ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/122

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ В РАМКАХ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

¹Григорьев А.С., ^{1,2}Шилько Е.В., ²Скрипняк В.А., ^{1,2}Псахье С.Г.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

²*НИИ Томский государственный университет, Томск, Россия*

Численное моделирование является перспективным инструментом для изучения поведения материалов при динамической нагрузке. Широко распространенными численными методами для моделирования реакции материала на динамическую нагрузку являются методы конечных и конечных разностей. Математические формализмы этих методов делают возможным численное решение сложных задач механики твердого тела, в том числе динамического. В то же время применение этих методов к динамическим задачам сопряжено с трудностями при моделировании ветвления трещин и разрушения, сопровождающегося интенсивным массопереносом и перемешиванием фрагментов.

Эффективным инструментом для численного решения задач, связанных с комплексным разрушением твердых тел, является метод дискретных элементов (МДЭ). Несмотря на интенсивное использование МДЭ для численного исследования деформирования и разрушения хрупких материалов, математический формализм этого метода остается ограниченным квазистатическими моделями неупругого поведения материалов. Поэтому целью этой работы является развитие математического формализма МДЭ для моделирования поведения хрупких материалов при динамическом воздействии.

Разработана модель динамического поведения хрупких материалов на основе кинетической теории прочности, впервые предложенной Журковым [1] и получившей развитие в работах Морозова и Петрова [2]. Модель учитывает чувствительность неупругих и прочностных параметров к скорости деформирования и позволяет моделировать динамическое поведение хрупких материалов при $\dot{\epsilon} \leq 10^3 \text{ с}^{-1}$. Разработанная модель представляет собой модификацию классической «статической» модели пластичности Николаевского [3] и модели разрушения с двухпараметрическим критерием Друкера и Прагера [4]. Особенностью предложенной динамической модели является использование «силовой» формы (1) критериев наступления предельного состояния вместо интегральной формы, которая традиционно используется в моделях, основанных на кинетической теории прочности:

$$\sigma(t) = \sigma_{crit}^{dyn}(t - t_0) H(t_0 + \tau - t), \quad (1)$$

где $\sigma(t)$ – параметр, характеризующий напряженное состояние, $\sigma_{crit}^{dyn}(t - t_0)$ – динамическое значение предельного напряжения (при котором наступает разрушение или переход к неупругому поведению), $H(t_0 + \tau - t)$ – функция Хевисайда, t_0 – время преодоления статического значения предельного напряжения, τ – время инкубации [2]. Реализация критериев наступления предельного состояния такого вида в рамках МДЭ позволяет описывать динамический неупругий отклик хрупких материалов (при скоростях деформации до $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$) без изменения основ формализма базовых («статических») моделей пластичности и прочности.

Динамическое поведение материала обычно описывается через зависимости параметров модели от скорости деформации. Скорость деформации представляет собой технический параметр, который характеризует среднюю деформацию в образце. В то же время существует физический параметр, характеризующий процесс деградации/разрушения материала в рассматриваемом масштабе при приложении нагрузки – время релаксации напряжений. Поскольку в хрупких материалах основным механизмом релаксации напряжений является накопление микрповреждений и формирование системы трещин, то характерное время протекания этих процессов можно считать равным соответствующему локальному значению времени релаксации напряжений. Поэтому время релаксации в качестве физического

Секция 3. Проблемы компьютерного конструирования материалов с иерархической структурой

параметра деградации/разрушения является предпочтительным для использования в качестве ключевого параметра модели динамического поведения.

Основной проблемой, возникающей при применении этой модели для решения прикладных задач, является определение зависимостей параметров модели (пределов прочности и сцепления) от времени зарождения несплошностей соответствующего масштаба. Для определения этих зависимостей для рассматриваемого материала требуется серия лабораторных динамических тестов. В работе предложен альтернативный способ решения этой проблемы. В частности, предлагается оценить требуемые зависимости исходя из доступных экспериментальных данных о зависимостях механических характеристик различных хрупких материалов от скорости деформации.

Разработанная модель динамического механического поведения хрупких материалов была реализована и верифицирована в рамках одного из представителей МДЭ – метода подвижных клеточных автоматов [5]. Верификация разработанной модели проводилась на примере моделирования испытаний образцов хрупких материалов на одноосное сжатие и растяжение с постоянной скоростью. Скорость деформирования варьировалась в пределах от 10^{-3} с^{-1} до 10^3 с^{-1} . Образцы имели прямоугольную форму и габариты 9x6 мм. В качестве материалов образцов были выбраны бетон нормальной прочности и консолидированный песчаник. Механические характеристики выбранных материалов приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Механические характеристики модельных материалов.

	Бетон	Песчаник
Плотность, кг/м ³	4660	2200
Модуль Юнга, ГПа	38.6	16
Коэффициент Пуассона	0.194	0.28
Сцепление, МПа	8	15.4
Коэффициент внутреннего трения	0.63	0.57
Предел прочности на сжатие	45.8	70
Предел прочности на растяжение	21	31.5

Результаты моделирования показали, что предложенная модель динамического механического поведения хрупких материалов корректно описывает особенности динамического поведения различных хрупких материалов в диапазоне скоростей деформации $10^{-3} \text{ с}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^3 \text{ с}^{-1}$. А именно, интегральные значения пределов прочности и сцепления, регистрируемые в модельных образцах в ходе испытаний, увеличиваются с ростом постоянной скорости нагружения в соответствии с экспериментальными данными, которые были использованы для построения зависимостей параметров модели от времени зарождения несплошностей соответствующего масштаба.

Литература

1. S.N. Zhurkov, Kinetic concept of the strength of solids // Int. J. Fracture. 1984. V. 26(4). P. 295-307. <https://doi.org/10.1007/BF00962961>
2. N.F. Morozov, Yu.V. Petrov, Incubation time based testing of materials // Eur. J. Mech. A/Solids. 2006. V. 25(4). P. 670-676. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2006.05.005>
3. Yu.P. Stefanov, Deformation localization and fracture in geomaterials. Numerical simulation // Phys. Mesomech. 2002. V. 5(5–6). P. 67–77.
4. L.R. Alejano, A. Bobet, Drucker–Prager Criterion // Rock Mech. Rock Eng. 2012. V. 45(6) P. 995-999. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0278-2>
5. S.G. Psakhie, E.V. Shilko, A.S. Grigoriev, S.V. Astafurov, A.V. Dimaki, A.Yu. Smolin, A mathematical model of particle–particle interaction for discrete element based modeling of deformation and fracture of heterogeneous elastic–plastic materials // Eng. Fract. Mech. 2014. V.130. P. 96-115. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.04.034>