

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОБИТИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРЕГРАД СФЕРИЧЕСКИМ УДАРНИКОМ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 460 ДО 700 М/С

М.Ю. Орлов, В.П. Глазырин, Т.В. Фазылов

Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация

E-mail: orloff_m@mail.ru

Аннотация. Численно изучен процесс пробития сферическим ударником однородных и упрочненных алюминиевых преград в диапазоне начальных скоростей от 460 до 700 м/с. В качестве упрочненных образцов рассмотрены алюминиевые образцы с завышенными значениями предела текучести, откольной прочности и удельной работы сдвиговых пластических деформаций. Материал моделировался упруго-пластической, пористой, сжимаемой средой с учетом свойств прочности, ударно-волновых явлений и совместного образования разрушений по типу отрыва и сдвига. Определяющие соотношения задавались уравнениями Прандтля–Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния выбрано в форме Уолша. В качестве основного инструмента исследований использовался численный лагранжев метод, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Расчеты проведены в двумерной осесимметричной постановке при помощи последней версии конечно-элементного решателя «Удар.Ос.2». Проведен анализ чувствительности сетки и предложена наиболее эффективная конечно-элементная модель. Расчетами установлено, что во всех случаях упрочнение образцов приводило к повышению их ударной стойкости. Хотя преграды были насквозь пробиты, образцы с завышенным значением сдвиговой прочности оказывали большее сопротивление действию ударника. Баллистические кривые совпадали на некоторых стадиях процесса, а выбитая из преград «пробка» имела разрушения средней и сильной степени.

Ключевые слова: высокоскоростной ударник; алюминиевая мишень; модель и метод; пробитие и проникание; ударная стойкость.

Введение

Процессы, протекающие в твердых телах при динамических нагрузках, являются предметом фундаментальных и прикладных исследований во всем мире. В работах [1–5] приведены последние достижения в области физического и математического моделирования процессов пробития и проникания ударников в конструкции из перспективных материалов. Там же указаны границы применимости аналитических методов и представлены верифицированные аналитические зависимости для расчета ударной стойкости конструкций и пробивного действия ударников. Несмотря на все многообразие методик моделирования, все еще актуальным является разработка и модификация уже имеющихся численных методов путем усовершенствования алгоритмов расчетов, критериев разрушения и т. п.

Обзор научно-технической и патентной литературы в настоящее время показывает, что как у нас в стране, так и за рубежом малоизученными являются вопросы динамики деформирования и разрушения материалов при действии ударных и ударно-волновых нагрузок. Основное достоинство развиваемого авторами подхода заключается в том, что он позволяет проследить по времени процесс деформирования и разрушения материала, а также иметь полную информацию о напряженно-деформированном и термодинамическом состоянии элементов конструкции в любой момент времени. Для задач соударения представляется возможным получить во времени всю картину внедрения, пробития и образования осколков с учетом ударно-волнового характера деформирования и разрушения как материала ударника, так и преграды.

В работах [6–7] классифицированы многослойные преграды и показано, что в некоторых случаях они обладали большей ударной стойкостью, чем монолитные. Проявлялась зависимость от типа ударника, его носовой части и начальной скорости, а также угла соударения. Авторы от-

мечают, что, по-видимому, такие металлы, как алюминий и сталь еще долго будут играть роль основных материалов в защитных конструкциях. Использование модифицированного лагранжева подхода в настоящее время представляет определенный интерес с точки зрения расширения научных знаний и определения границ его применимости. В дополнение к проведенным исследованиям ниже изучено влияние двукратного увеличения прочностных характеристик алюминиевых преград на процесс пробития их стальным сферическим ударником при скоростях от 460 до 700 м/с.

Такой диапазон прочностных характеристик выбран в связи с возможностью достижения указанных значений в практике разработки перспективных материалов. При этом математическое моделирование процесса соударения играет важную роль для оценки результатов прогнозирования свойств создаваемых материалов.

Математическая модель и численный метод расчетов

Поведение материалов описано с позиций феноменологической макроскопической теории механики сплошных сред. Материал моделируется пористой, сжимаемой, упруго-пластической средой с учетом свойств прочности и ударно-волновых явлений. Определяющие соотношения задаются уравнениями Прандтля–Рейса при условии текучести Мизеса. При описании разрушений используется детерминированный подход, в рамках которого в материалах образуются разрушения по типу сдвига и по типу отрыва. Это достигается одновременным учетом нескольких критериев разрушения. С точки зрения авторов, это позволяет моделировать ударно-волновые процессы в твердых телах наиболее приближенно к реальным [8].

