

Расчетно-экспериментальное исследование стойкости композитной керамической брони при воздействии пуль и высокоскоростных осколков

к.ф.-м.н. доц. Кулаков Н.А., к.т.н. доц. Любин А.Н., Скакбаева А.С.

Университет машиностроения

(495) 223-05-23 доб. 1507, kulakov@mami.ru

Аннотация. В статье представлены результаты расчетно-экспериментального исследования стойкости композиционной керамической брони при воздействии пуль и высокоскоростных осколков. На основе анализа проведенных экспериментов была отработана расчетная конечно-элементная модель, которая позволила провести многовариантные расчеты различных конструктивных образцов брони с целью выбора наиболее рационального. Показано влияние геометрических параметров керамического элемента на прочность брони.

Ключевые слова: композиционная керамическая броня, высокоскоростные осколки, керамический элемент.

Целью настоящей работы являлось расчетно-экспериментальное исследование стойкости композитной керамической брони при воздействии бронебойных пуль калибра 7,62 мм при скорости контакта с броней $V = 840$ м/с, калибра 14,5 мм при $V = 900$ м/с и высокоскоростных осколков при $V = 1500$ м/с.

Подробное рассмотрение конструкции композитной брони, её конструктивных вариантов и их особенностей, а также механизма взаимодействия композитной керамической брони с пулей и особенностей расчёта этого взаимодействия было представлено авторами в более ранних работах [2, 3].

В рамках данной работы были проведены многочисленные баллистические эксперименты по обстрелу различных образцов композитной керамической брони. На основе анализа проведенных экспериментов была отработана расчетная конечно-элементная модель, которая позволила провести многовариантные расчеты различных конструктивных образцов брони с целью выбора наиболее рационального.

На рисунке 1 приведены исходные данные по одному из образцов композитной брони, подвергнутых баллистическим испытаниям. Это случай обстрела композитной керамической брони бронебойной пулей марки Б-32 калибра 7,62 мм со скоростью 840 м/с, толщина задерживающего слоя 10 мм.

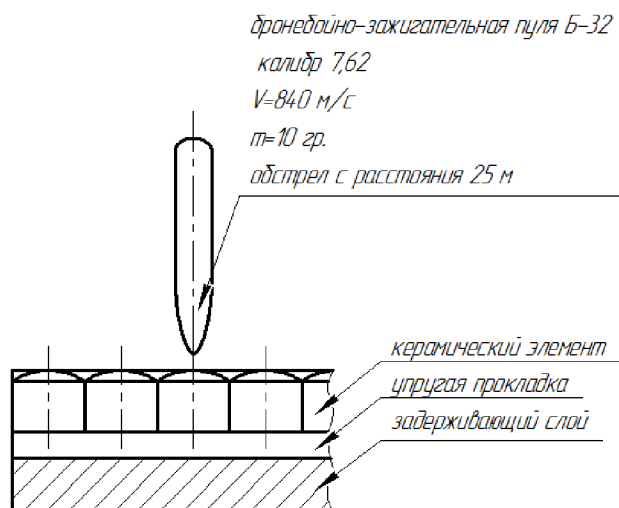


Рисунок 1 - Исходные данные для баллистических испытаний одного из образцов композитной брони

Баллистические испытания позволили получить следующие результаты: максимальное перемещение (прогиб) задерживающего слоя 22 мм и максимальная деформация задерживающего слоя 13 мм (рисунки 2 и 3).

На рисунке 3 указано максимальное перемещение верхней точки задерживающего слоя.

Следует отметить, что в эксперименте попадание пули пришлось не строго по центру керамического элемента, о чем свидетельствует фотография, приведённая на рисунке 2. Видно, что керамический элемент неравномерно деформировал задерживающий слой, поэтому речь должна идти о минимальном перемещении верхней точки задерживающего слоя в месте контакта с керамическим элементом. При этом, как показали замеры, указанное минимальное значение перемещения составило 8 мм. Для сравнительного анализа с расчётным значением перемещения целесообразно брать среднее, экспериментально полученное значение перемещения верхней точки задерживающего слоя, а именно 10,5 мм.

