

Сведения о выполненных работах и  
полученных научных результатах в 2023 году

по проекту «**Исследование процесса взаимодействия металлических ударников  
с пластинами из перспективных материалов**»,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 23-29-00257

Руководитель: д-р физ.-мат. наук Глазырин Виктор Парфирьевич

В соответствии с планом работ по проекту на 2023 год проведено совершенствование физико-математической модели поведения материалов, учитывающей сжимаемость, волновой характер деформирования, кинетику разрушения, градиентное распределение прочности, начальную анизотропию, и фрагментарное выделение зон разрушения.

Считается, что разрушения в среде происходят при достижении в какой-то точке главным растягивающим напряжением значения откольной прочности (силовой критерий), либо при достижении параметра пористости некоторого предельного значения (скалярный критерий). При прогнозировании сдвиговых разрушений используется критерий, где мерой повреждения материала является удельная работа сдвиговых пластических деформаций. В случае выполнения одного из вышеперечисленных критериев в какой-либо точке среды в ее ближайшей окрестности образуется проходящая через данную точку контактная поверхность, которая в процессе деформирования может стать свободной поверхностью. Таким образом, при моделировании допускается появление новых свободных поверхностей, в том числе разделяющих рассматриваемое тело на отдельные фрагменты, тем самым достигается фрагментарное выделение зон разрушения. Градиентное распределение прочности по рассматриваемому образцу задается путем введения функциональной зависимости критических значений параметров разрушений от соответствующей координаты. Зависимость может быть как линейной, так и нелинейной. Главное, чтобы она соответствовала реальному распределению прочности по рассчитываемой области. Известно, что прочность ряда материалов при сжатии и растяжении в какой-то степени отличается, что и определяет начальную анизотропию прочностных свойств. В связи с этим в модели предусмотрено использование предела текучести на растяжение ( $\sigma_{ij} > 0$ ) и сжатие ( $\sigma_{ij} < 0$ ).

Проведено совершенствование численного метода решения пространственных многоконтактных динамических задач применительно к определению полей напряжений, деформации и зон разрушения образцов. Учтён силовой критерий для описания фрагментарного разрушения материала. В методе численного решения заложена возможность выделения поверхностей разрыва сплошности материала с учетом вышеописанных модельных представлений. В каждом расчетном элементе вычисляются главные растягивающие напряжения. При выполнении силового или скалярного критерия разрушения вычисляется главная площадка, которая переносится параллельно из центра рассматриваемой ячейки в ближайший к ней узел. Затем данный узел расщепляется в направлении плоскости этой площадки.

При выполнении сдвигового критерия разрушения, рассматриваемый узел расщепляется по прямой, лежащей в плоскости действия максимальных касательных напряжений. Механизм разрушения расчетных элементов вводится на свободных и контактных поверхностях подобно эрозионному процессу.

Разработаны средств математического моделирования процессов высокоскоростного деформирования и разрушения тел с учетом фрагментации и неоднородного распределения прочностных свойств по пространству в широком диапазоне начальных условий. Для случая плоской и осевой симметрии в двумерной постановке создан многофункциональный пользовательский программный комплекс применительно к численному решению современных многоконтактных динамических задач механики деформируемого твердого тела. Комплекс состоит из программы-просмотрщика, программы-решателя и нескольких дополнительных программ. Все программы написаны на алгоритмическом языке Си++.

Проведены эксперименты по пробитию преград из алюминиевых сплавов стальными сферическими ударниками на баллистическом стенде, который состоит из универсальной станины с метательной установкой, вакуумируемой камеры и измерительного комплекса. Точность метода регистрации индукционным измерителем скорости метания проверялась с помощью использования рам-мишеней. Результаты проверки показали, что ошибка измерения скорости ударника не превышает 0,2 процента.

При проведении экспериментов в качестве ударников использовались шарики из стали ШХ15, диаметром 0,8 см и 1,27 см. В качестве преград использованы пластины, толщиной 0,6 см, из алюминиевого сплава Д16. Скорость ударников изменялась в пределах от 100 м/с до 900 м/с. В результате проведенных экспериментов получены зависимости запреградной скорости ударника от его начальной скорости, а также значения баллистического предела или предельной скорости пробития конкретной преграды. Установлено, что зависимость запреградной скорости ударника в квадрате от его начальной скорости в квадрате близка к линейной. Баллистический предел преграды для ударника в виде шарика, диаметром 0,8 см получился равным 354 м/с. Баллистический предел преграды для ударника в виде шарика, диаметром 1,27 см получился равным 324 м/с, т.е. на 9,3 % меньше.

При помощи тестовых расчетов проверено качественное и количественное соответствие численного решения параметрам моделируемого процесса, а также бесспорным физическим соображениям в рамках механики твердого тела. Рассчитанные значения интегральных параметров ударного взаимодействия конкретных материалов (амплитуда и скорость волны, глубина внедрения, остаточная скорость и т.п.) сравнивались с соответствующими экспериментальными данными. Кроме того, амплитуда и скорость волны сравнивались с результатами аналитического решения Ренкина-Гюгонио. Решена задача о глубоком внедрении удлиненных ударников двух типов в «полубесконечные» преграды. Получено, что расхождение между расчетной глубиной проникания и полученной в эксперименте для обоих типов ударников незначительно. При обработке результатов расчетов и экспериментов выявлено, что расхождение не превышало 5 %.