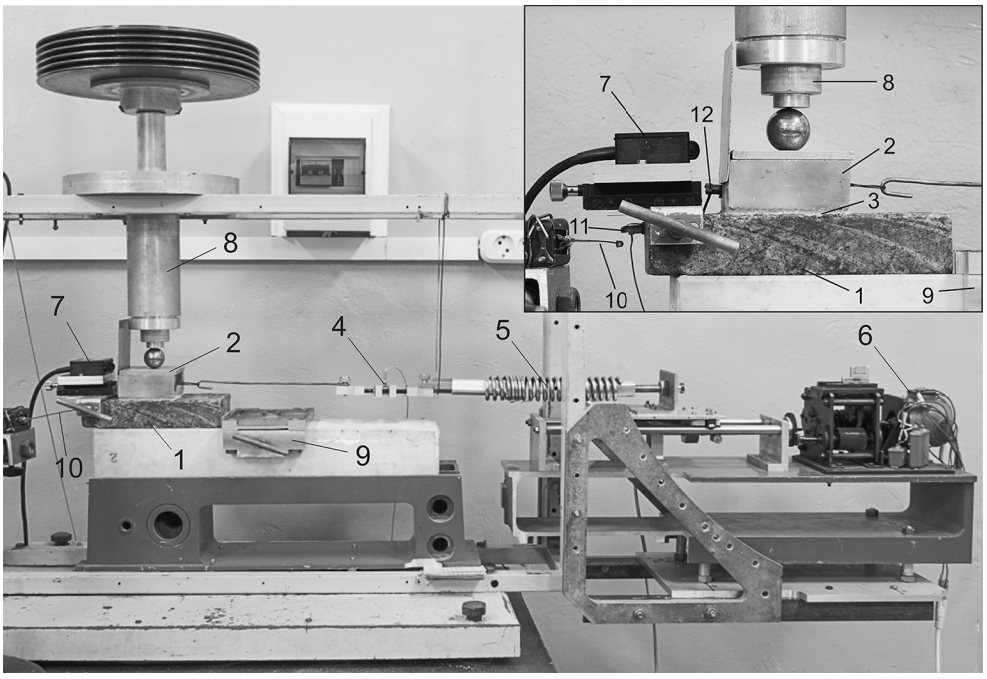

Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки: 1 – неподвижный гранитный блок; 2 – подвижный мраморный блок; 4 – пьезодатчик сдвигающей силы; 5 – пружина; 6 – мотор с редуктором; 7 – лазерный датчик перемещения; 8 – устройство для нормального нагружения подвижного блока; 9 – упор; 10 – молоток; 11 и 12 – акселерометры

На рис. 3 показаны записи перемещения и сдвиговой силы во время одного из экспериментов. В данном случае – это переход от стабильного скольжения к преры-

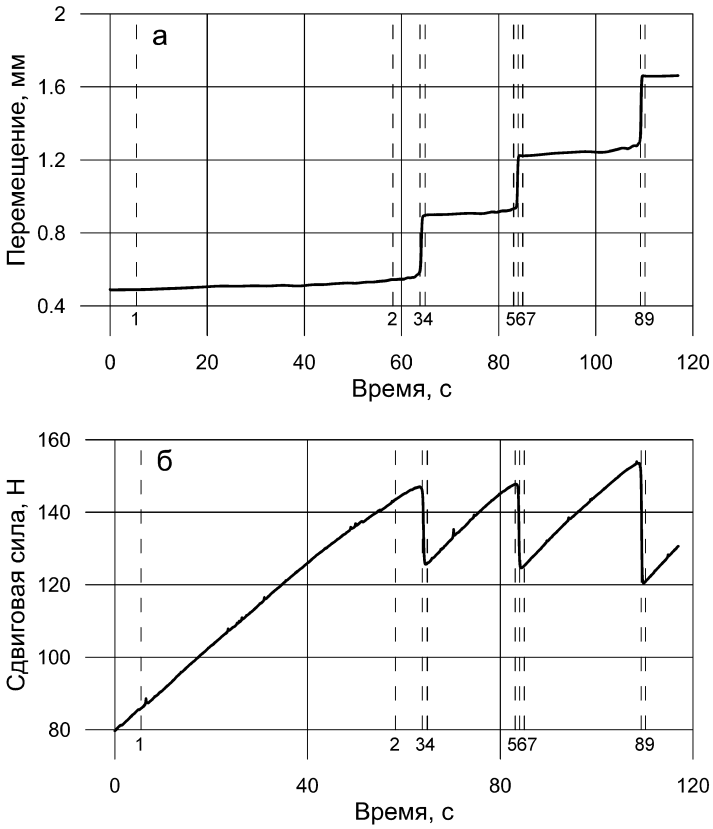

Рис. 3. Полные записи перемещения (а) и сдвиговой силы (б), сделанные во время эксперимента. Пунктирными линиями показаны моменты ударов, которые были выбраны для оценки сдвиговой жесткости контакта