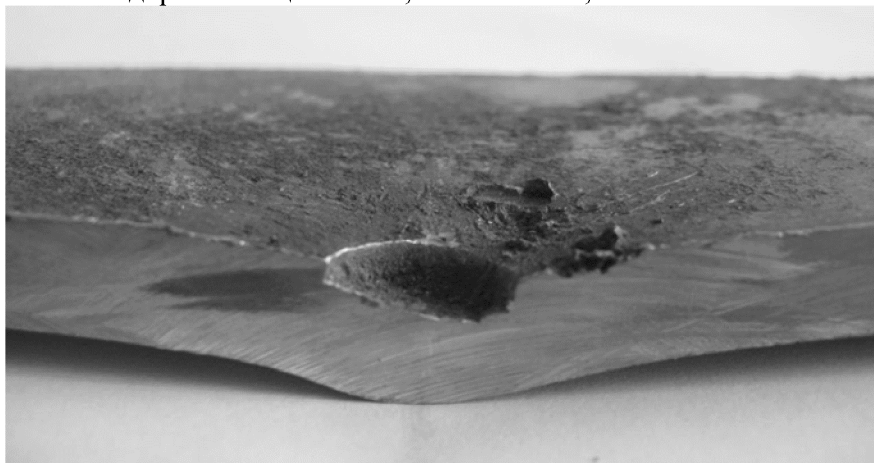


Рисунок 2 - Фотография задерживающего слоя образца композитной брони после его баллистических испытаний, с разрезом задерживающего слоя по оси симметрии

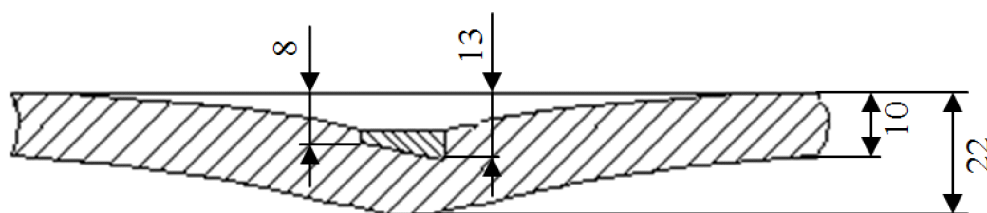


Рисунок 3 - Результаты обработки баллистических испытаний образца композитной брони. Экспериментально полученные максимальные значения перемещений в верхней и в нижней точках задерживающего слоя соответственно составили 13 мм и 12 мм. Экспериментально полученное минимальное перемещение верхней точки составило 8 мм

Проведены расчёты в динамической постановке упругопластического напряженно-деформированного состояния в контактной задаче взаимодействия керамического элемента с задерживающим слоем брони. При конечно-элементном моделировании выбиралась точность аппроксимации конечных элементов, оценивалось влияние выбора граничных условий, выбора коэффициента демпфирования, влияние упругой прокладки на результаты расчётов. В результате была получена осесимметричная конечно-элементная модель, по которой проводились дальнейшие расчеты. Исходные данные для расчёта представлены на рисунке 4.

Физико-механические характеристики материалов:

- Al_2O_3 : $\rho=4000 \text{ кг/м}^3$, $E=4 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\mu=0,22$;
- АМГ6: $\rho=2640 \text{ кг/м}^3$, $E=0,71 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\mu=0,3$, $\sigma_t=155 \text{ МПа}$, $\sigma_{вр}=315 \text{ МПа}$, $\delta=15 \%$.

Конечно-элементная расчётная схема, представленная на рисунке 5, содержит: для керамического элемента – количество узлов 396, количество элементов 360; для задерживающего слоя – количество узлов 6321, количество элементов 6000.

Результаты расчёта рассматриваемого образца брони представлены в таблице 1 в виде расчётного максимального перемещения (прогиба) и на рисунке 6 – в виде картины напряжений на деформируемом задерживающем слое в момент наибольшего его прогиба.

