

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕЖБЛОКОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

В.К. Марков, Д.В. Марков, Л.М. Перник

Для исследования особенностей деформирования блочной структуры была сконструирована и изготовлена установка, позволяющая создавать в объекте исследования двухосное напряженное состояние и осуществлять синхронную регистрацию характеристических параметров системы. Опыты позволили исследовать вклад различных характеристик материала в эффекты дилатансии и компаксии малопрочного тонкого слоя при сдвиге. Параметром, наиболее сильно влияющим на деформационные характеристики заполнителя, оказался средний размер частицы.

Введение

Деформирование блочных структур земной коры, ее крупных и малых фрагментов, представляет собой очень сложный процесс, зависящий от многих факторов. Принято считать, что материал блоков значительно прочнее материала межблоковых промежутков, и поэтому деформация осуществляется путем относительного перемещения элементов блочной структуры (блоков) по менее прочным межблоковым промежуткам. Свойства материала межблоковых промежутков влияют на характер деформации этого промежутка, что, в конечном счете, в значительной мере определяет макроскопические механические характеристики блочной структуры.

Процесс деформирования блочных структур интересует многих исследователей. О роли в этом процессе свойств материала межблоковых промежутков высказываются разные мнения.

В наших более ранних опытах [Герасимова и др., 1995] было отмечено, что величина дилатансии тонкого слоя при сдвиге слабо зависит от толщины межблокового промежутка из-за локализации деформации в узкой области.

Из публикаций известно, что материал, заполняющий зоны максимальных сдвиговых деформаций («магистральных сместителей») разломов, обычно сильно перетерт, а средний размер зерна заполнителя довольно мал (30–100 мкм) [Wibberley, Shimamoto, 2003]. Эти данные говорят в пользу предположения о том, что эффект дилатансии материала-заполнителя при сдвиге по «магистральному сместителю» будет малозначителен.

Согласно представлениям о деформации скальной породы за пределом упругости [Гарагаш, Николаевский, 1989], на участках взаимодействия «магистральных сместителей» дилатансионные эффекты намного значительнее, чем при сдвиге берегов магистральных трещин. Однако, согласно оценкам [Segall, Pollard, 1980], длина участков, на которых имеет место такое взаимодействие, составляет не более чем несколько процентов от характерной длины существующих разрывов. Это означает, что и вклад в эффективную прочность тех дополнительных напряжений, которые обусловлены разуплотнением материала при динамическом распространении «разлома землетрясения», будет невелик.

Иная ситуация складывается на предсейсмической стадии в процессе подготовки динамического события, когда область постепенного, квазистатического деформирования охватывает большие объемы горного массива на значительном удалении от будущего разрыва. В этом случае явление увеличения объема, связанное с образованием временного разуплотненного состояния среды, несомненно, играет ключевую роль [Гольдин, 2004].

К настоящему времени вопрос об оценке роли материала межблоковых промежутков в процессах деформирования блочных структур проработан недостаточно и нуждается в дополнительных исследованиях.

Предлагаемое экспериментальное исследование предпринято с целью получения такой информации.

Экспериментальная установка

Для исследования влияния различных факторов на процесс деформирования блочной структуры была сконструирована и изготовлена установка, позволяющая

создавать в объекте исследования двухосное напряженное состояние и осуществлять синхронную регистрацию характеристических параметров системы.

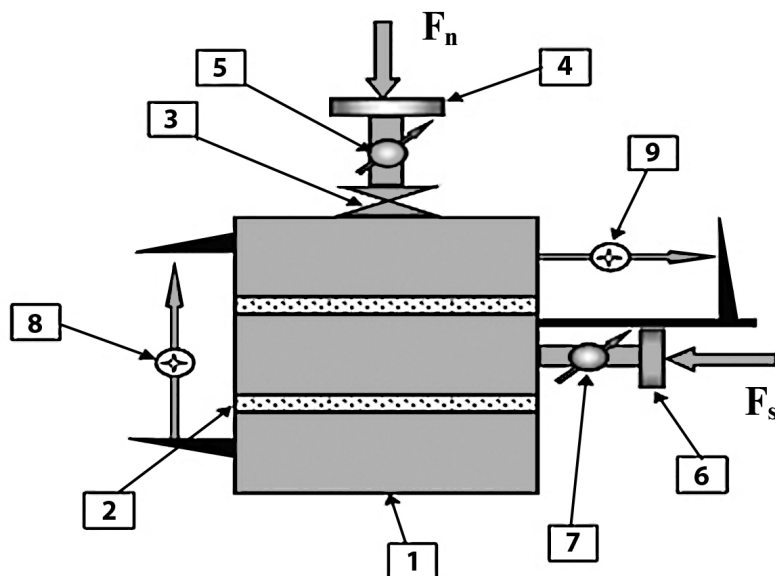


Рис. 1. Принципиальная схема установки.

