

Н.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, НТУ “ХПИ”,
Г.Д. ГРИЦЕНКО, канд. техн. наук, ГП “Завод им. Малышева”,
Я.Н. БАРАНИКОВ, КП “Харьковское конструкторское бюро по
машиностроению им. А.А.Морозова”,
А.В. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук, Головной специализированный
конструкторско-технологический институт, г. Мариуполь

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОБИВАНИЯ ПРЕГРАД

У статті описано ефективну технологію автоматизації досліджень процесу пробиття бронеперешкод. Створено методику та спеціалізований модуль, що інтегрує розрахунки в системах ANSYS, LS-DYNA. Проведено тестові розрахунки.

In the article effective technology of automation of research process of armor obstacles breaching is described. A method and specialized module which integrates calculations in ANSYS and LS-DYNA systems are created. Test computations are conducted.

Актуальность задачи. Актуальность вопроса моделирования процессов разрушения бронированных преград обусловлена и необходимостью повышения защищенности боевых машин, и созданием разнообразных средств индивидуальной защиты, и кроме того, постоянным ростом характеристик средств поражения. Это вынуждает проводить многовариантные испытания средств бронезащиты. Представляется целесообразным для уменьшения времени на их разработку создать специализированные системы автоматизированного моделирования процессов пробивания преград, что и составляет предмет данной работы.

Состояние вопроса. Моделирование процесса взаимодействия в системе “снаряд-броня” является одним из наиболее сложных в механике разрушения. Подходы к решению данной задачи могут быть различными: получение эмпирических зависимостей при обработке данных экспериментальных исследований; использование общих подходов, основанных на рассмотрении энергетического баланса; использование численных методов.

В частности, для численного решения задач данного типа наиболее целесообразно применение самого мощного из современных численных методов механики твердого тела – метода конечных элементов (МКЭ). Вопросам применения МКЭ и других методов к решению различных задач посвящены работы [1-12].

Отмечается [3], что для полного описания динамики соударения твердых тел необходимо учитывать их форму, распространение упругих, пластических и ударных волн, гидродинамическое течение материала, конечные деформации и деформирование, упрочнение, тепловые эффекты и влияние трения, а

также возникновение и распространение зон разрушения в материале соударяющихся тел. Теоретический подход был бы здесь не только в высшей степени громоздким, но и потребовал таких сведений о поведении материалов в условиях нагружения с большими скоростями деформации, которые практически получить невозможно. Поэтому большая часть исследований в этой области ведется экспериментальными методами и путем численного моделирования методом конечных элементов.

Проникание можно определить как вход тела в мишень без сквозного пробивания последней. В общем случае метаемое тело застревает в мишени, и в ней образуется воронка. Если снаряд отскакивает от поверхности мишени или проникает в нее по криволинейной траектории, а затем выходит из нее с меньшей скоростью, то такое явление называется рикошетом. В противоположность этому при пробивании снаряд насквозь проходит мишень. Характерная продолжительность процессов проникания и пробивания от нескольких микросекунд до сотен микросекунд. Обычно и мишени, и снаряды в процессе соударения сильно деформируются. Рассмотрим процессы, происходящие в снаряде и мишени во время соударения. Можно считать, что снаряд представляет собой длинное цилиндрическое тело с конической, оживальной, полусферической или плоской передней частью. При попадании такого снаряда в мишень в обоих телах образуются и распространяются сильные волны сжатия. Если скорость соударения достаточно велика, возникающие и распространяющиеся внутрь снаряда от его свободных боковых поверхностей волны разгрузки, пересекаясь вблизи оси снаряда, будут создавать зону высоких растягивающих напряжений. В этой зоне в достаточно хрупких материалах, таких, как высокопрочные стали, может произойти разрушение. Этот эффект проявляется сильнее, если в материале снаряда вблизи его продольной оси имеются поры или другие неоднородности. Если снаряд попадает в преграду по нормали к ее поверхности, то развивается двумерное напряженное состояние. При ударе под углом к нормали задача усложняется, так как в результате асимметричного нагружения возникают изгибающие напряжения. При определенном сочетании формы снаряда, характеристик материалов снаряда и мишени, а также скорости соударения совместное действие изгибающих и растягивающих напряжений может привести к разрушению снаряда или рикошету.

