

Развитие нового подхода к оценке уровня сдвиговых напряжений на активных границах раздела блочных геологических сред*

С.В. АСТАФУРОВ

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

e-mail: astaf@ispms.tsc.ru

А.С. ГРИГОРЬЕВ

С.Г. ПСАХЬЕ

Е.В. ШИЛЬКО

В работе исследованы некоторые общие закономерности деформационного отклика границ раздела в блочных средах (включая геологическую) на низкоамплитудные динамические механические воздействия. Показано, что перспективным параметром для оценки уровня сдвигового напряжения на межблочной границе является величина относительного тангенциального перемещения блоков, инициируемого упругими волнами S-типа.

1. Введение

Важной особенностью строения геологических сред является иерархическая организация блочной структуры, проявляющаяся во всем диапазоне размеров. Межблочные границы раздела имеют значительно более низкие эффективные прочностные характеристики, нежели материал самих блоков. Это определяет способность фрагментов геологической среды, находящихся в сложном напряженном состоянии, к локализации необратимых деформаций на межблочных границах в условиях даже слабых динамических воздействий [1]. Релаксационная способность механизма, связанного с относительными перемещениями блоков, определяется рядом условий: видом напряженно-деформированного состояния, граничными условиями и др. При достижении предельного значения сдвиговых напряжений на активной границе раздела может происходить качественное изменение локального деформационного режима: от крипового к динамическому, имеющему место, например, при землетрясениях. Согласно оценкам, приведенным, например, в [2], сейсмические события с магнитудой до 6-7 с большой вероятностью представляют собой акты динамического проскальзывания блоков по существующим границам раздела. Реализация данных событий связана с достижением предельного значения сдвиговых напряжений на границе. Сказанное определяет актуальность развития методов оценки локального напряженного состояния на участках активных границ раздела фрагментов горного массива или земной коры, что в настоящее время является одной из важных проблем геомеханики. В качестве характеристики локального напряженного состояния межблочной границы целесообразно использовать отношение абсолютного значения локального сдвигового напряжения к величине ее

*При финансовой поддержке гранта Президента РФ "МК-130.2010.5"

сдвиговой прочности при существующих граничных условиях (далее такое отношение будет именоваться «уровнем сдвиговых напряжений»).

В работах различных авторов использованием натуральных или лабораторных исследований отмечалось наличие выраженной связи между относительным значением сдвигового напряжения на межблочной границе с величиной сдвигового смещения, инициированного внешним динамическим воздействием [3, 4]. Результаты этих и других исследований свидетельствуют о принципиальной возможности развития подхода к диагностике уровня сдвиговых напряжений во фрагментах разломных зон на основе мониторинга динамики естественных и инициируемых локальными воздействиями межблочных перемещений. Для реализации этой идеи необходима информация о характере связи между уровнем сдвиговых напряжений на межблочной границе и деформационным откликом границы на слабые (низкоэнергетические) динамические возмущения. Подобная информация может быть получена, в частности, на основе компьютерного моделирования. Поэтому настоящая работа посвящена теоретическому изучению влияния уровня сдвиговых напряжений на границе раздела структурных элементов блочной среды на деформационный отклик границы на низкоамплитудные динамические воздействия. В качестве способа исследования использовалось компьютерное моделирование методом подвижных клеточных автоматов [5].

2. Постановка задачи компьютерного моделирования

Для достижения поставленной задачи в работе рассматривалась двумерная идеализированная модель границы раздела структурных блоков, находящаяся в сложных условиях нагружения (рис.1,а). Данная модель включает в рассмотрение саму границу шириной h_{intf} и прилегающие фрагменты блоков. Модельные блоки полагались монолитными и обладающими высокой прочностью. Механический отклик интерфейсной области характеризовался способностью к накоплению необратимых деформаций и имитировал механические свойства катаклазированного вещества. Для математического описания упруго-пластического отклика границы раздела и блоков в рамках метода подвижных клеточных автоматов применялась модель изотропных упругопластических сред, построенная на основе деформационной теории пластичности с разгрузкой по упругому закону [3]. Использовалось приближение плосконапряженного состояния. Функции отклика подвижных клеточных автоматов, моделирующих интерфейсную область и блоки, приведены на рис.1,б. Предложенная структурная модель качественно соответствует центральной части (ядру) зрелой разломной зоны [6].