В качестве основного инструмента исследований использовался численный лагранжев метод, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Согласно терминологии [4], метод содержит оригинальный способ выделения поверхностей разрыва сплошности материалов, который не накладывает серьезных ограничений на решение пространственных задач пробития и проникания. Одним из достоинств метода является возможность моделирования процессов сквозного пробития и глубокого внедрения ударников сложной геометрии из различных материалов. Расчеты проведены в некоммерческом программном комплексе «Удар.Ос.2», разработанном в Томском государственном университете [9]. Программный комплекс, выполненный на языке Си++, содержит программы подготовки данных, решатель и просмотрщик.

Тестовые расчеты

Достоверность результатов численного моделирования установлена путем решения ряда тестовых задач. Вначале результаты сравнивались с аналитическим решением Ренкина–Гюгонно. Далее численные результаты сопоставлялись с экспериментальными данными, в том числе по величине запреградной скорости ударника, глубины его внедрения и диаметров пробоины (входной и выходной диаметр), относительного укорочения ударников и т. п. Наконец, численные результаты сравнивались с результатами, полученными другими исследователями в части определения доминирующего механизма разрушения и пробития.

Анализ чувствительности сетки

На начальном этапе тестовых расчетов был проведен анализ чувствительности расчетной сетки. Анализ проведен с целью достижения консервативного результата, включая морфологию разрушения, характера баллистических кривых, а также значений некоторых интегральных характеристик процесса взаимодействия. Как показано в [10], это является важнейшим этапом верификации алгоритмов расчетов. Всего было построено три конечно-элементные модели взаимодействующих тел, отличающиеся количеством элементов в преграде. Рассмотрены конечно-элементные модели с частой разбивкой (модель 1), средней (модель 2) и редкой (модель 3). Количество элементов варьировалось от 5 000 до 10 000, использовался трехузловой элемент типа «равнобедренный треугольник». В автоматическом режиме было сделано сгущение элементов в преграде в области, приблизительно равной трем радиусам ударника. При расположении области сгущения элементов авторы ориентировались на экспериментальные результаты из [6].

На рис. 1 показаны результаты, полученные по всем трем моделям. Видно, что характер баллистических кривых и морфология разрушения преград были схожи. На временных кривых ско-

рости отчетливо видны интервалы ее быстрого (до 15 мкс) и медленного (с 15 мкс) снижения. Кривые скорости отражали также установившееся движение ударника и, как следствие, выход его из преграды. В морфологии разрушения также не обнаружено значительных различий, а именно, отсутствие пластической деформации ударника и сильно поврежденная выбитая алюминиевая пробка. Размер осколков зависел от размера триангуляционных элементов в преграде, но в обоих случаях соответствовал экспериментальным данным.

Профили скорости свободной поверхности приведены на рис. 1. Отчетливо видно, что последняя конечно-элементная модель не выявила осцилляций на кривых после выхода ударной волны на свободную поверхность.

Скорее всего, на наличие осцилляций на графике влияло состояние выбитой откольной тарелки, которая во всех трех случаях была сильно разрушена. В целом профили скорости свободной поверхности близки к экспериментальным. Сопоставляя полученные результаты с экспериментальными и учитывая морфологические особенности процесса разрушения и затраченное время счета, выбрали конечно-элементную модель 2. В данном случае консервативный результат достигался в случае, когда размер элемента в преграде был почти в два раза меньше, чем в ударнике, при этом область сгущения в преграде составляла не менее трех радиусов ударника.

