ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

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

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/78

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ
ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ**

¹Пашков С.В., ^{1,2}Зелепугин С.А., ^{1,2}Янов Д.В.

¹*НИИ Прикладной математики и механики Томского государственного университета*

²*Томский научный центр СО РАН, Томск*

Во многих задачах разрушения фрагментация является существенно вероятностным процессом, который определяется стохастическим характером распределения неоднородностей внутренней структуры материала. Описан вероятностный подход, позволяющий в достаточно простой форме, практически без усложнения модели и дополнительных экспериментов, моделировать структурные неоднородности материала. С использованием экспериментальных данных и результатов численного моделирования показано, что введение в модель материала всего одного дополнительного параметра (дисперсии распределения прочностных свойств) позволяет на любом масштабном уровне моделирования структуры придать процессу трещинообразования вероятностный характер, что соответствует теоретическим представлениям и экспериментальным данным. Начальные неоднородности и дефекты структуры материала моделируются тем, что прочностные характеристики материала распределяются по выбранному закону распределения по ячейкам расчетной области. Показано, что осколочные спектры, полученные с использованием разных законов распределения с одинаковой дисперсией, совпадают с точностью до вероятностного фактора [1], что позволяет использовать в расчетах любой закон распределения.

Для придания процессу вероятностного характера, приближенного к реальности, распределение прочностных характеристик по объёму образца (узлам и ячейкам расчетной области) должно обеспечивать некий разброс предельных состояний материала, при которых начинается образование микротрещин. При этом информация о реальной внутренней структуре становится избыточной и даже для композитов при численном моделировании становится возможным использовать эффективные значения физико-механических и прочностных характеристик.

Численные эксперименты с разрушением толстостенных цилиндрических оболочек [1] показали, что на формирование осколочного спектра дисперсия начального распределения прочностных свойств оказывает более сильное влияние, чем его форма. Это снижает требования, предъявляемые к выбору закона распределения и позволяет в аналитических и численных расчетах с одинаковым успехом использовать практически любой унимодальный закон распределения, в частности, нормальный как наиболее удобный. Определяющее влияние дисперсии распределения вполне согласуется с теоретическими представлениями – реализоваться в макротрещины смогут не все дефекты структуры, а лишь те, чьё отклонение от среднего значения превышает определенную величину. Другими словами, формирование осколочного спектра для конкретной задачи определяется ограниченным участком функции распределения предельных значений. Ширина этого участка зависит от скорости деформации и определяется исходя из условия распространения волн разгрузки (от первых микротрещин) на весь объём разрушаемого образца. В дальнейшем происходит локализация деформаций, рост и слияние трещин и вид функции распределения на оставшемся диапазоне уже практически не влияет на крупную фракцию осколочного спектра.

Авторы предлагают использовать нормальное распределение, как более обоснованное теоретически и удобное для моделирования, в отличие от распространённого подхода [2], в котором используется распределение Вейбулла, вытекающее из степенной «функции катастроф» в теории Мотта. При отсутствии привязки к эксперименту используется, как правило, дисперсия, соответствующая 10-процентному практическому интервалу (99% значений случайной величины попадают в интервал $\pm 10\%$ от номинального значения [1]). Уменьшение дисперсии, как правило, увеличивает мелкую фракцию осколочного спектра, увеличение – увеличивает крупную фракцию. Использование нормального закона для

Секция 2. Неустойчивость и локализация деформации и разрушения в материалах с иерархической структурой

распределения позволяет достаточно легко математически выделить интересующий интервал и исключить нефизические значения случайных величин.

Разрушение стального кольца (рис.1), надетого на заполненную взрывчатим веществом металлическую трубу [2, 3] также является хорошей иллюстрацией вероятностного подхода, так как схема эксперимента обеспечивает достаточно равномерную радиальную скорость. В связи с тем, что скорость деформации практически одинакова для всех точек кольца, разделение его на фрагменты происходит благодаря наличию внутренних неоднородностей и локализации деформаций на самых крупных из них. Итоговый осколочный спектр, полученный в работе [4] с использованием описываемого подхода, качественно и количественно согласуется с результатами экспериментов [3] как по количеству формируемых фрагментов, так и по их массам. Стоит отметить, что в [3] авторы также приходят к выводу, что выбор закона распределения не оказывает на осколочный спектр существенного влияния.

Рис. 1 – Взрывное разрушение кольца: а) расчёт [4];
б) сравнение результатов расчёта [4] с экспериментом [3].

Предложенный вероятностный подход может использоваться при любом шаге сетки и на любом уровне многоуровневого моделирования, обеспечивая распределение неоднородностей характерного размера. Это позволяет повысить точность расчетов и снять ограничения классического подхода к численному моделированию задач разрушения, решая их в наиболее приближенной к реальности постановке. В рамках данного подхода лишь вносится стохастический фактор, поэтому не требуется специальных экспериментов для предварительного исследования структуры материала. Подход может применяться при использовании любых моделей материала и критериев разрушения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10264).

1. Пашков С.В. Влияние распределения дефектов структуры на осколочный спектр при моделировании взрывного разрушения толстостенных цилиндрических оболочек // Труды ТГУ. Серия физико-математическая. 2018, Том 302, С. 204-211.
2. Lambert D.E., Weiderhold J., Osborn J., Hopson M.V. Explosively driven fragmentation experiments for continuum damage modelling // Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 2012, Vol. 134, Issue 3, 031209.
3. Diep Q.B., Moxnes J.F., Nevstad G. Fragmentation of projectiles and steel rings using 3D numerical simulations // Proc. 21th Int. Symp. on Ballistics, 19–23 April 2004, Adelaide, Australia, 2004. P. 752.
4. Герасимов А.В., Пашков С.В. Численное моделирование пробития слоистых преград // Механика композиционных материалов и конструкций, 2013, Том 19, №1, С. 49-62.