Исходное напряженное состояние системы задавалось приложением к верхней поверхности образца внешней силы, имеющей нормальную F_y и сдвиговую F_x компоненты. Нижняя поверхность образца была жестко закреплена. Диссипативное и инерционное влияние окружения учитывалось неявно путем использования на внешних поверхностях образца дополнительных диссипативных сил (рис.1,а).

В работе анализировался деформационный отклик модельной границы раздела на низкоамплитудные «импульсные» воздействия. Импульсное динамическое воздействие осуществлялось кратковременным заданием автоматам верхней поверхности образца синусоидально изменяющейся скорости V вдоль одной из координатных осей (в направлении другой координатной оси граничное условие оставалось при этом неизменным). Использовались две схемы нагружения: в первой сжимающий импульс был направлен

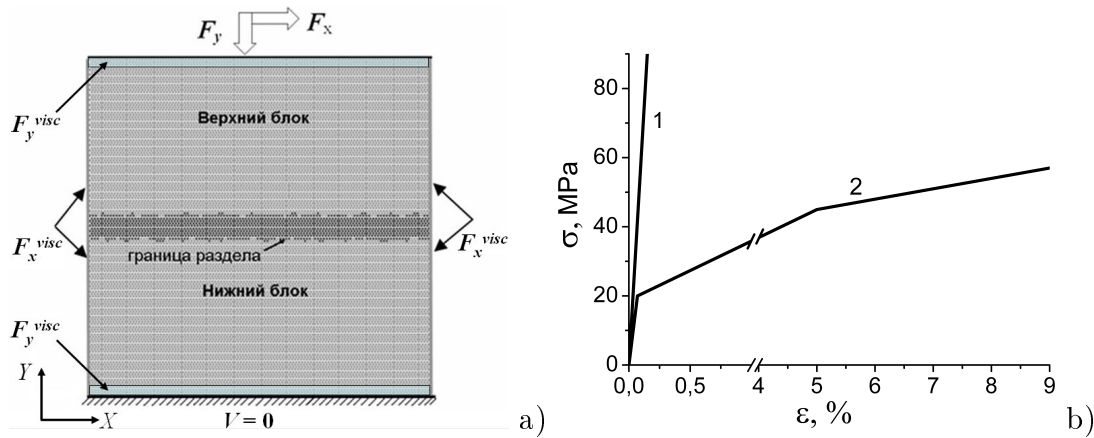


Рис. 1. Структура и схема нагружения модельной границы раздела (а), функции отклика (б) автоматов блоков (кривая 1) и материала интерфейсной зоны (кривая 2).

вдоль оси Y и имитировал Р-волну сжатия межблочной границы, во второй – вдоль оси X (имитация S-волны). По окончании воздействия на верхней поверхности возвращались исходные граничные условия. Рассматривались различные уровни сдвигового напряжения $f_x = F_x / F_x^{max}$, определяемого отношением действующего сдвигового усилия F_x к максимальной силе сдвигового сопротивления границы F_x^{max} при действующих условиях. Некоторые характерные значения уровня сдвигового напряжения нанесены на кривую сопротивления сдвигу границы (рис.2). Отметим, что данная кривая имеет профиль, характерный для границ раздела фрагментов горного массива, и характеризуется тремя основными стадиями: квазиупругой (I), квазипластического течения (II) и запредельной.

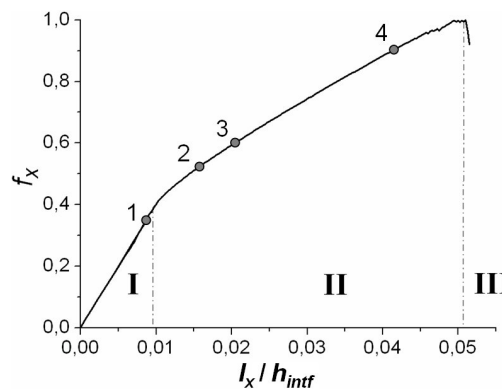


Рис. 2. Зависимость приведенной силы сопротивления относительно сдвиговому перемещению блоков от величины перемещения. Точки на диаграмме отмечают выделенные уровни сдвигового напряжения по отношению к максимальной силе сопротивления сдвиговому деформированию: 1 – 0.35; 2 – 0.52; 3 – 0.6; 4 – 0.9.

