

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКОЙ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЮЩЕЙСЯ СРЕДЫ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЖЕСТКИМ УДАРНИКОМ

Садырин А. И., Пирогов С. А.

*НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского,
Нижний Новгород,
sadyrin@dk.mech.unn.ru*

Во многих актуальных прикладных задачах требуется моделирование динамического деформирования и разрушения малоэластичных разносопротивляющихся материалов типа бетонов, скальных и полускальных горных пород, твердых керамик, графитов и др., соударяющихся с жесткими ударниками. В этой связи, в настоящее время активно развиваются модели поведения разносопротивляющихся сред, основанные на соотношениях дифференциальных теорий пластичности с одной или несколькими предельными поверхностями, что позволяет достаточно полно и адекватно учесть физическую нелинейность, трещинообразование и разрушение материала в условиях многоосного напряженного состояния с учетом зависимости прочностных свойств от скорости деформирования. Краткий обзор моделей подобных сред содержится в работах [1–5].

Следуя работе [5], приведем основные уравнения упругопластического деформирования и разрушения разносопротивляющихся материалов. Для девиаторных составляющих тензоров напряжений и деформаций вводятся три предельных поверхности: поверхность текучести среды с частичными повреждениями структуры, поверхность разрушения, и поверхность текучести среды с полностью нарушенной структурной прочностью. В зависимости от текущего уровня напряженно-деформированного состояния, процессов деформирования и разрушения среды, предшествующих текущему моменту времени, модель разносопротивляющейся среды включает следующие варианты состояния среды с соответствующими конституционными уравнениями поведения.

Состояние (А) упругого деформирования описывается законом Гука для изотропной однофазной среды. Зона упругого поведения материала ограничивается уравнением поверхности текучести с частичными повреждениями структуры следующего вида:

$$F_p(\sigma_{ij}, \dot{\epsilon}, \vartheta, \omega) = \bar{\sigma} - \left(A_p - \frac{B_p \bar{I}}{1 - \gamma B_p \bar{I}} \right) \beta(\varphi) q(\omega, \vartheta) = 0, \quad (1)$$

Здесь $\bar{\sigma}$, и \bar{I} – интенсивность девиатора напряжений $\sigma_{ij} = \sqrt{1,5 \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}}$ и первый инвариант тензора напряжений $I = \sigma_{ij} \delta_{ij}$, соответственно, отнесенные к величине предела прочности при одноосном сжатии σ_c ; ϑ – параметр упрочнения; $\omega \in [0, 1]$ – параметр поврежденности; $\beta(\varphi)$ – функция, описывающая влияние угла φ фазы девиатора напряжений; A_p, B_p, γ – функции скорости деформаций $\dot{\epsilon}$, определяемые через экспериментальные данные о пределах текучести при одноосном сжатии σ_{Tc}^0 и одноосном растяжении σ_{Tp}^0 .

Состояние (В) соответствует процессу равновесного упругопластического деформирования среды с законом течения, ассоциированным с уравнением поверхности те-

кучести (1). Неубывающая функция $q(\vartheta)$ описывает изотропное деформационное упрочнение, которому и сопутствует процесс накопления частичных повреждений материала. Количественно повреждения описываются скалярным параметром поврежденности $0 \leq \omega \leq 1$, при вычислении которого используется схема линейного суммирования повреждений. Разрушение среды наступает при выполнении равенства $\omega = 1$, соответствующего условию разрушения текущей поверхности текучести (1) в точке нагружения поверхности текучести, задаваемой в следующем виде

$$F_f(\sigma_{ij}, \dot{e}) = \bar{\sigma}_i^2 + \frac{C_f}{f(\varphi)} \bar{\sigma}_i + B_f \bar{I} - A_f = 0. \quad (2)$$

Здесь $f(\varphi)$ – функция, описывающая влияние угла φ фазы девиатора напряжений, A_f, B_f, C_f – функции скорости деформаций \dot{e} , определяемые через экспериментальные данные о пределах прочности при одноосном сжатии σ_c , одноосном растяжении σ_p и двухосном сжатии σ_{cc} .