вистому. Начальная часть процесса деформирования межблокового контакта здесь отсутствует (эпюры перемещения и сдвиговой силы начинаются не с нуля, а с 0,5 мм и 80 Н, соответственно). Вертикальными пунктирными линиями показаны моменты ударов, которые были выбраны для оценки сдвиговой жесткости контакта. Удары выбирались таким образом, чтобы один из них был до срыва, второй – после (рис. 4). Кроме того, были выбраны два удара в начале и в конце участка постоянного скольжения. При выборе ударов в районе второй ступеньки оказалось, что удар, случившийся после срыва (удар 6 на рис. 4,б), произошел в момент, когда движение верхнего блока после срыва еще не закончилось. Поэтому для обработки был выбран еще один удар – 7.

Формы эпюр ускорения блоков от всех ударов визуально практически неотличимы. Незначительно отличаются только амплитуды. В качестве примера на рис. 5 показаны эпюры ускорения блоков, зарегистрированные после удара 3. Заметим, что размеры блоков таковы, что здесь не идет речи о волновом движении – каждый блок движется как одно целое, песчаная прослойка деформируется квазистатически. Также подчеркнем, что интенсивность ударов молотка в торец нижнего блока была выбрана таким образом, что ни один удар не спровоцировал срыва верхнего блока – на записях перемещения и силы нет ступенек в моменты ударов.

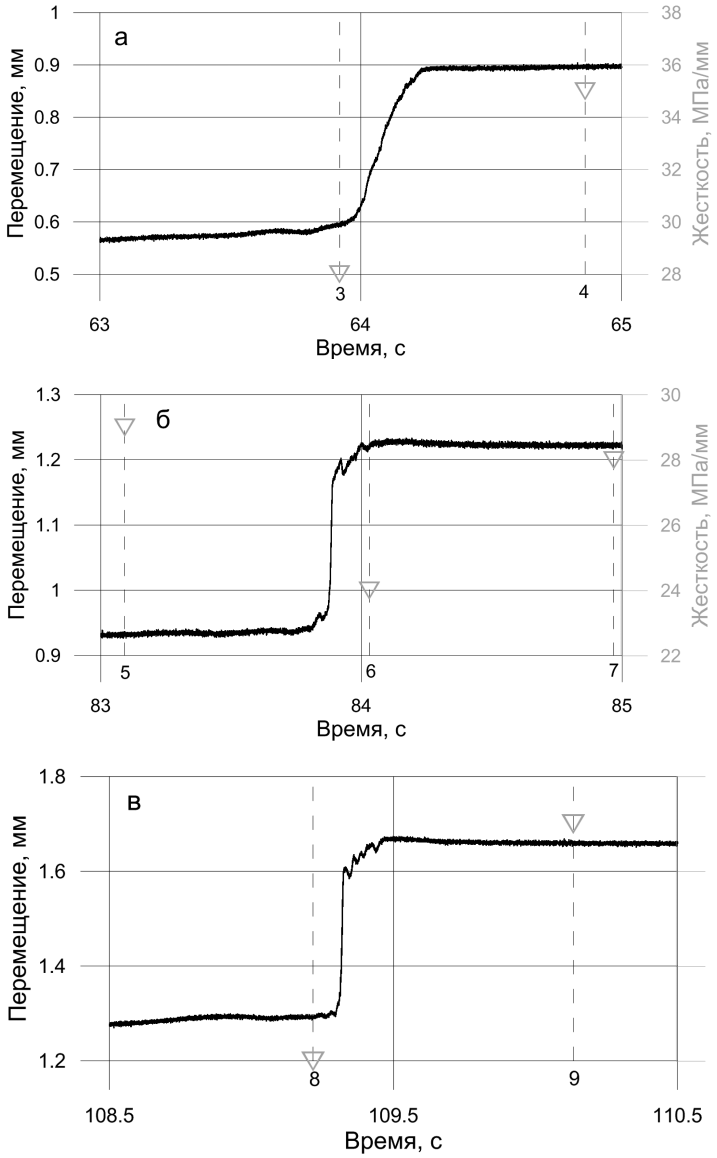

Рис. 4. Три ступеньки перемещения, зарегистрированные после начала стик-слипа. Пунктирные линии показывают моменты ударов в торец нижнего блока. Время и номера ударов соответствуют рис. 3. Удар 6 на рис. 4,б пришелся на момент, когда движение верхнего блока после срыва еще не закончилось. Серыми треугольниками показаны значения жесткости межблокового контакта, соответствующие каждому удару (ось *Y* серого цвета – справа)