3. Результаты моделирования и обсуждение

Как показывают результаты моделирования, динамические воздействия приводят к появлению необратимых относительных тангенциальных перемещений блоков даже при

достаточно малых значениях сдвиговых напряжений. Так, на рис. 3 показана типичная зависимость величины инициированного тангенциального смещения блоков γ_x от уровня сдвигового напряжения f_x . Результаты приведены для заданной нормальной силы F_y . Использовалось импульсное воздействие, имитирующее P -волну. Как можно видеть из рис.3, кривая инициированных тангенциальных смещений характеризуется тремя основными участками. На первом из них (вдали от формальной точки перехода к квазипластической стадии отклика границы, до точки A на рис.3) величина инициированных смещений является малой и приблизительно постоянной. На втором участке (область между точками A и C , окружающая точку перехода к квазипластической стадии) происходит возрастание величины сдвигового смещения на порядок величины. На третьем участке (квазипластическая стадия), величина инициированных смещений «стабилизируется» и далее изменяется слабо. Таким образом, в области перехода от квазиупругой к квазипластической стадиям отклика границы раздела наблюдается скачкообразное изменение величины инициированной сдвиговой деформации, что может быть использовано в качестве параметра для диагностики напряженного состояния среды.

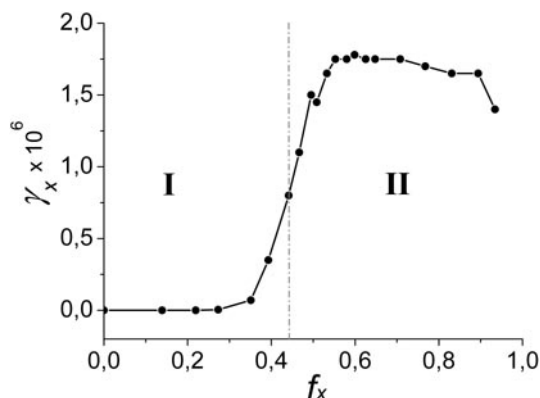


Рис. 3. Зависимость приведенной величины инициированного импульсом относительного тангенциального перемещения блоков от уровня сдвигового напряжения (воздействие P -волной).

Детальный анализ закономерностей поведения межблочной границы в условиях «импульсных» воздействий показал, что характер деформационного отклика в значительной степени определяется не только уровнем сдвигового напряжения f_x , но и приложенной нормальной нагрузкой F_y , а также типом падающей упругой волны. Так, на рис.4а приведены зависимости сдвигового смещения γ_x от уровня сдвигового напряжения f_x для двух различных значений нормальной силы F_y , удельная величина которой составляла 0.25 (кривая 1) и 0.50 (кривая 2) от величины предела текучести материала интерфейсной зоны. Можно видеть, что при достаточно больших значениях F_y (кривая 2) участок быстрого роста инициированных смещений распространяется далеко в область квазипластического деформирования границы, хотя кривые сдвигового деформирования образцов при различных F_y различаются значительно слабее. При этом абсолютные значения инициированных смещений на участке квазипластического отклика (стадия II на рис.2) практически пропорциональны величине нормального напряжения. Таким образом, характер изменения деформационного отклика межблочных границ на тестовые импульсные воздействия P -волнами при изменении уровня сдвигового напряжения в значительной степени определяется уровнем нормальных напряжений.