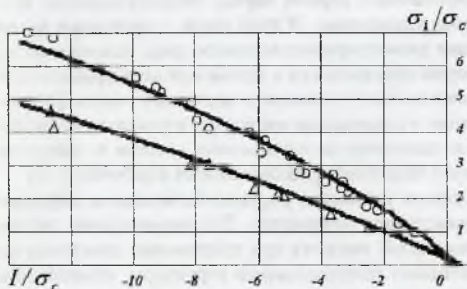


Рис. 1.

На рис. 1 представлено сравнение экспериментальных данных [6,7] по разрушению бетона для двух предельных значений угла φ , т. н. меридианов растяжения и сжатия, с предсказаниями уравнения (2). Наблюдается удовлетворительное количественное и качественное согласие экспериментальных расчетных данных, а также существенное влияние вида напряженного состояния, оказываемое на разрушающие напряжения. Согласование расположения поверхно-

сти текучести (1) в пространстве напряжений относительного поверхности разрушения (2) осуществляется по предельному уровню необратимых деформаций при разрушении, вычисляемых на основе экспериментальной аппроксимации диаграммы деформирования. Хорошую аппроксимацию реальных диаграм деформирования материалов типа бетонов, скальных и полускальных горных пород дает следующая зависимость:

$$\sigma_{Tc}(e_i) = \sigma_{Tc}^0 + \frac{3GC_p(e_i - e_{i0})}{C_p + (e_i - e_{i0})}. \quad (3)$$

Здесь σ_{Tc} , $\sigma_{Tc}^0(I)$ – текущий и начальный пределы упругости; G – модуль сдвига; e_{i0} , e_i – интенсивности девиатора деформаций на пределе упругости $\sigma_{Tc}^0(I)$ и в текущем состоянии, соответственно; C_p – константа аппроксимации экспериментальной диаграммы деформирования $\sigma_{Tc}(e_i)$.

Состояние (С), соответствующее поведению материала в разрушенном состоянии, описывается моделью упругопластической среды с нулевым сопротивлением растяжению. Закон течения ассоциируется с поверхностью текучести среды с полностью нарушенной структурной прочностью, предложенной в работе [1] для описания поведения фрагментированных скальных и полускальных горных пород при динамических воздействиях:

$$F_{pf}(\sigma_{ij}, I, \dot{\epsilon}) = \dot{\sigma}_i + \frac{B_{pf} \dot{I}}{1 - \gamma_f B_{pf} \dot{I}} = 0, \quad (4)$$

Здесь B_{pf}, γ_f – экспериментально определяемые параметры. При выполнении условия $F_{pf}(\sigma_{ij}, I, \dot{\epsilon}) < 0$ реализуется состояние упругого деформирования (А).

Состояние (ВС) соответствует неравновесному переходу от состояния (В) к состоянию (С) и сопровождается релаксацией напряжений с поверхности (2) на поверхность (4). На диаграмме деформирования (3) данный переход соответствует ниспадающей (неравновесной) ветви диаграммы.

При тестировании предложенной модели деформирования и разрушения разнородных сред было проведено сравнение с экспериментальными данными результатов расчета по прониканию в разрушающуюся бетонную преграду сфероконического ударника [10]. Исследовалось ударное взаимодействие жесткого стального ударника сфероконической формы с преградой из бетона. Мишень представляла собой цилиндр, длиной 6,7 см и радиусом 2,7 см, выполненный из мелкозернистого бетона. Расчетная схема данной задачи (момент времени $t = 0$ мс) и конфигурация расчетной области для двух моментов времени процесса внедрения ударника (моменты времени $t = 0,2$ и $t = 0,34$ мс) изображены на рис. 2.

В силу осевой симметрии рассматриваются половины осевого сечения соударяющихся тел. Начальные условия соответствовали движению с начальными скоростями 212 м/с и 217 м/с упруго деформирующегося ударника и свободных от напряжений ударника и мишени. Черточками и точками на рис. 2 отмечены зоны разрушения.

