

УДК 539.0

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД С НЕРОВНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ КОНТАКТА БЛОКОВ В УСЛОВИЯХ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Б. Д. Аннин, Е. В. Карпов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mails: annin@hydro.nsc.ru, evkarpov@mail.ru

Приведены результаты экспериментального исследования влияния прослоек, состоящих из мелких частиц, или неровностей на поверхностях контакта на деформирование блочной среды в целом и разрушение блоков, из которых она состоит. Образцы подвергались нагружению квазистатическим одноосным сжатием перпендикулярно поверхностям контакта. Проводится численное моделирование распространения волн при импульсном нагружении пары блоков с неровными поверхностями контакта, выполненных из материала, имеющего упругие характеристики, близкие к характеристикам мраморов и известняков.

Ключевые слова: блочная среда, прослойки, эксперимент, численное моделирование.

Массив горных пород состоит из достаточно однородных блоков, разделенных прослойками с более слабыми прочностными свойствами [1]. Наличие таких прослоек и их характеристики оказывают значительное влияние на деформирование среды в целом, в частности на распространение в ней упругих волн [2], а также на разрушение блоков, составляющих среду. Прослойки моделируют различными способами. Так, в экспериментальных исследованиях [3] роль прослоек между твердыми блоками играют материалы типа резины, а в расчетах прослойки заменяются на упругопластические и вязкоупругие элементы, соединяющие блоки. В [4] влияние жесткости прослоек исследуется в модельных экспериментах, в которых в качестве межблочных контактов используются тонкие прослойки из различных материалов, расположенные между блоками из оргстекла.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния прослоек, состоящих из мелких частиц материала блоков, на деформирование среды в целом и разрушение блоков, из которых она состоит. Прослойка представляет собой множественные мелкие неровности на поверхностях контакта либо тонкий слой осколков различного размера (максимальный размер осколков 4 мм), разделяющий блоки с ровными торцами. В качестве модели участка блочной среды используются пары соприкасающихся торцами цементных цилиндров, подверженные одноосному квазистатическому сжатию вдоль оси симметрии.

Эксперименты проводились на машине для испытания материалов Zwick/Roell Z100 TC-FR100TL.A4K. Нагружение задавалось перемещением подвижной траверсы с постоянной скоростью 0,05 мм/мин, средняя деформация сжатия пары блоков замерялась дат-

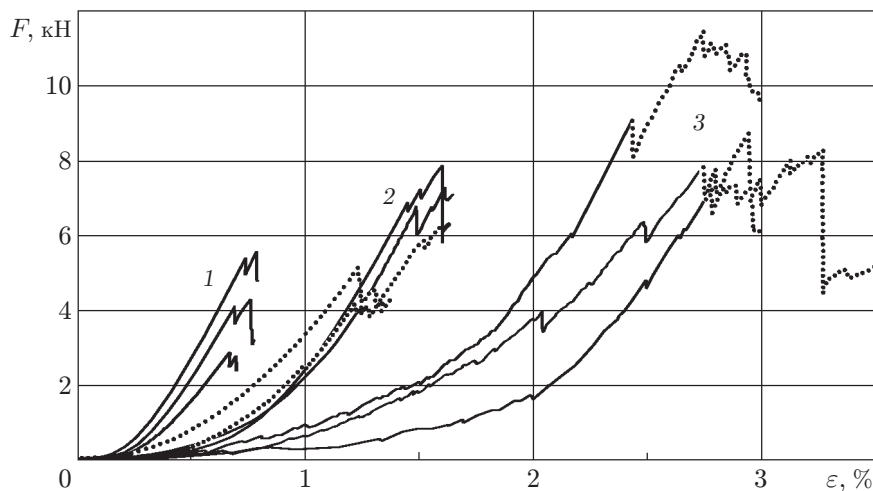


Рис. 1. Экспериментальные зависимости относительной деформации ε сжатия образцов от приложенной силы F :

1 — ровные поверхности контакта; 2 — неровные поверхности контакта; 3 — слой осколков между торцами

чиком перемещения траверсы, приложенная сила — встроенным датчиком силы. Частота записи замеров в базу данных составляла 1 с^{-1} .