1 – блоки из оргстекла; 2 – межблочный заполнитель; 3 – пружинный элемент; 4, 6 – упорные подшипники; 5, 7 – измерители силы; 8, 9 – измерители перемещений.

Установка состоит из трех блоков оргстекла размером $180 \times 180 \times 40$ мм. Пространство между блоками заполняется исследуемым материалом. Силовым элементом установки является комбинация двух винтовых прессов, которые дают возможность создавать в исследуемом объекте двухосное напряженное состояние.

К пакету блоков вертикально прикладывается нагрузка F_n , нормальная по отношению к межблочному промежутку. Сдвиговая нагрузка F_s в межблочном промежутке создается путем приложения к среднему блоку дополнительного горизонтального усилия. Верхний и нижний блоки зафиксированы упорами, препятствующими их горизонтальному перемещению, в то время как средний блок имеет возможность перемещаться в горизонтальном направлении. Упор верхнего блока осуществляется через роликовый элемент, который не создает препятствий для его вертикального перемещения. Этот прием позволяет регистрировать вертикальное перемещение верхнего блока при сдвиговом перемещении центрального блока.

Для того, чтобы обеспечить надежный контакт блоков и заполнителя межблочного промежутка, на поверхности блоков сделана специальная насечка в виде поперечных (по отношению к направлению движения блоков) углублений треугольного профиля глубиной 2,5 мм. Эта насечка полностью исключает проскальзывание материала на границе с блоками, в результате чего относительное перемещение блоков происходит только за счет деформирования материала межблочного промежутка.

По границам, параллельным направлению перемещения центрального блока, защиту обеспечивают стеклянные стенки толщиной 20 мм, которые прижаты к пакету блоков с боковых сторон. Для защиты от попадания материала заполнителя

между блоками и стеклом на боковые поверхности блоков наклеено сукно. В результате подвижный блок не испытывает заметного сопротивления на контакте со стеклом, в то время как ткань заполняет пространство между блоками и стеклом и препятствует высыпанию материала заполнителя. В некоторых случаях для этой цели вместо сукна применялась тефлоновая пленка.

По границам, перпендикулярным направлению движения центрального блока, для защиты установлены эластичные перегородки из тонкой резины толщиной 2,5 мм. Эти перегородки прикреплены к блокам таким образом, чтобы препятствовать высыпанию материала из межблокового промежутка, не мешая горизонтальному движению центрального блока. Этот прием уменьшает влияние граничных условий на результаты измерений.

Для создания вертикальной нагрузки F_n в установке применен трехколонный винтовой пресс. Для защиты от сдвиговых нагрузок, возникающих при вращении винта прессы, усилие от винта передается через упорный подшипник. Измерение приложенной нормальной нагрузки осуществляется с помощью измерительного элемента DACELL LOAD CELL, model UU-T2, сигнал с которого регистрируется индикатором DH-10W.

В установке предусмотрена возможность изучать зависимость изменения толщины межблокового промежутка от жесткости элементов системы, передающих нормальную нагрузку. Для создания в эксперименте заданной жесткости нагружающего устройства, усилие на верхний блок передается через специальный пружинный элемент. Изменение жесткости устройства достигается путем замены пружин и изменения их числа.

Сдвиговая нагрузка F_s создается четырехколонным винтовым прессом, закрепленным на нижней площадке трехколонного прессы таким образом, чтобы эта нагрузка была строго параллельна рабочим поверхностям блоков и перпендикулярна вертикальной нормальной нагрузке. Усилие прикладывается к среднему блоку извлекаемой сборки через упорный подшипник для защиты от сдвиговых напряжений.

Вертикальное относительное перемещение блоков регистрируется емкостными датчиками типа М-022, закрепляемыми на стойках, установленных на верхнем и нижнем блоках. Датчики расположены в четырех точках по углам блоков. Точность датчиков вертикального перемещения равна 0,2 мкм, предельное измеряемое перемещение составляет 2 мм.

Горизонтальное относительное перемещение (сдвиг) регистрируется двумя емкостными датчиками типа М-022, закрепляемыми на стойках, установленных на верхнем и среднем блоках. Датчики измеряют перемещение в точках, расположенных около левого и правого краев задней поверхности подвижного среднего блока. Это позволяет вычислять среднее перемещение и оценивать погрешность измерений за счет перекоса при движении блока. Точность датчиков горизонтального перемещения равна 1,0 мкм, предельное перемещение составляет 10 мм.