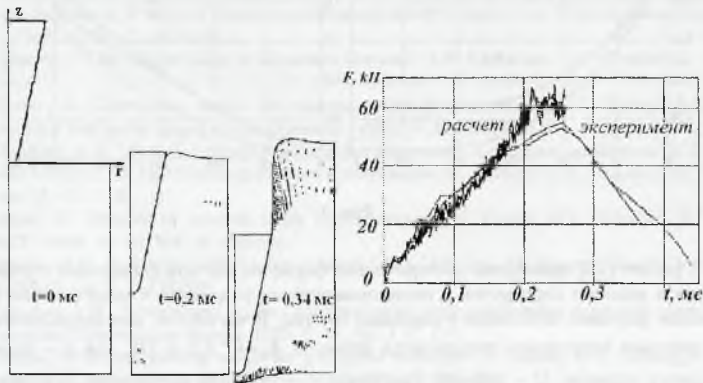


Рис. 2.

Для описания взаимосвязи шаровых компонент тензоров напряжений и деформаций при динамическом деформировании сред с начальной пористостью применяется известные соотношения $P - \alpha$ модели [8]. В рамках предложенных соотношений взаимное влияние девиаторных компонент тензора напряжений и шаровой составляющей напряжений в пористых малоупругих средах учитывается двояким образом. Во-первых, это влияние проявляется через дилатансионный эффект разуплотнения при появлении необратимых деформаций сдвига. Во-вторых, наличие девиаторной составляющей тензора напряжений снижает сопротивление необратимому уплотнению пористой среды, приближенно описываемое зависимостью в виде эллиптической CAP-кривой [9].

К моменту времени $t = 0,34$ мс разрушения в мишени становятся обширными, сопровождаются отколами с тыльной и фронтальной частями, что согласуется с характером дробления мишени, наблюдаемом в эксперименте. Здесь же представлены расчетная кривая и экспериментальные зависимости сил сопротивления внедрению (интегральные контактные силы) от времени. Процесс внедрения в массив бетона ударника с оживальной головной частью иллюстрирует рис. 3, где представлены для скоростей удара 400 м/с и 500 м/с изменения величины перегрузок \bar{g} в ударнике и глубин внедрения \bar{d} , отнесенных к начальной длине ударника, в зависимости от времени, а также сравнение расчетных финальных глубин проникания для скоростей удара 250, 320, 400 и 500 м/с (кривая 3) с предсказаниями двух альтернативных эмпирических формул Национального комитета США по обороне [11] (кривые 1 и 2).

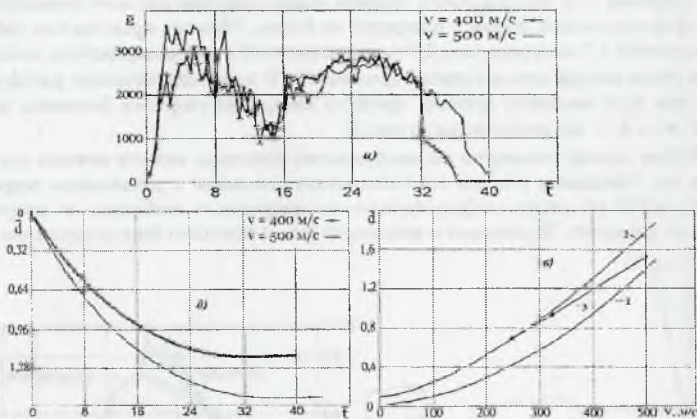


Рис. 3.

В работе [12] приведены эмпирические формулы расчета финальных глубин проникания и величин перегрузок в недеформируемых ударниках с коническими и оживальными формами оголовков в скальные грунты. В частности, для нахождения среднего значения перегрузки предлагается формула $\bar{g}_0 = V_s^2 / (2 \cdot g \cdot D)$, где g – ускорение свободного падения, D – диаметр ударника, V_s – скорость соударения. Максимальное значение перегрузки \bar{g} определяется формулой: $\bar{g} = 1,5\bar{g}_0$. На рис. 4 представлены результаты сравнения расчетных перегрузок \bar{g} и финальных глубин \bar{d} при проникании ударника с оживальной головной частью в массив мрамора с предсказаниями эмпирических формул для скоростей удара 100, 150, 200, 250 и 300 м/с.