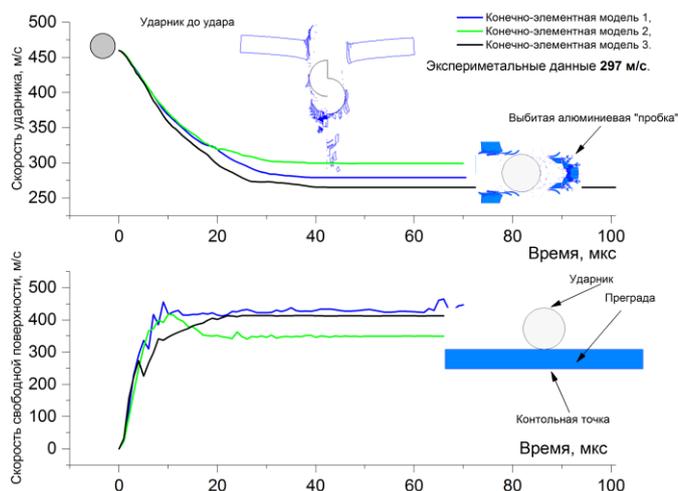


Рис. 1. Расчеты процесса пробития преграды из Д16 стальным шариком со скоростью 460 м/с

Ударник и объекты исследования

Объектом исследования выбрана однородная пластина из сплава Д16 размерами 60×6 мм в продольном сечении. В работе изучено влияние увеличения прочностных характеристик пластины при взаимодействии со стальным шариком диаметром 12,7 мм в диапазоне от 460 до 700 м/с. Материалом шарика была упрочненная сталь ШХ15.

Рассмотрены пластины с увеличенными в два раза относительного исходного варианта критическими значениями предела текучести, откольной прочности и удельной работы сдвиговых пластических деформаций. Две последние величины являются критериями разрушения материала, отвечающими за образование отрывных и сдвиговых разрушений соответственно. Таким образом, серия вычислительных экспериментов состояла из восьми вариантов. Для удобства введены обозначения образцов как (пр. тек. × 2), (отк. проч. × 2) и (сдвиг. проч. × 2), соответственно.

Физико-механические характеристики исходного образца были следующие: начальная плотность 2,78 г/см³, объемная скорость звука 5380 м/с, модуль сдвига 25,8 ГПа, эквивалентная пластическая деформация 1,2, предел текучести 0,42 ГПа, откольная прочность 0,5 ГПа, удельная работа сдвиговых пластических деформаций 35 кДж/кг.

Исследование процесса пробития базовых и упрочненных алюминиевых преград стальным ударником при 460 и 700 м/с

Влияние двукратного увеличения предела текучести материала преграды на процесс пробития

Вначале изучено влияние двукратного увеличения предела текучести материала преграды на процесс ее пробития. На основе численных результатов был воспроизведен сценарий разрушения исходных преград и преград с завышенным значением предела текучести. Для выявления основных различий процесс пробития преград при 460 м/с условно был разделен на стадии и детально проанализирован. Предел текучести исходного материала равен 0,42 ГПа.

На первой стадии отмечается пластическая деформация преграды (выход фронта пластической деформации на тыльную поверхность), на второй и третьей стадии формировалась «пробка» в преграде, на четвертой и пятой полностью образовавшаяся «пробка» выбивалась из преграды. Фрагменты конфигураций «ударник–мишень» соответствующие некоторым стадиям пробития изображены на рис. 2.

В однородной преграде первая стадия длилась не более 8 мкс, при этом зарождение будущей пробки там завершилось уже к 12-й мкс. Полностью сформированная пробка диаметром почти 10 мм начинает выходить из преграды на 15-й мкс, что сопровождается ее дальнейшим разрушением и формированием облака лидирующих осколков. С 28-й по 44-ю мкс фиксировался выход ударника, при этом его задняя часть достигала тыльной поверхности преграды на 65-й мкс, что соответствовало окончательному выходу из преграды. Скорость шарика после пробития преграды составила 299 м/с. В эксперименте ее значение равнялось 313 м/с. На верхнем графике штрихпунктиром показана кривая скорости для усиленного образца, имеющая незначительные отличия от кривой скорости для однородного образца. Расчетным путем установлено, что после пробития усиленного образца скорость ударника составляла 297 м/с.

Итак, сравнение баллистических кривых для скорости 460 м/с показало, что кривые совпадали только на первой и последней стадиях, расхождение между ними было только в середине процесса.