По записям ускорения двух блоков строились эпюры их относительного смещения. Ускорение верхнего блока использовалось для расчета эпюры сдвигового напряжения, действующего на межблоковый контакт. Поясним последнее утверждение. С одной стороны, как уже было отмечено выше, в моменты ударов отсутствует относительное проскальзывание блоков. С другой стороны, в слое песка отсутствует волновое движение. Следовательно, слой деформируется квазистати-

чески – напряжение на верхней и нижней границах слоя песка в каждый момент времени одинаково. Умножив горизонтальное ускорение подвижного блока на его массу, получим сдвигающую силу, действующую на блок. Разделив значение силы на площадь грани блока, касающейся песчаной прослойки, получим сдвиговое напряжение на верхней и нижней границах слоя песка.

Из полученных эпюр относительного смещения и сдвигового напряжения строились диаграммы «сдвиговое напряжение – деформация» межблокового контакта. Пример одной из таких диаграмм, соответствующей записям на рис. 5, показан на рис. 6. Жесткость межблокового контакта оценивалась по наклону пунктирной

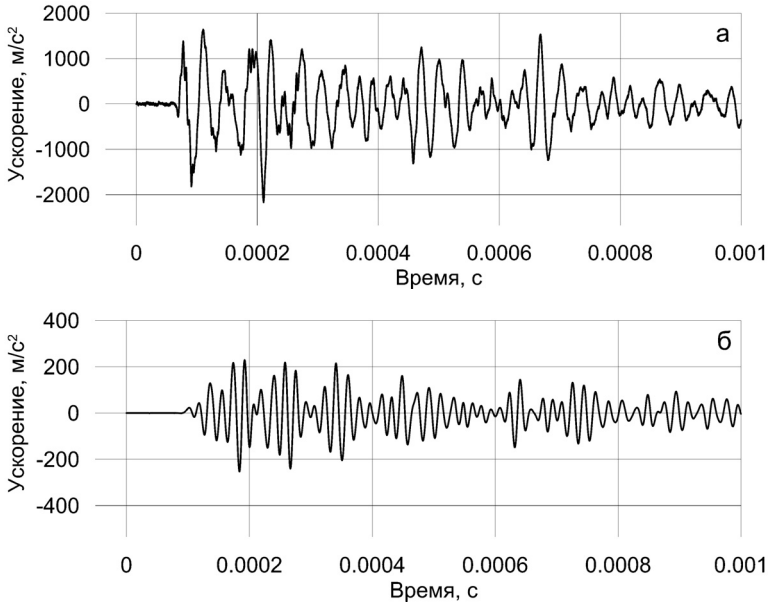

Рис. 5. Эпюры ускорения, зарегистрированные после удара 3 (см. рис. 4 и 5,а): а – нижний блок, в торец которого производился удар; б – верхний блок

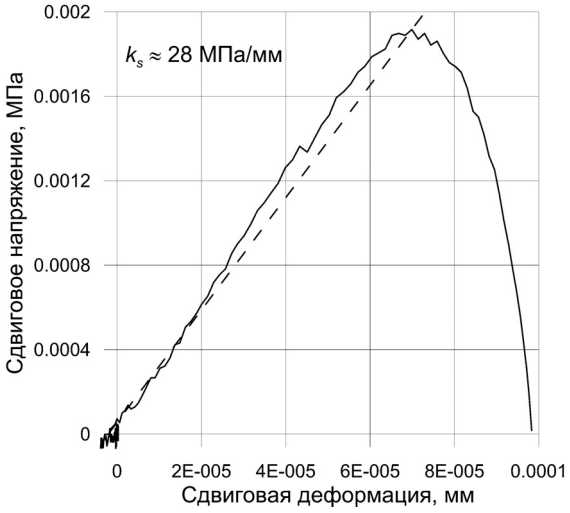

Рис. 6. Диаграмма сдвигового нагружения межблокового контакта, соответствующая удару 3 (см. рис. 4 и 5,а)

прямой, аппроксимирующей ветвь нагружения. В данном случае значение жесткости составило $k \approx 28$ МПа/мм.