Использовались цилиндрические образцы (высота и диаметр около 30 мм), изготовленные из цемента марки М-400 без дополнительных примесей. Торцы с неровностями получались при использовании пресс-форм с дном из пористого материала. При этом на торцах образцов образовывались выпуклости разных размеров, распределенные случайным образом. Крупные выпуклости (высота около 0,5 мм) занимают примерно 1/4 поверхности, пространство между ними заполнено мелкими неровностями существенно меньших размеров. Торцы, прилегающие к наковальням установки, были ровные, отделялись от наковален дюралевыми прокладками и фторопластом для уменьшения трения. Внутренняя структура материала преимущественно однородна, с небольшим количеством пустот разных размеров, образовавшихся из-за внедрения в раствор цемента пузырьков воздуха.

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости относительного уменьшения высоты ε пары образцов от приложенной силы F для цилиндров с ровными и неровными торцами, а также для цилиндров, разделенных прослойкой из осколков, полученных из образца той же партии, что и испытываемые образцы. Первоначальная толщина слоя, как и характерный размер большинства осколков, приблизительно равна 4 мм.

В случае ровных поверхностей контакта цилиндров, за исключением небольшого нелинейного участка, соответствующего начальному перераспределению напряжений в образцах, наблюдается линейная зависимость между деформацией и приложенной силой, сохраняющаяся до момента образования первых продольных трещин. По мере увеличения количества трещин жесткость пары уменьшается. Происходит разделение образцов продольными трещинами на столбики различного поперечного размера. В целом поведение пары образцов с ровными торцами аналогично поведению единого блока из хрупкого материала.

В случае неровных поверхностей контакта на протяжении всего эксперимента наблюдается нелинейная зависимость между приложенной силой и относительным уменьшением высоты пары образцов. По мере увеличения деформации сжатия жесткость пары постоянно увеличивается, до тех пор пока не начинается образование трещин. Визуальное наблюдение показывает, что процесс сжатия пары блоков имеет несколько стадий. Снача-

ла образцы контактируют посредством соприкосновения крупных выпуклостей. Площадь поверхности контакта очень мала, поэтому соприкасающиеся выпуклости разрушаются при небольшой приложенной силе. Затем крупные выпуклости на одном образце вступают в контакт с мелкими выпуклостями на другом, в результате чего площадь поверхности контакта и жесткость пары увеличиваются. Часть мелких неровностей разрушается вследствие давления крупных. Когда жесткость пары становится близкой к жесткости материала, в местах скопления крупных выпуклостей, где сосредоточены напряжения, возникающие в результате контакта образцов, образуются многочисленные трещины.

Разброс прочности образцов при одинаковых условиях нагружения может быть обусловлен неоднородностью внутренней структуры (различные размеры, количество пустот и распределение их по объему), различием сроков просушки, а также начальной плотности раствора. Кроме того, у образцов с неровными торцами на прочность влияет расположение крупных выпуклостей на торцах. В случае более равномерного их расположения прочность пары увеличивается. Так, на рис. 1 пунктирные кривые 2 соответствуют образцам, у которых ближе к центру наблюдалось сгущение крупных неровностей. Прочность этих образцов значительно меньше прочности двух других образцов, у которых крупные неровности распределены более равномерно.

В случае, когда между блоками присутствует прослойка из осколков того же материала, поведение пары блоков в целом мало отличается от поведения пары с неровными поверхностями контакта. Различие заключается в том, что разрушение блоков начинается только после полного разрушения всех осколков и превращения осколочной прослойки в достаточно однородную порошковую массу, которая не создает концентраций напряжений. На рис. 1 участки кривых 3, показанные пунктиром, соответствуют переходу от разрушения осколков прослойки к разрушению цилиндров.

Результаты экспериментов позволяют сделать следующий вывод: если среда состоит из блоков, соприкасающихся неровными поверхностями либо разделенных прослойками осколков, и нагружена сжимающей силой, направленной перпендикулярно поверхностям контакта блоков, то для моделирования ее осредненного напряженно-деформированного состояния можно использовать однородный материал, жесткость которого возрастает по мере увеличения деформации сжатия (но не может превысить жесткость самих блоков). Прослойкой из такого материала можно также заменить область контакта блоков. Кроме того, из рис. 1 следует, что несмотря на разброс прочностей образцов из одной партии, при наличии прослойки прочность пары значительно возрастает по сравнению с прочностью пары блоков, контактирующих через ровные поверхности. Возможно, такое повышение прочности вызвано тем, что при разрушении элементов прослойки между цилиндрами образуется слой цементного порошка, способствующий более равномерному распределению напряжений.