С увеличением начальной скорости ударника было установлено, что серьезных различий обнаружено не было. В обоих случаях ударник не теряет своей первоначальной формы, выбивая из преграды сильно разрушенную пробку. Как показывают расчеты, диаметр пробки несколько меньше исходного диаметра ударника, а края пробки разрушены. Все очаги разрушения сосредоточены возле нее, радиальных трещин, распространяющихся от края пробки к тыльной боковой поверхности, не обнаружено. Основным отличием можно считать размер внутреннего диаметра пробки. Получено, что скорости ударника после пробития однородного и усиленного образцов почти совпадали и составили 569 и 558 м/с соответственно. При этом баллистические кривые для этих вариантов расчетов полностью совпадали только на начальной стадии пробития.

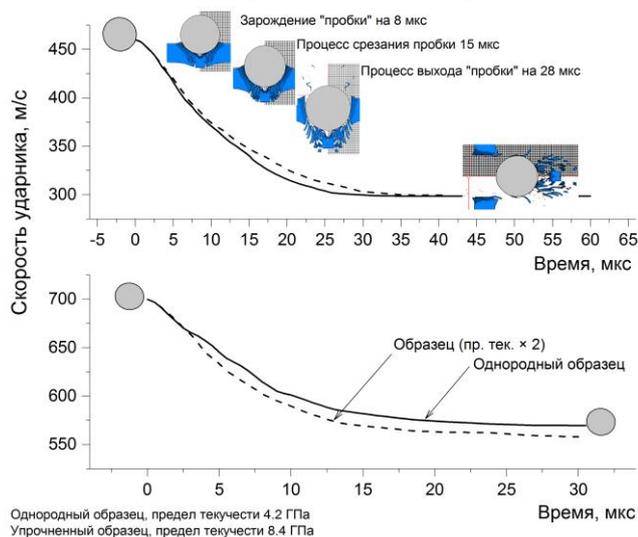


Рис. 2. Результаты расчетов процесса пробития базовой алюминиевой и алюминиевой преграды с удвоенным значением предела текучести

Влияние двукратного увеличения откольной прочности материала преграды на процесс пробития

Далее изучено влияние двукратного увеличения откольной прочности в материале преграды на процесс ее пробития. В данном случае, рассмотренная величина является одним из критериев разрушения в используемой модели. Очевидно, что образец будет больше сопротивляться откольным разрушениям. Откольная прочность исходного материала равна 0,5 ГПа.

Воспроизводя процесс пробития однородных и усиленных откольной прочностью преград, существенных отличий не обнаружили. Преграды были насквозь пробиты шариком без его пластической деформации. Все разрушения сконцентрированы по краям пробки, а из преграды была выбита «пробка», которая в зависимости от скорости имела разрушения средней и сильной степени.

Для проведения сравнительного анализа все баллистические кривые были расположены на одном графике на рис. 3. По аналогии с предыдущим случаем сверху были представлены расчетные кривые для скорости 460 м/с, а внизу – для скорости 700 м/с. Видно, что баллистические

кривые для базового и усиленного откольной прочностью образцов практически полностью совпадали. При этом совпадения с кривой относящейся к образцу с усиленным значением предела текучести, имели место только на начальных и конечных стадиях процесса пробития. Установлено, что при скорости ударника 460 м/с его запреградная скорость равнялась 300 м/с и практически полностью совпадала с предыдущими рассчитанными значениями.

При начальной скорости ударника, равной 700 м/с, наблюдалась похожая картина. Однако все три баллистические кривые совпадали только на начальной стадии, а на конечной стадии они становились параллельными друг другу. Что касается баллистических кривых для усиленных образцов, то они совпадали еще и в середине процесса до 8 мкс включительно. Таким образом, ударная стойкость образца с завышенным значением откольной прочности была выше, чем однородного образца и образца с завышенным значением предела текучести. Однако, судя по рассчитанному значению запреградной скорости, равной 554 м/с, весьма незначительно. Полученные результаты являются предсказуемыми и объясняются тем, что в процессе пробития откольное разрушение не являлось доминирующим.