За волной сжатия в материале мишени сразу же следует волна разгрузки. Когда начальная волна сжатия достигает свободной поверхности мишени, образуется еще одна волна разгрузки. При определенном сочетании величины напряжения (растягивающего) и продолжительности его действия, превышающем критическое значение для материала мишени, последняя начинает разрушаться.

Удобна следующая система классификации мишеней [3]: *полубесконечная*, если ее тыльная поверхность не влияет на процесс проникания; *толстая*, если влияние тыльной поверхности сказывается лишь после того, как снаряд пройдет в материале мишени значительное расстояние; *промежуточной*

толщины, если тыльная поверхность мишени оказывает значительное влияние на процесс деформации в течение почти всего времени движения снаряда в материале мишени; *тонкая*, если напряжения и деформации постоянны по толщине мишени.

Материалы сталкивающихся тел могут разрушаться по-разному. Действительный механизм разрушения зависит от таких переменных, как свойства материала, скорость соударения, форма снаряда, способ крепления мишени и относительные, размеры снаряда и мишени. На рис. 1, заимствованном из работе [3], показаны некоторые основные типы разрушения тонких мишеней и мишеней промежуточной толщины. Хотя один из типов разрушения может быть доминирующим, чаще встречаются их комбинации.

Откол, т.е. разрушение под действием растягивающих напряжений, возникающих при отражении начальной волны сжатия от тыльной поверхности пластины конечной толщины, обычное явление при взрывных или ударных нагружениях, в особенности материалов, лучше работающих на сжатие, чем на растяжение. Развитый откол внешне выглядит аналогично, однако в этом случае разрушение обусловлено большими деформациями и форма поверхности откола определяется локальными неоднородностями и анизотропией материала. Сколовое разрушение происходит, когда напряжения в начальной волне превышают предел прочности материала, и наблюдается в мишенях из малопрочных и малоплотных материалов, тогда как образование радиальных трещин обычно для материалов, прочность которых на растяжение гораздо меньше их прочности на сжатие, например для керамики.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования были посвящены изучению пробивания мишеней с образованием пробки. При попадании снаряда с затупленной или полусферической передней частью в мишень конечной толщины со скоростью, близкой к баллистическому пределу, из мишени выбивается почти цилиндрическая пробка, диаметр которой практически равен диаметру снаряда. В этом случае форма и движение снаряда таковы, что заставляют материал мишени смещаться в основном на-

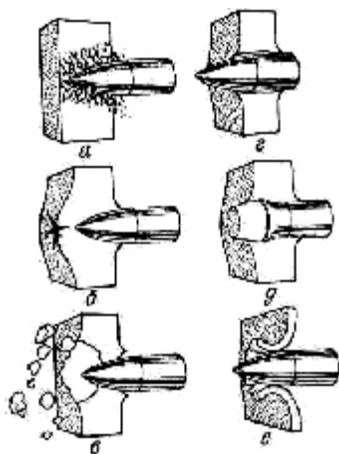


Рис. 1. Виды разрушения мишеней [3]:

- a* – хрупкое разрушение;
- б* – разрушение с образованием радиальных трещин;
- в* – дробление; *г* – пластическое расширение отверстия;
- д* – выбивание пробки;
- е* – образование лепестковой пробки