С использованием конечно-элементного комплекса ANSYS проведены численные эксперименты с целью исследования влияния неровности поверхностей контакта на распространение волн деформации продольного сжатия-растяжения в соприкасающихся двумерных блоках линейно-упругого материала. Проведено сравнение результатов расчетов с результатами, полученными при замене зоны контакта блоков тонкой однородной прослойкой с уменьшенным модулем упругости. Область контакта неровных поверхностей моделируется поперечной цепью ромбовидных отверстий, разделяющей сдвоенный блок на две равные части. Отверстия служат зазорами между соприкасающимися выпуклостями, ширина которых в наиболее узкой части одинакова для всех размеров отверстий и равна 2 мм. Аналогично межблочный контакт задается в модельных экспериментах в работе [4].

Двумерная модель (в случае плоской деформации) строится из четырехузловых конечных элементов с лагранжевым представлением упругой среды. Вблизи отверстий шаг

сетки уменьшается до значения, приблизительно равного 0,1 минимального характерного размера отверстий. Материал блоков линейно-упругий, модуль Юнга равен $35 \cdot 10^3$ МПа, плотность — 3000 кг/м^3 , коэффициент Пуассона — 0,15 (значения, близкие к характеристикам мраморов и известняков). Длина сдвоенного блока $L = 1$ м, ширина $H = 0,25$ м, расчеты проводились для различных толщин прослойки, состоящей из чередующихся отверстий и промежутков между ними (толщина прослойки d , равная размеру отверстия, менялась от 2 до 18 мм). Ширина однородной прослойки с уменьшенным модулем упругости для всех значений модуля равна 18 мм, т. е. максимальной ширине области контакта.

На правом торце сдвоенного блока не допускается перемещение в направлении приложения нагрузки, на левом задается удар силой 1 кН и продолжительностью $2 \cdot 10^{-5}$ с. Промежуток времени, на котором проводился расчет распространения упругих волн, составлял 10^{-3} с. Верхняя и нижняя границы блоков, а также контуры отверстий свободны от напряжений. Время полного прохождения начального возмущения через сдвоенный блок с возвращением к торцу, по которому наносится удар, составляло около $3 \cdot 10^{-4}$ с.

На рис. 2, 3 показано изменение характера прохождения волны при увеличении размеров неровностей на поверхностях контакта. Наблюдается увеличение максимальной амплитуды колебаний в первом блоке (по которому наносится удар) и уменьшение ее во втором. Из результатов сравнения зависимостей $\varepsilon(t)$ для различных толщин прослойки d следует, что зависимость амплитуды колебаний от толщины прослойки является нелинейной (рис. 4). На рис. 5 показаны аналогичные зависимости для случая, когда зона контакта неровных поверхностей заменена однородной прослойкой с модулем Юнга, в 10 раз меньшим, чем у материала блоков.

Обозначим через h суммарную ширину промежутков между отверстиями в цепи. При отсутствии отверстий она равна ширине блока H . Для задачи с однородной прослойкой обозначим через E модуль упругости блоков, а через E^* модуль упругости прослойки. Сравнение зависимостей $\varepsilon(t)$ для однородной прослойки при различных значениях модуля Юнга и зависимостей $\varepsilon(t)$ при различных размерах отверстий в контактной области