Механические характеристики для оснащения расчетных моделей бетона и мрамора были взяты из работ [1, 10, 13, 14]. Из представленных результатов видно, что в целом наблюдается удовлетворительное количественное и качественное согласие результатов расчета с экспериментальными данными и эмпирическими зависимостями, что подтверждает неплохие предсказательные возможности предложенной модели деформирования и разрушения бетона и твердых горных пород при внедрении в них малореформируемых ударников.

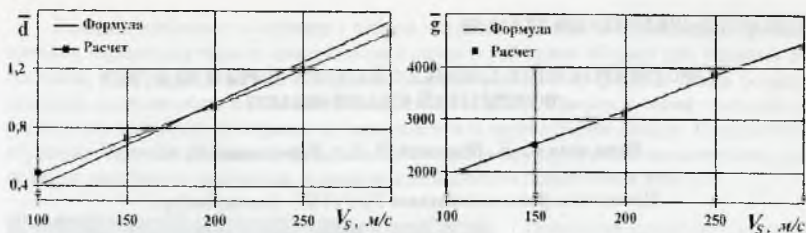


Рис. 4.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам НИИ механики ННГУ А.М. Бразову за предоставленные экспериментальные данные, С.В. Крылову и Е.В. Цветковой за проведение компьютерных расчетов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 07-01-00257а

Список литературы

1. Замышляев, Б.В. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред/ Б.В. Замышляев, Л.С. Евтерев. -М.: Наука, 1990. -215 с.
2. Драгон, А. Континуальная модель пластически-хрупкого поведения скальных пород и бетона/ А. Драгон, З. Мруз.// Механика деформируемых твердых тел. Направления развития. - М.: Мир. -1983. -С. 163-188.
3. Карпенко, Н.И. Общие модели механики бетона / Н.И. Карпенко. -М.: Стойиздат, 1996. - 416 с.
4. Bicanic, N. Constitutive model for concrete under dynamic loading/ N. Bicanic, O.C. Zienkiewicz // Earthquake Engng Struct. Dynamic. -1981. V. 11, -P. 689-710.
5. Садырин, А.И. Модель динамического деформирования и разрушения бетона/ А.И. Садырин// Межвуз. сб. Проблемы прочности и пластичности. -Н.Новгород: Изд-во ННГУ. 2003. Вып. 65. -С. 5-14.
6. Kupfer, H. Behavior of concrete under biaxial stresses/ H. Kupfer, H.K. Hilsdorf, H.J. Rusch //ACI. -1969. -V. 66, №8. -P. 656-666.
7. Ottosen, N.S. A failure criterion for concrete/ N.S. Ottosen. //J. Engng. Mech. Div. ASCE 103(EM4)-1977. P. 527-535.
8. Садырин А.И. Уточненная модель пластического деформирования пористой среды / А.И. Садырин//Химическая физика. 1995. Т. 14, №2-3. С. 136.
9. Sandler, I. Generalized cap model for geological materials / I. Sandler, F. L. DiMaggio, G. Y. Baladi // J. Geotech. Div. ASCE 102 GT7 (July 1976) P. 683-699.
10. Садырин, А.И. Моделирование процесса внедрения жесткого ударника в бетонную преграду /А.И. Садырин, С.В. Крылов, С.А. Пирогов, Е.В. Цветкова// Межвуз. сб. Проблемы прочности и пластичности. -Н.Новгород: Изд-во ННГУ. 2006. Вып. 68. -С. 66-77.
11. Kennedy, R.P. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. / R.P. Kennedy // Nucl. Eng and Design, 1976, №37.
12. C.W. Young. 1997. Penetration Equations, Contractor Report, SAND 97-2426, Sandia National Laboratories, Albuquerque, N.Mex., October.
13. Физика взрыва/ Под ред. Л.П. Орленко М. Т. 2: Физматлит, 2002 823 С.
14. Трунин, Р.Ф. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Р.Ф. Трунин и др. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001 426 С.