правлении движения снаряда. Отделение от мишени пробки может произойти по обычному механизму разрушения, т.е. путем возникновения пор и их роста при сдвиге или по другому механизму, известному как *адиабатический сдвиг*, для которого характерно развитие узких полос интенсивного сдвига. Обычно считают, что неустойчивость типа адиабатического сдвига развивается в месте концентрации напряжений в твердом теле, напряженное состояние которого в целом однородно. Работа пластической деформации почти полностью превращается в тепло, которое из-за высоких локальных скоростей деформации не успевает распространиться на существенное расстояние от зоны пластических деформаций (например, в работе [3] указывается, что скорости деформации сдвига в полосах адиабатического сдвига достигают 10^7 с⁻¹, а температура 10^5 С). В результате температура в зоне поднимается, это вызывает дополнительное пластическое течение и дальнейшую концентрацию локальных пластических деформаций. Развитие этого процесса приводит к распространению по материалу узкой полосы значительных пластических деформаций вдоль плоскостей максимальных напряжений сдвига или минимальной прочности материала до тех пор, пока не произойдет разгрузка или пока в материале не образуется сколовая трещина. При скоростях соударения, превышающих баллистический предел более чем на 5-10%, вместо одной пробки обычно образуется несколько осколков. Образование пробки при пробивании мишени весьма чувствительно к углу соударения и форме головной части снаряда.

Чтобы полностью решить задачу о соударении, приходится прибегать к численному решению полных уравнений механики сплошной среды. Методы конечных разностей и конечных элементов позволяют решать полные системы уравнений в частных производных, обладают большей гибкостью, чем разнообразные алгебраические уравнения, и позволяют точно моделировать переходные процессы. Строго говоря, они также являются приближенными (решаются системы конечно-разностных уравнений, а не сами дифференциальные уравнения), однако в настоящее время погрешности, обусловленные неточным знанием свойств материалов, во много раз больше погрешностей, присущих самим численным методам.

Упомянутые методы, алгоритмы и программные продукты, их реализующие, представляют собой лишь небольшую часть материала от обширного объема публикаций по этой тематике. Однако даже на основании этого мозаичного анализа можно сделать однозначный вывод об актуальности задачи моделирования процесса бронепробивания. Кроме того, в настоящее время отсутствуют универсальные подходы и модели для решения поставленной задачи.

Анализ возможности применения пакета LS-DYNA для расчета процессов пробивания преград на примере решения тестовых задач. Рассмотрим возможности пакетов конечно-элементного моделирования на примере пробивания преград из композитов.

Обычно в таких исследованиях делаются такие допущения [3]:

1. **Влияние соударения локально.** Предполагается, что в соударении участвует лишь небольшая часть мишени, размеры которой сравнимы с диаметром снаряда. Остальная часть мишени в соударении не участвует.

2. **Перемещениями абсолютно твердого тела можно пренебречь.**

3. **Тепловые явления можно не учитывать,** т.е. можно пренебречь трением, нагреванием ударной волной и изменением свойств материала.

4. **В начальный момент мишень свободна от напряжений.**

Особенности применения композиционных материалов (КМ) при проектировании бронезащиты определяются их способностью эффективно гасить энергию движения. При отслаивании волокон от матрицы затрачивается энергия, поэтому для армированных

КМ характерны такие механизмы повышения вязкости разрушения, которых нет у гомогенных материалов. Эти механизмы связаны с наличием в КМ большого числа поверхностей раздела, которые являются тормозом на пути развития трещин. Применение только лишь одной арматуры без связующего исключает это важнейшее свойство КМ. При отверждении связующего в КМ имеется

возможность вносить начальные напряжения и управлять их величиной и характером. Опять же применение КМ без связующего исключает данную возможность.

На сегодняшнее время выбор композитов очень богат. Композиты могут быть как традиционными – арамидные типа Кевлар, углеродные типа Торнел, стекловолоконистые и т.д., так и с металлической матрицей и с минеральными волокнами [3]. Прочность разных КМ варьируется в широких пределах (рис. 2). Даже прочность КМ в своем классе сильно зависит от технологии его