Сигналы датчиков перемещения поступают на регистратор БИН-8/2Т. Показания всех датчиков нагрузки и перемещения синхронно записываются на компьютере в виде функции от времени с шагом 1 секунда.

Некоторые результаты наблюдений

В проведенных экспериментах в качестве межблокового заполнителя использовались различные грунты, свойства которых представлены в Таблице. Отметим,

что песок был слегка (0,25% по массе) увлажнен глицерином. Глицерин играл как роль слабой связи зернистого материала заполнителя промежутка, так и роль смазки при относительном движении зерен.

Таблица

Свойства материалов-заполнителей

Грунт	Диапазон размеров зерен, мкм	Средний размер частиц δ_0 , мкм	Плотность, г/см ³	Сцепление C , Па	Угол трения, φ
Песок	200–400	300	1,5	65	31,2
Гранитная крошка	1600–2500	2050	1,5	610	33,8
Гранитная крошка	630–1000	815	1,48	120	35,3
Корунд	28–40	34	1,6	400	32,7
Барит	50–2500	430	3,0	590	39

Межблочный промежуток был выбран размером 10 мм. Для создания максимально воспроизводимых условий эксперимента процедура заполнения промежутка была строго регламентирована: заполнение производилось дозированными порциями, при засыпке уделялось особое внимание равномерному распределению материала заполнителя, после введения каждой порции подпрессовка загруженного материала выполнялась специальным инструментом, позволявшим контролировать прикладываемые усилия.

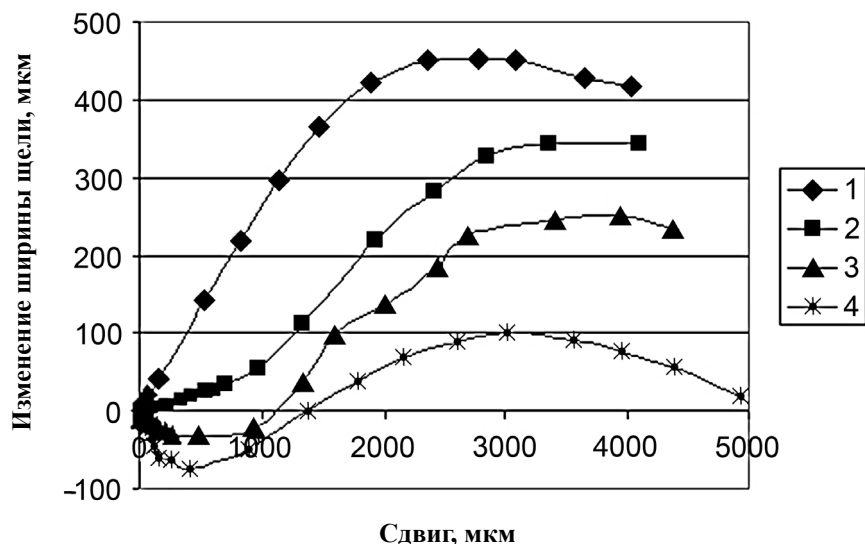


Рис. 2. Зависимость изменения ширины щели от относительного смещения берегов при разных начальных нормальных усилиях в опытах с кварцевым песком.
 1 – $F_{n0} = 2450$ Н; 2 – $F_{n0} = 4900$ Н; 3 – $F_{n0} = 7350$ Н; 4 – $F_{n0} = 9800$ Н; жесткость нормального нагружения $k_n = 1,48$ Н/мкм.

Эксперименты проводились при четырех значениях нормальной нагрузки (2450, 4900, 7350, 9800 Н), при каждой из которых использовались нагружающие устройства с тремя значениями жесткости (1,48; 1,94; 4,7 Н/мкм). Перед началом эксперимента сборка подвергалась предварительной опрессовке нормальной нагрузкой 9800 Н. После опрессовки устанавливалась заданная нормальная нагрузка, при которой в рабочем эксперименте проводилось сдвиговое перемещение центрального блока.

Типичная картина, наблюдавшаяся в опытах, показана на рис. 2. По мере роста сдвиговой деформации (горизонтального перемещения) можно отчетливо видеть деформацию контакта (изменение ширины щели) в направлении, нормальном по отношению к плоскости трещины. С ростом начального нормального усилия появляется участок сдвиговых перемещений, на котором наблюдается уплотнение материала-заполнителя.