Таблица

Жесткость межблокового контакта на разных этапах сдвигового нагружения

№ удара	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Время удара, с	5,44	58,24	63,92	64,86	83,09	84,03	84,97	109,22	110,13
Жесткость, МПа/мм	48	32	28	35	29	24	28	26	31

В таблице приведены значения жесткости межблокового контакта, рассчитанные по диаграммам нагружения. На рис. 7 значения жесткости расставлены по номерам ударов. Во-первых, обращает на себя внимание то, что максимальное значение жесткости зарегистрировано в самом начале эксперимента (удар 1), во время постоянного скольжения, примерно за минуту до начала стик-слипа. Жесткость контакта, полученная в конце участка постоянного скольжения (удар 2), примерно за 6 с до первой ступеньки стик-слипа, уже попадает в диапазон значений, характерных для разных стадий стик-слипа. Далее, хорошо видно, что в случае 1-ой и 3-ей ступенек стик-слипа (удары 3-4 и 8-9) значение жесткости межблокового контакта до срыва заметно ниже, чем соответствующее значение после срыва, что соответствует результатам работ [Кочарян, Остапчук, 2011; Кочарян, Остапчук, Марков, 2011]. В случае же второй ступеньки (удары 5-6-7) это не так. Жесткости до и после удара (удары 5 и 7) примерно равны, а жесткость сразу после удара (удар 6) заметно ниже.

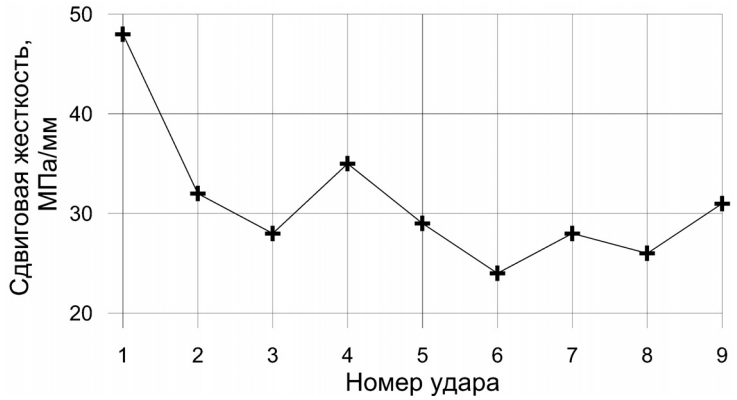

Рис. 7. Значение жесткости межблокового контакта в зависимости от номера удара

Рассмотрим подробнее моменты всех трех срывов. На рис. 4, кроме трех ступенек смещения, показаны моменты ударов и соответствующие им значения жесткости. Хорошо видно, что в случае ступенек 1 и 3 (рис. 4,а и 4,в, соответственно) удары «до» и «после» срыва по времени попали примерно одинаково по отношению к моменту самого срыва. Удары «до» произошли примерно за 0,1 с до начала срыва, в тот момент, когда уже начались заметные подвижки, предшествующие

срыву, то есть, началась разупаковка песчинок в песчаной прослойке. Удары же «после» произошли спустя примерно 0,7 с после окончания движения, вызванного срывом, когда закончилось формирование новой упаковки песчинок. В случае ступеньки 2 (рис. 4,б) удары по времени по отношению к моменту срыва попали по-другому. Удар «до» (удар 5) случился примерно за 0,8 с до срыва, когда «старая» упаковка еще держалась, удар «после» (удар 7) произошел спустя, примерно, 1,1 с после срыва, когда уже сформировалась «новая» упаковка песчинок. Соответственно, для ударов 5 и 7 получились близкие значения жесткости контакта. Удар же 6, хотя формально и случился после срыва, произошел в момент, когда еще продолжалось движение, вызванное срывом, то есть песчинки еще не успели окончательно упаковаться. Поэтому и не удивительно, что удару 6 соответствует самое низкое значение жесткости.

Выводы

Полученные экспериментальные результаты подтвердили, что сдвиговая жесткость меняется на разных стадиях прерывистого скольжения – её значение снижается по мере приближения контакта к динамическому срыву. Однако в отличие от квазистатической жесткости, рассчитанной по наклону зависимости «сдвиговое напряжение – деформация», когда происходит более чем 30-кратное снижение сдвиговой жесткости [Кочарян, Остапчук, 2011; Кочарян, Остапчук, Марков, 2011], динамическая жесткость, оцененная по реакции на зондирующий импульс, снижается на 15–20%.

К сожалению, в настоящей постановке невозможно отследить изменение свойств контакта более детально по времени – электромеханический привод молотка может задавать частоту ударов не более 1 Гц. Для решения этой проблемы необходима модернизация экспериментальной установки.

В заключение подчеркнем, что использование зондирующего возмущения для диагностики свойств межблокового контакта важно еще и с той точки зрения, что именно такой метод применим в натурных условиях, причем в качестве зондирующего возмущения можно использовать как импульсы от специального источника, так и микросейсмический фон.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 13-05-00780-а, 13-05-00950-а и НШ.341.2008.2005) и ОНЗ РАН (программа № 6).

Литература

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

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Марков В.К. Изменение жесткости контакта между блоками горной породы в ходе прерывистого скольжения // Динамические процессы в геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН. Вып. 2. М.: ГЕОС. 2011. С. 40–49.