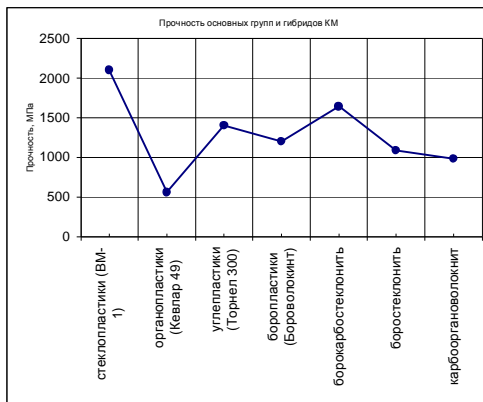


Рис. 2. Пределы прочности основных групп и гибридов КМ

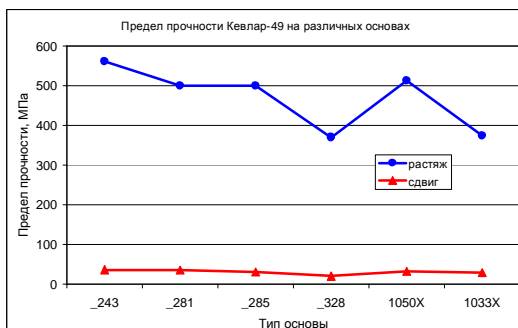


Рис. 3. Прочность Кевлара в зависимости от

изготовления (рис. 3). Традиционные КМ уступают по прочности более современным, таким как бороваолокниты (борокарбостеклонить прочнее Кевлара в 2,9 раз).

Боропластики применяют в том случае, когда требуется высокая прочность на сжатие, что соответствует проектированию бронезащиты. Гибридные КМ типа Торнел/Кевлар также обладают существенно более высокой прочностью на сжатие, чем обычный органокомпозит.

За прошедшее десятилетие известными ведущими институтами и компаниями был разработан ряд численных методов расчета быстропротекающих процессов, к которым относятся и процесс пробивания преград. В настоящее время хорошо отработанный и экспериментально проверенный программный продукт LS-DYNA применяется на всех иностранных предприятиях, занимающихся проектированием и производством вооружения. Беглый обзор зарубежной печати, например такой обширной научной библиотеки, как “Scientific and Technical Information Network” (STINET по адресу <http://stinet.dtic.mil/>), показывает, что расчеты процессов пробивания различных изделий и их компонентов стали стандартом проектирования, без которых не допускается к изготовлению ни одно военно-промышленное изделие.

В настоящее время российскими учеными активно разрабатываются методы решения аналогичных задач для своей промышленности. Значительные успехи в теоретических расчетах процессов пробивания демонстрируются на ежегодных съездах специалистов России, работающих в области современных методов расчета. Одна из таких работ [9] наглядно демонстрирует результаты разработки методов расчета процессов пробивания различными пулями преград из однородных материалов, металлокерамик и различных композитов. Рассмотрены эффекты рикошета и в общих чертах описаны современные математические модели решения этих задач с применением программного комплекса LS-DYNA. При всей доступности общего характера информации в такого рода публикациях, специфические, ключевые и представляющие практический интерес параметры, как правило, тщательно скрываются. Это объясняется большими финансовыми и трудовыми затратами на разработки таких наукоемких современных методов, которые естественно представляют промышленное “ноу – хау”. В этом случае предприятия, отрасли и государства, не развивающие в своих пределах таких направлений, рискуют навсегда отстать в области проектирования оптимальных бронезащит.

В рамках данной работы был проведен анализ возможностей современного программного пакета LS-DYNA для расчета процессов пробивания различных материалов. В работе рассмотрены такие материалы как Кевлар, стеклопластик C-I19-55, E-glass, S-glass, т.е. те материалы, по которым удается узнать свойства из доступных источников печати [8, 9-12]. В процессе исследования была создана математическая модель преграды, состоящая из пяти слоёв перекрёстно армированного композиционного материала. В пре-

граду направлен стальной шар массой 2г со скоростью 200 м/сек. Результат пробивания преграды из различных композиционных материалов представлен на рис. 4.

Для сравнения со стальной гомогенной преградой из обыкновенной стали, был проведен аналогичный расчет для пяти листов стальной преграды и 13-ти листов композиционной. Определено, что во всех случаях осколок не пробивает преграду, но имеется существенная экономия веса преграды, которое иллюстрирует рис. 5.