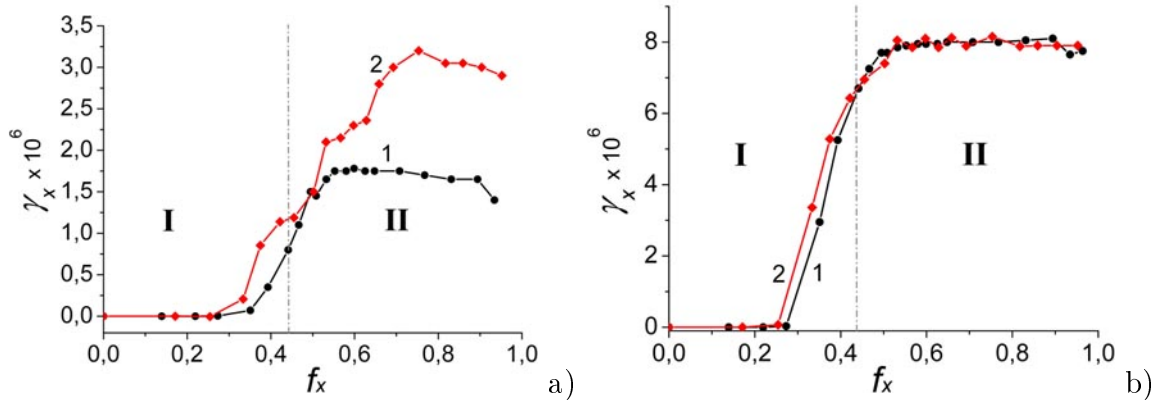


Рис. 4. Зависимости приведенной величины относительного тангенциального перемещения блоков от уровня сдвигового напряжения при воздействии P -волной (а) и S -волной (б): 1 – $\sigma_y = 0.25\sigma_{yield}$; 2 – $\sigma_y = 0.5\sigma_{yield}$.

В то же время, при использовании в диагностических целях S -волн (возмущающий «импульс» направлен вдоль оси X) характер изменения и абсолютная величина инициированных тангенциальных смещений изменяются крайне слабо с ростом нормальных напряжений, что можно видеть из рис.4,б, где приведены соответствующие кривые $\gamma_x(f_x)$ для двух различных значений нормальной силы. При этом ширина переходной области (интервал значений f_x , в пределах которого происходит «скачок» смещений) приблизительно та же, что и при воздействии P -волнами (рис.3,а), хотя и немного смещена в сторону меньших сдвиговых напряжений. Приведенные результаты показывают, что величина относительного тангенциального перемещения блоков по границе раздела, инициированного низкоамплитудным «импульсным» воздействием S -типа, может быть использована в качестве характеристики принадлежности напряженного состояния границы к квазиупругой, либо квазипластической области.

4. Заключение

Полученные результаты позволили сделать важный вывод, что для теоретического и экспериментального изучения деформационного отклика фрагментов зон активных разломов на тестовые «импульсные» динамические воздействия предпочтительным является использование локальных источников, генерирующих «импульсные» возмущения, основная энергия которых переносится S -волнами. В этом случае получаемые данные о деформационном отклике межблочных границ могут быть однозначно интерпретированы с целью определения «переключения» напряженного состояния из квазиупругой стадии к квазипластической или обратно.

Таким образом, применение одиночных импульсных воздействий дает возможность использовать, как минимум, один параметр деформационного отклика межблочной границы для идентификации качественного изменения ее напряженного состояния. Однако, если в процессе мониторинга реальной системы она остается на квазиупругой (или квазипластической) стадии, для оценки уровня сдвиговых напряжений необходимо использование других параметров. Ими могут являться параметры деформационного отклика на вибрационные воздействия, характеризующие спектральную плотность массовой скорости относительного тангенциального перемещения блоков, инициированного

вибрацией. Использование этих характеристик дает возможность идентифицировать переходную область между квазиупругой и квазипластической стадиями отклика, а также определять близость напряженного состояния границы раздела к предельному, при котором возможно возникновение неустойчивой подвижки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 09-05-00968-а, проекта №2 программы Президиума РАН №11 и гранта Президента РФ (МК-130.2010.5).

Список литературы

- [1] Ружич В.В., Трусков В.А., Черных Е.Н. и др. Современные движения в зонах Прибайкалья и механизмы их инициирования // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С. 360–372.
- [2] Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Нарушение и залечивание зон локализации деформаций в массиве горных пород // Физическая Мезомеханика. 2007. Т. 10, № 1. С. 5–18
- [3] Астафуров С.В., Шилько Е.В., Ружич В.В., Псахье С.Г. Исследование влияния локального напряженного состояния границ раздела блоков геологических сред на их отклик при динамических воздействиях // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 1. С. 67–77.
- [4] Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Иницирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая Мезомеханика. 2004. Т. 7, № 1. С. 5–22.
- [5] Псахье С.Г., Дмитриев А.И., Шилько Е.В. и др. Метод подвижных клеточных автоматов как новое направление дискретной вычислительной механики. I. Теоретическое описание // Физическая Мезомеханика. 2000. Т. 3, № 2. С. 5–15.
- [6] BEN-ZION Y., SAMMIS C.G. Characterization of fault zones // Pure and applied geophysics. 2003. V. 160. P. 677–715.