Влияние жесткости нормального нагружения отчетливо прослеживается на рис. 3. Видно, что в диапазоне сдвиговых перемещений до 500 мкм разуплотнение материала межблокового промежутка при жесткости 1,48 Н/мкм сменяется его уплотнением при более высокой жесткости. В диапазоне от 500 до 2000 мкм увеличение жесткости проявляется незначительно, в то время как при сдвиговых перемещениях выше 2000 мкм при жесткости 1,48 Н/мкм с некоторым замедлением продолжается разуплотнение материала межблокового промежутка, а при жесткости 4,7 Н/мкм с увеличением сдвига все более нарастает его компакция. Эта тенденция проявляется все более ярко с увеличением сдвигового перемещения.

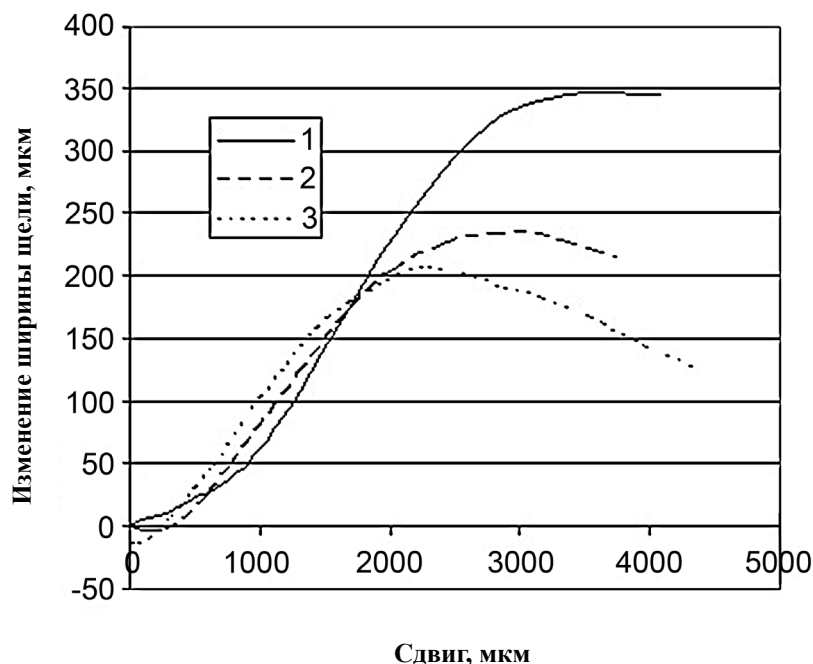


Рис. 3. Зависимость изменения ширины щели от относительного смещения берегов при разных значениях жесткости нормального нагружения в опытах с кварцевым песком.
1 — $k_n = 1,48$ Н/мкм; 2 — $k_n = 1,94$ Н/мкм; 3 — $k_n = 4,7$ Н/мкм.

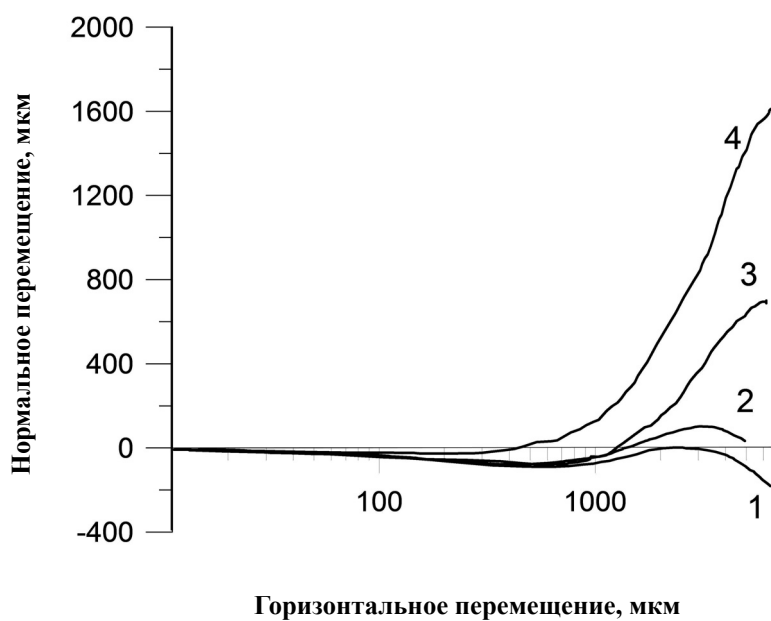


Рис. 4. Зависимости изменения толщины контакта от относительного смещения берегов для различных материалов заполнителя трещины.
1 – корунд; 2 – песок; 3 – гранитная крошка $\delta_0 = 0,815$ мм; 4 – гранитная крошка $\delta_0 = 2,050$ мм.
Начальное нормальное усилие $F_{n0} = 9800$ Н; жесткость нагружения $k_n = 1,48$ Н/мкм