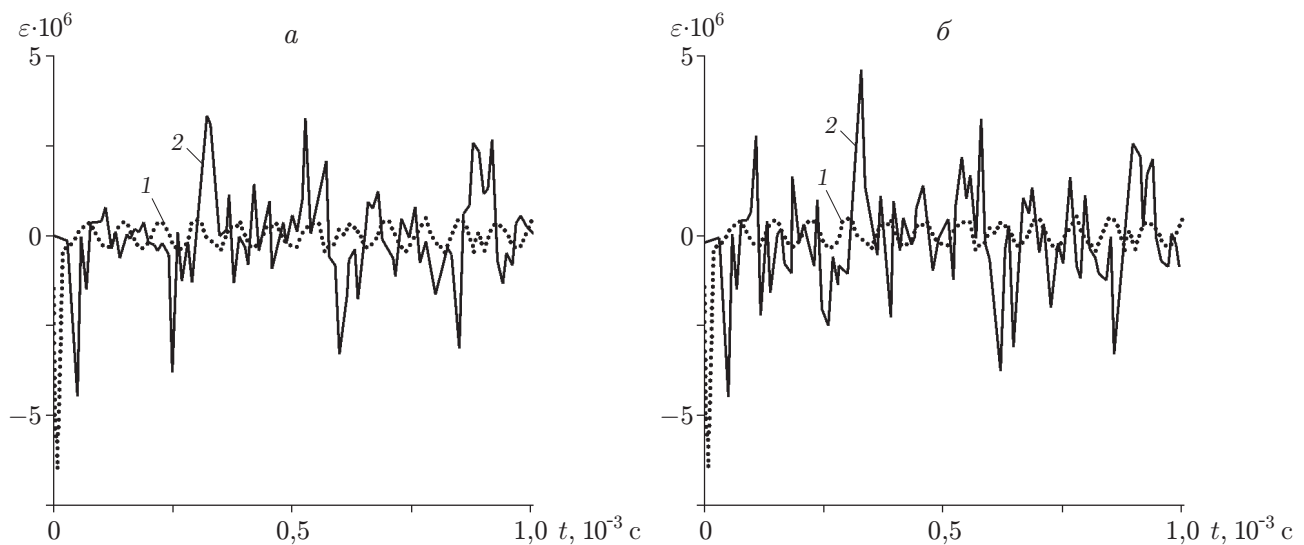


Рис. 2. Расчетные зависимости продольной деформации ε от времени t :
 а — $d = 2$ мм; б — $d = 18$ мм; 1 — точка в центре левого торца, на котором задается импульсная нагрузка; 2 — центр левого блока

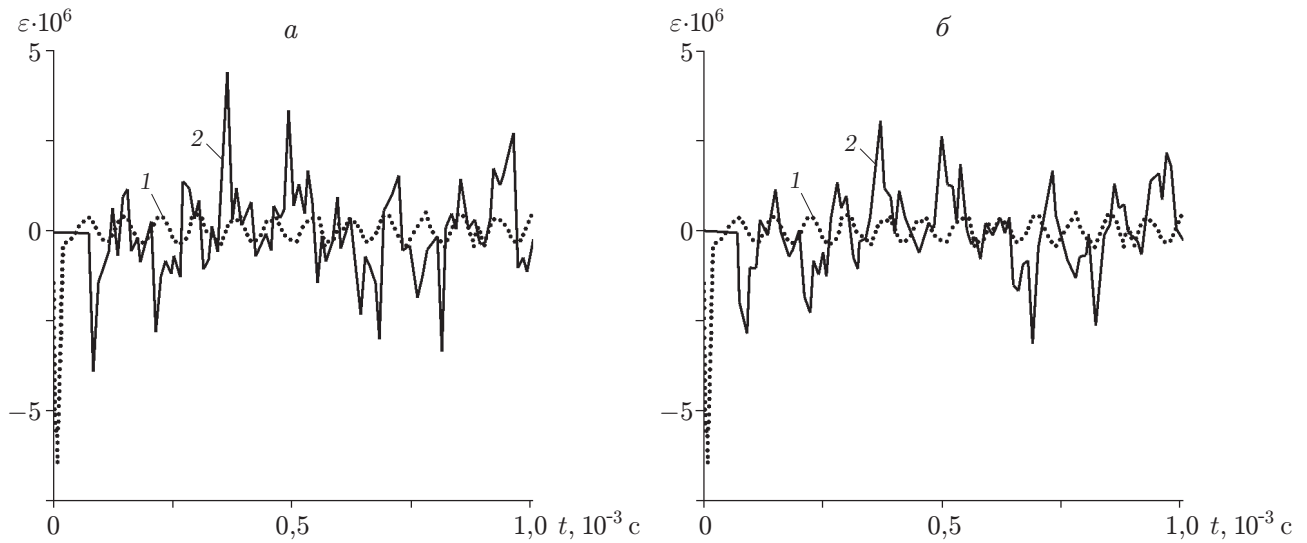


Рис. 3. Расчетные зависимости продольной деформации ε от времени t :
 а — $d = 2$ мм; б — $d = 18$ мм; 1 — точка в центре левого торца, на котором задается импульсная нагрузка; 2 — точка на продольной оси симметрии в правом блоке вблизи прослойки