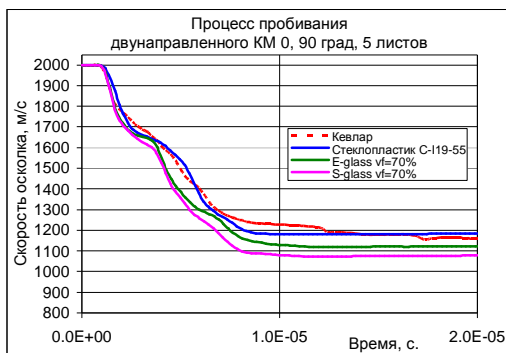


Рис. 4. Изменение скорости шара массой 2 г при прохождении пакета композиционного материала из 5 листов толщиной 2.4 мм каждый, перекрестно-армированного семи слоями

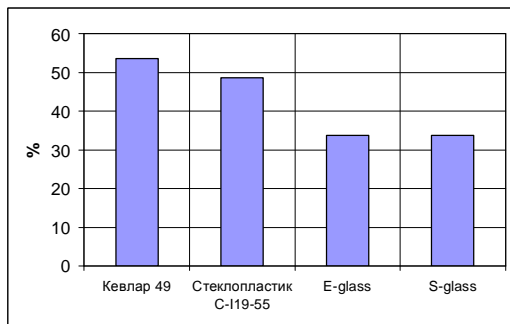


Рис. 5. Снижение массы, в процентах от аналогичной стальной преграды, набранной из 5 листов по 2.4 мм каждый

На рис. 6 представлен характер процесса пробивания по результатам решения тестовой задачи о внедрении кинетического снаряда в преграду (сталь – сталь). Качественный характер результатов численного моделирования соответствует экспериментальным данным о внедрении снаряда в бронезащиту [3].

Заключение. Обзор доступных публикаций в научно-технических изданиях, монографиях, *Internet* позволяет утверждать, что, во-первых, интерес к данному направлению исследований очень велик, а, во-вторых, задача сама по себе масштабна и многогранна. Она требует привлечения больших ресурсов для разработки теоретического аппарата, создания соответствующих методов, алгоритмов и привлечения современных конечно-элементных пакетов.