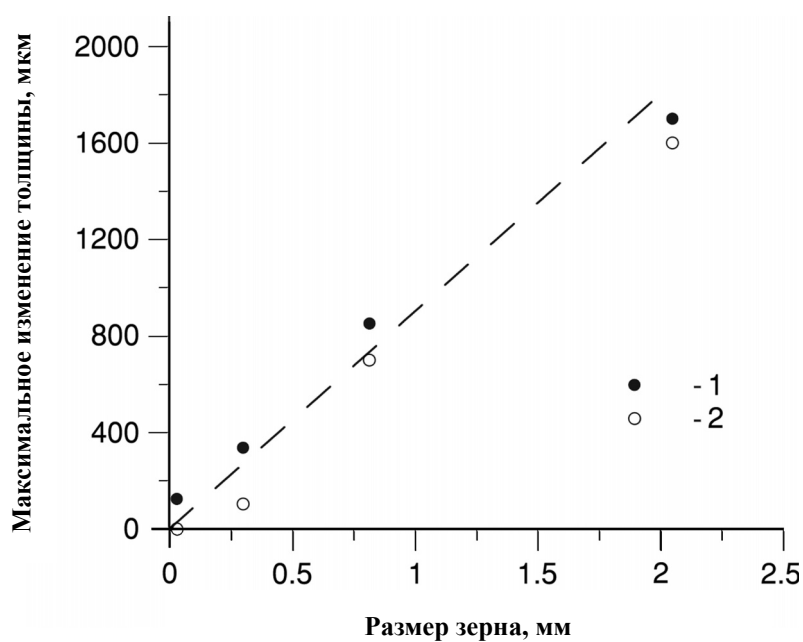


Рис. 5. Зависимость максимального увеличения щели от среднего размера зерна заполнителя.
1 – $F_{n0} = 4900$ Н; 2 – $F_{n0} = 9800$ Н.

Параметром, оказывающим сильное влияние на дилатансионные характеристики тонкого слоя, является средний размер зерна материала-заполнителя. На рис. 4 показаны кривые изменения ширины трещины при сдвиге в опытах с различными материалами при одних и тех же параметрах нагружения. Если для крупной гранитной крошки величина раскрытия составляет более чем 1,3 мм, то в опыте с корундом апертура трещины не превышает начальной величины.

На рис. 5 представлена зависимость максимального увеличения ширины щели от среднего размера зерна заполнителя для двух значений начального нормального усилия – $F_{n0} = 4900$ Н и $F_{n0} = 9800$ Н. Из приведенных данных видно, что величина максимального разуплотнения примерно пропорциональна начальному среднему размеру зерна.

Заключение

Сконструирована и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая создавать в объекте исследования двухосное напряженное состояние и осуществлять синхронную регистрацию характеристических параметров системы.

На созданной установке проведено исследование вклада различных характеристик материала наполнителя межблокового промежутка в эффекты дилатансии и компакций малопрочного тонкого слоя при сдвиге.

Было установлено, что при близких значениях угла трения для крупной гранитной крошки и кварцевого песка эффективная прочность трещины, заполненной гранитной крошкой, примерно на 60% выше, чем в случае трещины, заполненной кварцевым песком.

Найдено, что параметром, наиболее сильно влияющим на деформационные характеристики заполнителя, оказался средний размер частицы.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке роли дилатансии и компакций материала, заполняющего разлом в сейсмогенных событиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 09-05-00968-а и 10-05-01064-а) и ОНЗ РАН (программа № 6).

Литература

Гарагаи И.А., Николаевский В.Н. Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации // Успехи механики. 1989. Т. 12. № 1. С. 131–183.

Герасимова Т.И., Кондратьев В.Н., Кочарян Г.Г. Модельные исследования особенностей сдвигового деформирования трещин, содержащих заполнитель // ФТПРПИ. 1995. № 4. С. 61–68.

Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37–54.

Segall P., Pollard D.D. Mechanics of discontinuous faults // J. Geophys. Res., 1980. V. 85, № B8. P. 4337–4350.

Wibberley C., Shimamoto T. Internal Structure and permeability of major strike-slip fault: the median tectonic line in Mie prefecture, southwest Japan // Journ. of Structural Geology. 2003. V. 25. P. 59–78.