

УДК 539.3

ВНЕДРЕНИЕ ЖЕСТКИХ УДАРНИКОВ В МАЛОПЛАСТИЧНЫЕ ХРУПКО РАЗРУШАЮЩИЕСЯ СРЕДЫ

© 2011 г.

А.И. Садырин, С.А. Пирогов

НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

sadyrin@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассмотрена система уравнений динамического деформирования и разрушения малопластичных хрупко разрушающихся сред типа бетона, керамик, скальных и полускальных горных пород с тремя предельными поверхностями: начальной поверхностью текучести, поверхностью разрушения и поверхностью течения полностью фрагментированного материала. Для напряженно-деформированных состояний (НДС) внутри поверхности текучести взаимосвязь тензоров напряжений и деформаций устанавливается законом Гука. Деформирование за пределом упругости осуществляется на основе соотношений ассоциированной теории упругопластического течения. Упругопластическое деформирование вызывает трансформацию начальной поверхности текучести и накопление повреждений. Суммирование повреждений проводится с учетом функции повреждений от параметра жесткости напряженного состояния, вида НДС и скорости деформаций. Выполнено сопоставление экспериментальных данных и эмпирических зависимостей с результатами вычислительных экспериментов по внедрению жестких ударников в массивы бетона и мрамора с различными скоростями соударения.

Ключевые слова: бетон, горные породы, внедрение, разрушение, вычислительный эксперимент.

Уравнения математической модели динамического деформирования и разрушения малопластичных хрупко разрушающихся сред типа бетона, керамик, скальных и полускальных горных пород формулируются в рамках модели поведения структурно неоднородных разносопротивляющихся сплошных сред. В зависимости от текущего уровня напряженно-деформированного состояния и процессов деформирования и разрушения среды, предшествующих текущему моменту времени, при анализе деформирования структурно неоднородных сред обычно выделяют три или четыре основных режима [1, 2]. Модель разносопротивляющейся среды при динамическом деформировании включает в себя следующие варианты поведения с соответствующими конституционными уравнениями:

1. Режим упругого деформирования, описываемый законом Гука.

2. Режим квазиравновесного (с постоянной скоростью деформаций) или неравновесного (с переменной скоростью деформаций) упругопластического деформирования среды с сопутствующими процессами упрочнения и накопления повреждений (образование несплошностей, микроповреждений, микротрещин и т. п.). Описывается ассоциированной теорией упругопластического течения. Накопление повреждений на стадии

упругопластического деформирования материала производится по схеме линейного суммирования повреждений с функцией накопления повреждений, зависящей от параметра жесткости напряженного состояния, вида напряженно-деформированного состояния и скорости деформаций.

3. Режим упругопластического деформирования материала, находящегося в полностью разрушенном (фрагментированном) состоянии. Описывается ассоциированной теорией упругопластического течения среды с нулевым сопротивлением всестороннему растяжению.

4. Режим, соответствующий процессу потере структурной прочности материала и переходом среды с микроповреждениями к полностью фрагментированному состоянию, сопровождаемый неравновесной релаксацией напряжений.

При формулировке уравнений состояния разносопротивляющейся среды вводятся три предельных поверхности: начальная поверхность текучести, поверхность разрушения и поверхность течения полностью фрагментированного материала, отделяющие в пространстве напряжений указанные четыре режима деформирования друг от друга. Уравнения предельных поверхностей зависят от интенсивности девиатора напряжений, параметра жесткости напряженного состояния (нормированный первый инвариант тензо-

ра напряжений), параметра упрочнения; параметра поврежденности, скорости деформаций и вида напряженного состояния (угол фазы девиатора напряжений или параметр Лоде).