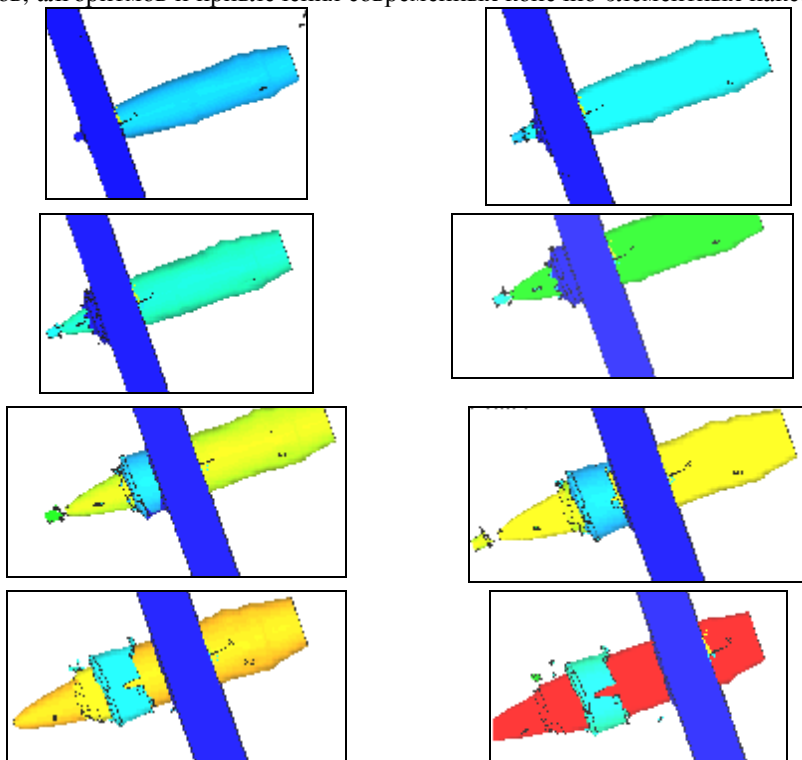


Рис. 6. Стадии внедрения снаряда в преграду

Оценка эффективности комплекса LS-DYNA для расчета процессов пробивания преград показала, что даже на постановочном, весьма приближенном уровне расчеты дают прогнозы по существенному снижению массы преграды без потери её эффективности. Кроме того, на примере решения ряда тестовых задач продемонстрированы возможности и преимущества интегрированной технологии автоматизированного исследования процесса разрушения защитного материала на внедрении индентора, основанной на соединении преимуществ специализированных программных модулей и универсальных CAE-систем ANSYS и LS-DYNA.

В дальнейшем предполагается развивать созданную технологию инте-

грації для об'єднання можливостей спеціалізованого і універсального програмного забезпечення.

Список літератури. 1. Фізика взрива / Под ред. К.П.Станюковича. – М.: Наука, 1975. 2. Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А., Степанов Г. В., Кривенюк В. В. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / НАН Украины. Ин-т пробл. прочности. – К.: – 2000. – 366 с. 3. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х. Р., Гришук Л.Б., Куран Д.Р. Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 296 с. 4. Харченко В.В., Майстренко А.П., Бабуцкий А.И., Кондряков Е.А. Особенности деформирования и разрушения пластин из хрупких материалов при ударном нагружении // Проблемы прочности. – 2002. – №3. – С.86-91. 5. Горельский В.А. Численное моделирование при ударе по нормали и под углом к поверхности преграды // Проблемы прочности. – 2002. – №3. – С.109-113. 6. Степанов Г.В., Зубов В.И., Токарев В.М., Дроздов А.В., Клепачко Я.П. Прочность тонколистового элемента конструкции из композиционного материала при ударном растяжении // Проблемы прочности. – 2001. – №1. – С.38-48. 7. Садовский В.М. К теории ударных волн в сжимаемых пластических средах // Изв. РАН. Мех. тверд. тела. – 2000. – №5. – С.87-95. 8. Композиционные материалы. Справочник. // В.В.Васильев., В.Д.Протасов., В.В.Болотин. и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с. 9. Боровков А.И. Возможности системы конечно-элементного моделирования ANSYS/LS-DYNA // Первая междунар. Конф. пользователей програмного обеспечения ANSYS. 22-23 октября 2003 г. ЕМТ-ANSYS-центр, Москва. Dynamical contact interaction. 10. L.L.Clements, R.L.Moore. Composite properties for E-glass in a room temperature curable epoxy matrix. Lawrence Livermore laboratory, 1977. 11. L.L.Clements, R.L.Moore. Composite properties for S-2-glass in a room temperature curable epoxy matrix. Lawrence Livermore laboratory, 1978. 12. L.L.Clements Problem intesting aramid/epoxy composites. Lawrence Livermore laboratory, 1977.

Поступила в редколлегию 11.01.2006

УДК 539.3:612.76

М.А.ТКАЧУК, докт. техн. наук, **Ю.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК**, НТУ “ХПІ”,
В.К. ПІОНТКОВСЬКИЙ, Інститут патології хребта та суглобів
ім. професора Сітенка

БІОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ: УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ОПИС

Стаття присвячена проблемі розвитку узагальненого параметричного підходу для дослідження елементів біомеханічних систем. Були розроблені параметричні моделі, що дозволяють змінювати конструкції ендопротезів, властивості елементів біомеханічних систем та робити обґрунтований вибір ендопротезу за критеріями міцності та жорсткості у відповідності з властивостями живих тканин.

The paper is devoted to the problem of development of generalized parametrical approach to research of biomechanical systems elements. Parametric models has been worked out allow to vary endoprosthesis constructions, properties of the elements of biomechanical systems and perform the based choice of endoprosthesis on the criteria of firmness rigidity and accordance with the properties of live tissues.

Стан проблеми. На даний час підвищення ефективності оперативного втручання для ендопротезування опорно-рухового апарату стримується відсутністю засобів передопераційного моделювання самої операції, розрахунків