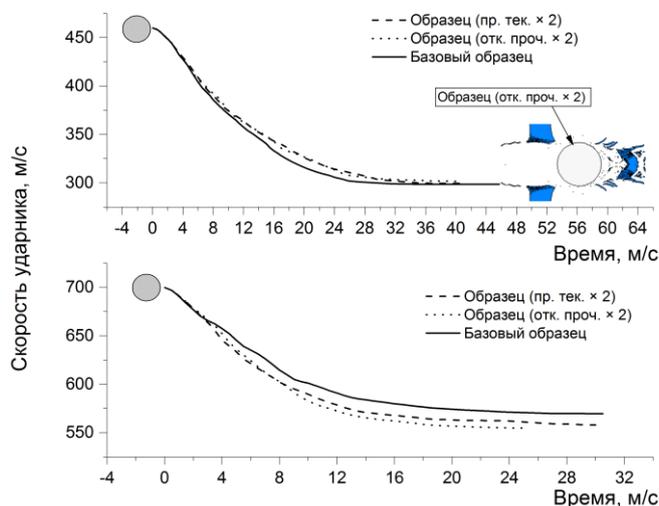


Рис. 3. Результаты расчетов процесса пробития базовой алюминиевой и алюминиевой преграды с удвоенным значением откольной прочности

Влияние двукратного увеличения удельной работы сдвиговой пластической деформации преграды на процесс пробития

В завершение проанализируем процесс пробития преград с удвоенным значением сдвиговой прочности. Согласно логике проводимых исследований, данный образец должен больше сопротивляться сдвигу. Однако расчеты показали, что все преграды были пробиты ударником насквозь без заметной пластической деформации по уже вышеописанному механизму. Время процесса пробития незначительно отличалось от времени пробития однородного образца, а состояние выбитой пробки можно охарактеризовать как средней степени разрушения.

Баллистические кривые для всех рассмотренных образцов приведены на рис. 4. Видно, что все кривые совпадали только на начальной стадии пробития, причем при скорости 460 м/с этот период был в два раза дольше и составил почти 8 мкс. Нетрудно заметить, что кривые скорости упрочненного сдвиговой прочностью образца расположены ниже остальных. Таким образом, можно утверждать в процессе пробития доминировал сдвиговой механизм, «пробка» как бы срезалась под действием ударника, однако сам образец не смог его остановить.

При начальной скорости ударника 460 м/с его запреградная скорость составляла 253 м/с, что явля-

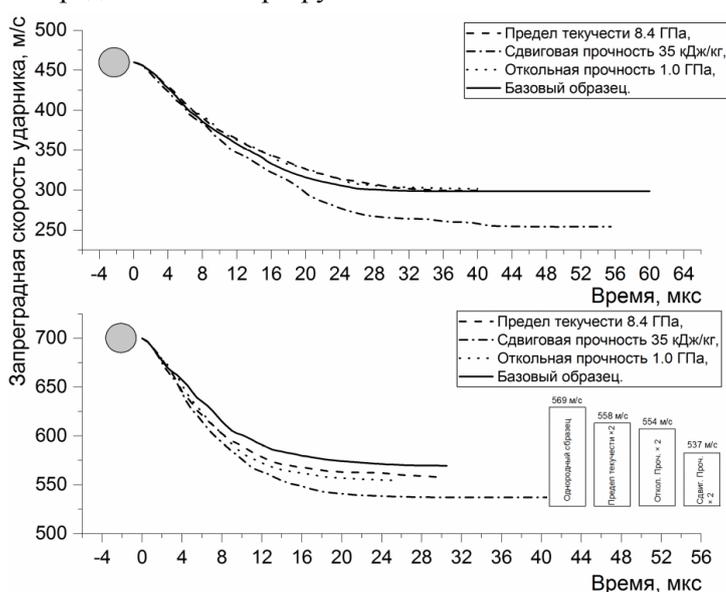


Рис. 4. Результаты расчетов процесса пробития базовой алюминиевой и алюминиевой преграды с удвоенным значением сдвиговой прочности

лось минимальным значением и на 15 % меньше скорости, зафиксированной в варианте расчетов базового образца. При начальной скорости 700 м/с также получено минимальное значение, равное 537 м/с. Однако расхождение с базовым образцом здесь уменьшилось до 5 %.

Результаты расчетов

В таблице представлены результаты расчетов для всех рассмотренных вариантов. Результаты дают количественное и качественное представление о процессе пробития базового алюминиевого и упрочненных образцов при скоростях 460 и 700 м/с. В таблице приведены начальная скорость ударника, время пробития (момент полного его выхода из преграды), запреградная скорость ударника (скорость его центра масс), величины входного и выходного диаметров пробоины и энергии поглощения ударника. Кроме того, качественно оценено состояние выбитой из преграды «пробки».