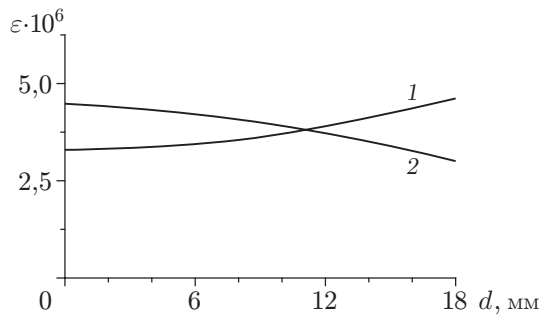


Рис. 4. Зависимость максимальной продольной деформации ε от размера d отверстий в прослойке:
 1 — левый блок; 2 — правый блок

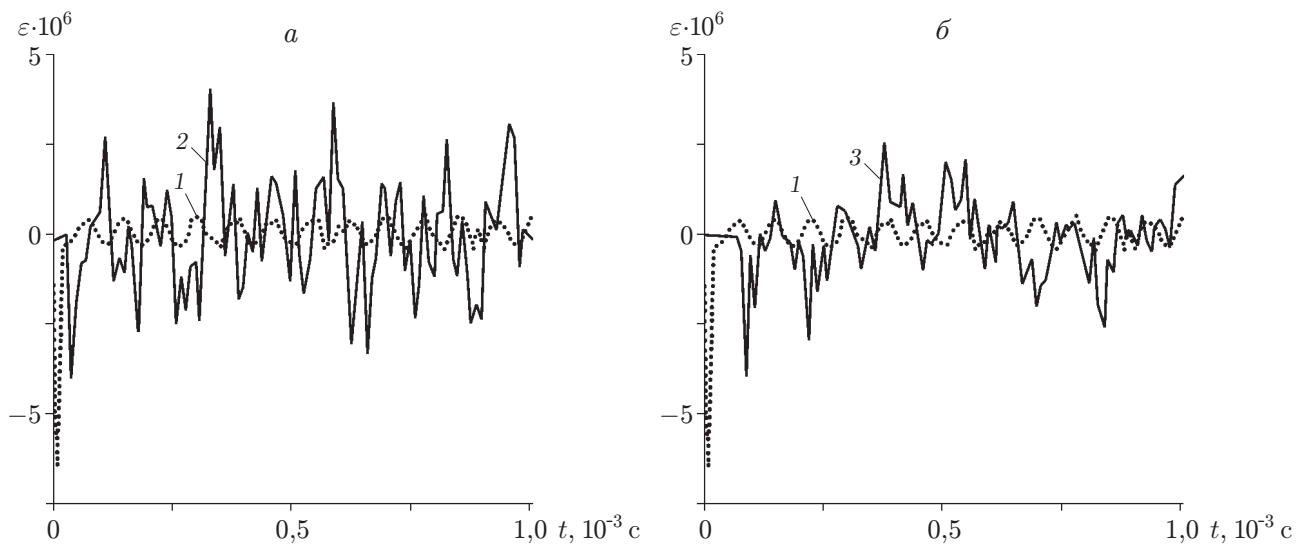


Рис. 5. Расчетные зависимости продольной деформации ε от времени t для однородной прослойки:
 1 — точка в центре левого торца, на котором задается импульсная нагрузка; 2 — центр левого блока; 3 — точка на продольной оси симметрии в правом блоке вблизи прослойки

показывает, что если

$$\frac{H}{h} \approx \frac{E}{E^*}, \quad (1)$$

то результаты расчетов оказываются достаточно близкими. Следовательно, при выполнении условия (1) область контакта неровных поверхностей блоков в задачах о распространении упругих волн деформации можно приближенно моделировать однородной прослойкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Садовский М. А.** Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 4. С. 829–831.
2. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа // Докл. РАН. 1993. Т. 333, № 4. С. 515–521.
3. **Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н.** О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2006. № 5. С. 67–74.
4. **Назаров Л. А., Шер Е. Н.** Об определении деформационных свойств нарушений сплошности // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 1. С. 129–134.

Поступила в редакцию 30/X 2006 г.