Уровень существующих в настоящее время технических средств и экспериментальных методов при динамическом деформировании структурно неоднородных разносопротивляющихся сред позволяет получать ограниченный объем, как правило, косвенных экспериментальных данных, интегрально характеризующих кинетику отдельных составляющих указанных режимов спектра деформирования. Вследствие этого оснащение математических моделей материальными функциями и набором констант представляет собой сложную и неоднозначную процедуру. Рациональным подходом к решению этой проблемы является применение теоретико-экспериментального метода для анализа натурных и компьютерных экспериментов по динамическому деформированию и разрушению структурно неоднородных сред с последующим согласованием их результатов. Для экспериментального определения и (или) уточнения значений материальных функций и констант, входящих в указанные выше уравнения математической модели, предлагается проведение двух групп базовых экспериментов. Комплексный анализ результатов базовых натурных и согласованных с ними вычислительных экспериментов позволяет корректировать уравнения математической модели, уточнять информацию о диаграммах деформирования среды и структуре поверхности разрушения и соответствующих предельных поверхностях текучести.

В первую группу включаются серии экспериментов, использующих методику разрезного стержня Гопкинсона – Кольского с образцами среды без обоймы и образцами, заключенными в обоймы различной степени жесткости, а также проведение плосковолновых ударных экспериментов. Эти эксперименты позволяют получать динамические диаграммы деформирования при различных видах напряженного состояния и, частично, информацию о параметрах трансформации поверхности текучести и поверхности разрушения.

Представлены результаты сопоставления экспериментальных данных по динамическому деформированию бетона, полученных на установке, реализующей методику разрезного стержня Гопкинсона – Кольского, с данными компьютерного моделирования лабораторных экспериментов.

Ко второй группе относятся эксперименты по внедрению и прониканию жестких и деформируемых ударников (в прямой и обращенной постановках) с различной формой головной части в мишени из структурно неоднородных сред. В указанных экспериментах основными экспериментальными данными являются зависимости интегральных сил сопротивления внедрению ударника (величины перегрузок), финальные глубины проникания ударника в мишени и формы каверны (кратера). Рассматриваются результаты типовых экспериментов в обращенной постановке о внедрении жесткого ударника в контейнер с образцом бетона, полученных в НИИ механики ННГУ. Обращенные эксперименты проводились в диапазоне скоростей удара 50–320 м/с. Представлены результаты расчетов по сопоставлению расчетных и экспериментальных величин перегрузок и финальных глубин проникания ударников с оживальной головной частью в массивы бетона и мрамора в зависимости от условий ударного взаимодействия. Приведено сравнение временных зависимостей расчетных перегрузок, возникающих в ударнике в долях ускорения свободного падения, с экспериментальными данными при скоростях соударения 200 и 314 м/с.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также грантов РФФИ №10-01-00585а, 11-08-00545а.

Список литературы

1. Ломакин Е.В. Механика сред с зависящими от вида напряженного состояния свойствами // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10, №5. С. 41–52.
2. Садырин А.И. Модель динамического деформирования и разрушения бетона // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Нижегород. ун-т. 2003. Вып. 65. С. 5–14.

INTERACTION OF EXHAUST JETS WITH A VORTEX SHEET AND THE DEVELOPMENT OF TWO-PHASE CONDENSATION TRAIL

A.I. Sadyrin, S.A. Pirogov

A set of equations of dynamic deformation and failure is formulated for low-plastic brittle-fracture media, such as concrete, ceramics, rocks and semi-rocks with three limiting surfaces: the initial yield surface, the failure surface, and the flow surface of the fully fragmented material. For the stressed-strained states on the yield surface, the stress-strain tensor relation is described by Hook's law. Deformation over the elastic strength limit is described using the relations of the associated theory of elastoplastic

yielding. The elastoplastic deformation causes transformation of the initial yield surface and damage accumulation. The damage is summed up, accounting for the dependence of the damage function on the rigidity parameter of the stressed state, the type of the stressed-strained state and strain rates. The experimental data and empiric relations are compared with the results of computational experiments on the penetration of rigid strikers into bulk concrete and marble with various impact velocities.

Keywords: concrete, rocks, penetration, failure, numerical experiment.