Установлено, что упрочнение образцов одной из выбранных прочностных характеристик во всех случаях приводило к повышению ударной стойкости преграды по сравнению с базовым образцом. Это выражалось в уменьшении запреградной скорости ударника, в незначительном увеличении времени процесса пробития и в увеличении выходного диаметра пробоины. Других значимых отличий в морфологии разрушения образцов обнаружено не было. При этом ударник насквозь пробивал все преграды, не теряя своей исходной сферической формы.

Путем прямого сравнения получено, что при скорости 460 м/с наибольшей ударной стойкостью обладал образец с увеличенным значением сдвиговой прочности. После пробития этого упрочненного образца запреградная скорость ударника составила 253 м/с, что почти на 15 % меньше, чем после пробития базового. После пробития образцов с завышенными значениями откольной прочности и предела текучести отмечено незначительное расхождение в расчетных значениях. Запреградные скорости в этих вариантах были меньше на 2,6 и 1,7 % соответственно. Такая же тенденция сохранилась при начальной скорости 700 м/с, однако расхождение в запреградных скоростях уменьшилось до 5 %.

Установлено, что упрочнение образцов слабо влияло на время процесса пробития. Так, при скорости 460 м/с время пробития получилось от 69 до 73 мкс, а при скорости 700 м/с – от 37 до 40 мкс. Время пробития рассчитывалось как время полного выхода ударника из преград.

Расчетным путем было установлено, что в некоторых усиленных образцах с тыльной стороны вблизи пробоины выбивался дополнительный осколок. С точки зрения авторов, данный факт говорил о том, что образец сильнее сопротивлялся пробитию. Наиболее разрушенные края пробоины наблюдались после пробития базового образца. Установлено, что во всех усиленных образцах выходной диаметр пробоины был больше, чем выходной диаметр, наблюдаемый после пробития базового образца. Наибольшие диаметры выходных пробоин обнаружены в образцах с увеличенным значением предела текучести и удельной работы сдвиговых пластических деформаций.

Установлено, что при пробитии базового образца при скоростях 460 и 700 м/с поглощалось энергии 510 и 698 Дж соответственно. При пробитии образцов с увеличенным значением сдвиговой прочности эти затраты энергии увеличивались до 619 и 846 Дж. В образцах с увеличенным значением откольной прочности отмечен средний уровень разрушения выбитой «пробки». В данном случае вместо алюминиевых осколков наблюдался фрагмент преграды в виде выбитой «пробки».

Заключение

На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы. В целом характер баллистических кривых, морфология разрушения преград и механизм пробития были примерно одинаковыми как для базовой преграды, так и для всех упрочненных образцов. В рассмотренном диапазоне скоростей сферический ударник не деформировался пластически, и выбивал из преграды «пробку». Разрушения «пробки» можно охарактеризовать как средние (фрагмент выбитой пробки и осколки) и высокие (только осколки алюминия).

Наибольшее сопротивление пробитию оказывали преграды с увеличенным значением сдвиговой прочности. В этих вариантах расчетов отмечено незначительное увеличение времени пробития и уменьшение запреградной скорости ударника. Баллистические кривые практически совпадали с баллистической кривой для базового образца. Основное различие было в наличие совпадений кривых вначале и конце процесса пробития.

Результаты расчетов процесса пробития алюминиевых преград

Преграда Исходный образец обозначался как Д16, в обозначении упрочненного образца стоял символ «×2»	Начальная скорость, м/с	Время пробития, мкс	Запреградная скорость, м/с	Диаметр пробоины, мм		Энергия поглощения, Дж	Уровень разрушений выбитой «пробки»
				входной	выходной		
Преграда исходная Д16	460	69	300	13	13,4	510	Высокий
Пр-да Д16 (пр. тек. × 2)	460	73	299	14,5	14,24	513	Средний
Преграда исходная Д16	700	37	569	14,2	14,3	698	Высокий
Пр-да Д16 (пр. тек. × 2)	700	40	558	14,1	14,9	750	Средний
Пр-да (Отк.проч × 2)	460	69	301	13,4	13,3	509	Средний
Пр-да (Отк.проч. × 2)	700	39	554	13,1	13,7	768	Средний
Пр-да Д16 (сд. проч× 2)	460	71	253	13,2	12,7	619	Средний
Пр-да Д16 (сд. проч× 2)	700	39	537	13,3	13,6	846	Высокий

Скорее всего, откольная прочность и предел текучести также влияли на процесс взаимодействия, но только в другом интервале начальных скоростей, возможно, ниже предела сквозного пробития.

Созданные средства математического моделирования могут быть полезны при проведении фундаментальных и прикладных исследований. Предложенный подход позволяет выяснять механизмы и закономерности процесса высокоскоростного деформирования и разрушения конструкционных материалов и, кроме того, получать результаты в недоступной для эксперимента области начальных условий. При проведении комплексного рационального проектирования реализуется возможность прогнозирования поведения перспективных ударостойких защит различных объектов и техники для облегчения поиска оптимального варианта защитной конструкции.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00257, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00257/>.

Литература

1. High Speed Penetration Dynamics: Engineering Models and Methods / G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. Elperin. – Singapore: World Scientific Publishing Company, 2013. – 680 p.
2. Walker, J.D. Modern Impact and Penetration Mechanics / J.D. Walker. – Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
3. Hazell, P.J. Armour: Materials, Theory, and Design / P.J. Hazell. – Boca Raton, CRC Press, 2022. – 498 p.
4. Высокоскоростное взаимодействие тел / В.М. Фомин, А.И. Гулидов, Г.А. Сапожников и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 600 с.
5. Flores-Johnson, E.A. Ballistic Performance of Multi-Layered Metallic Plates Impacted by a 7.62-mm APM2 Projectile / E.A. Flores-Johnson, M. Saleh, L. Edwards // International Journal of Impact Engineering. – 2011. – Vol. 38, Iss. 12. – P. 1022–1032.
6. Ballistic Performance of Multi-Metal Systems / P. Ranaweera, D. Weerasinghe, P. Fernando, S.N. Raman, D. Mohotti // Int. J. Protective Struct. – 2020. – Vol. 11, no. 3. – p. 379–410.
7. Орлов, М.Ю. Численное моделирование процесса пробития многослойных пластин удлиненными ударниками / М.Ю. Орлов, В.П. Глазырин, Т.В. Фазылов // XI Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2021». Материалы конференции. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2022. – С. 22–27.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663830 Российской Федерация. Взрыв. Сглаживание контактной границы: № 2016661600 : заявл. 31.10.2016 : опублик. 19.12.2016 / В.П. Глазырин, Ю.Н. Орлов, М.Ю. Орлов; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

9. Scazzosi, R. Experimental and Numerical Investigation on the Perforation Resistance of Double-Layered Metal Shield under High-Velocity Impact of Armor-Piercing Projectiles / R. Scazzosi, M. Giglio, A. Manes // Materials. – 2021. – Vol. 14, Iss. 3. – P. 626.

10. Orlov, M.Y. Research of the Interaction of Steel Spherical Impactor with an Aluminum Alloy Targets / M.Y. Orlov, V.P. Glazyrin, T.V. Fazylov // Proc. XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics. CICMCM 2023. Springer Proceedings in Physics, Springer, Singapore, 2024, Vol. 412.

Поступила в редакцию 25 сентября 2025 г.

Сведения об авторах

Орлов Максим Юрьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории высокоэнергетических и специальных материалов, Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: orloff_m@mail.ru.

Глазырин Виктор Парфирьевич – доктор физико-математических наук, зав. лаб. Прочности, НИИ прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: glvp@list.ru.

Фазылов Талгат Вадимович – аспирант кафедры Механики Деформируемого твердого тела, Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: talgat505@gmail.com.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2025, vol. 17, no. 4, pp. 72–80*

DOI: 10.14529/mmph250409

INVESTIGATING THE PENETRATION OF ALUMINUM TARGETS BY A SPHERICAL IMPACTOR IN THE RANGE FROM 460 TO 700 M/S

M.Yu. Orlov, V.P. Glazyrin, T.V. Fazylov
Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation
E-mail: orloff_m@mail.ru

Abstract. The paper numerically studies the penetration of a spherical impactor through monolithic and reinforced aluminum targets at initial velocities ranging from 460 to 700 meters per second. Aluminum samples with overestimated values of yield strength, spall strength, and specific work of shear plastic deformation are considered as hardened samples. The material is modeled as an elasto-plastic, porous, compressible medium taking into account its strength properties, shock wave phenomena, and fracture formation through spall-induced and shear-induced modes. The governing equations are based on the Prandtl–Reiss equations under the Mises flow condition. The state equation is formulated in Walsh form. Numerical methods are used to solve the problem, with a Lagrangian approach serving as the primary research tool. The computational part is supplemented with mechanisms for splitting nodes and erosion elements. The calculations were carried out in a two-dimensional, axisymmetric model using the latest version of the “Udar.Os.2” finite element solver. The sensitivity of the mesh was analyzed, and the most efficient finite element model was selected. In all cases, hardening of the specimens led to an increase of impact resistance. Although the targets were penetrated, specimens with an overestimated shear strength value provided greater impact resistance. At certain stages of the process, the ballistic curves aligned, but the impactor was not destroyed, leaving behind a target’s debris cloud.

Keywords: high-speed striker; target, mathematical model; numerical method; perforation and penetration problem; impact resistance.

References

1. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. *High-Speed Penetration Dynamics: Engineering Models and Methods*. World Scientific Publishing Co, 2013, 680 p. DOI: 10.1142/8651
2. Walker J.D. *Modern Impact and Penetration Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press; 2021. DOI: 10.1017/9781108684026.
3. Hazell P.J. *Armour: Materials, Theory, and Design*. Boca Raton, CRC Press, 2022, 498 p. DOI: 10.1201/9781003322719
4. Fomin V.M., Gulidov A.I., Sapozhnikov G.A. et al. *Vysokoskorostnoe vzaimodeystvie tel* (High-speed interaction of bodies). Novosibirsk, Izd-vo SO RAN Publ., 1999, 600 p. (in Russ.).
5. Flores-Johnson E.A., Saleh M., Edwards L. Performance of Multi-Layered Metallic Plates Impacted by a 7.62-mm APM2 Projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, Vol. 38, Iss. 12, pp. 1022–1032. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.08.005
6. Ranaweera P., Weerasinghe D., Fernando P., Raman S.N., Mohotti D. Ballistic Performance of Multi-Metal Systems. *Int. J. Protective Struct*, 2020, Vol. 11, no. 3. pp. 379–410. DOI: 10.1177/2041419619898693
7. Orlov M., Glazyrin V., Fazylov T. Numerical Simulation of Perforation Multy-layered Plates with High-velocity Projectiles. *XI Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual'nye problemy sovremennoy mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoy mekhaniki – 2021»*. *Materialy konferentsii* (Proc. XI All-Russian Scientific Conference with international participation “Actual problems of modern continuum mechanics and celestial mechanics – 2021”). Tomsk, Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2022, pp. 22–27. (in Russ.).
8. *Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2016663830 Russian Federation*. Explosion. Smoothing the Contact Boundary: No. 2016661600: application 31.10.2016 : published 19.12.2016 / V.P. Glazyrin, Yu.N. Orlov, M.Y. Orlov; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “National Research Tomsk State University”. (in Russ.).
9. Scazzosi R., Giglio M., Manes A. Experimental and Numerical Investigation on the Perforation Resistance of Double-Layered Metal Shield under High-Velocity Impact of Armor-Piercing Projectiles. *Materials*, 2021, Vol. 14, iss. 3, p. 626. DOI: 10.3390/ma14030626
10. Orlov M.Y., Glazyrin V.P., Fazylov T.V. Research of the Interaction of Steel Spherical Impactor with an Aluminum Alloy Targets. In: Orlov, M.Y., Visakh, P.M. (eds) *Proc. XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics*. CICMCM 2023. Springer Proceedings in Physics, 2024, Vol. 412. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-97-1872-6_33

Received September 25, 2025

Information about the authors

Orlov Maksim Yur'evich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Senior Researcher at the Laboratory of High-Energy and Special Materials, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: orloff_m@mail.ru.

Glazyrin Viktor Parfir'evich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory Strength, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: glvp@list.ru.

Fazylov Talgat Vadimovich is Post-graduate Student of the Department of Mechanics of Deformable Solids, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: talgat505@gmail.com.