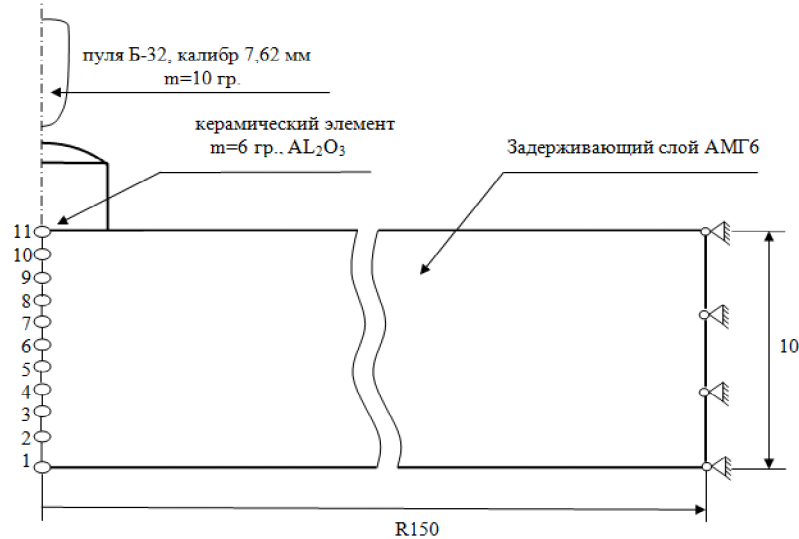


Рисунок 4 - Исходные данные для расчёта

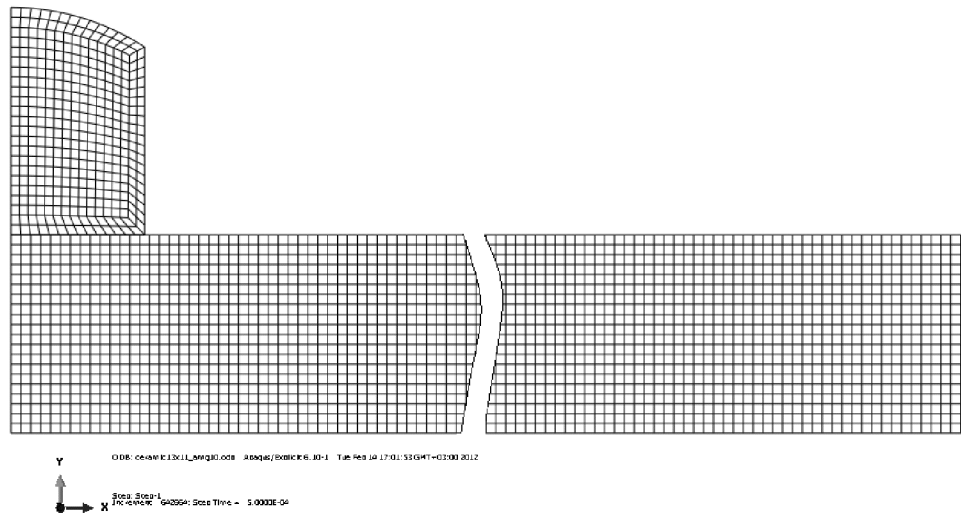
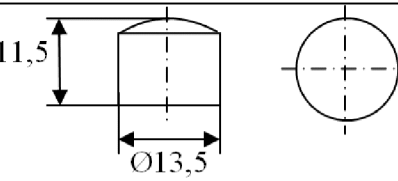
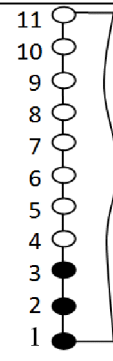
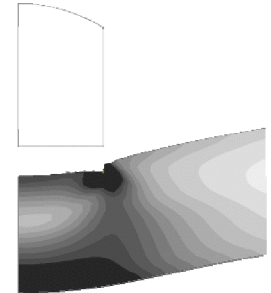


Рисунок 5 - Укрупнённая конечно-элементная расчетная схема

Таблица 1

Результаты расчета образца № 1 композитной брони

Исходные данные по образцу композитной брони	Расчётное максимальное значение перемещения (прогиба)	Расположение расчётных точек по оси симметрии задерживающего слоя	Картина деформаций задерживающего слоя в момент максимального прогиба
 <p>11,5</p> <p>Ø13,5</p> <p>Скорость после соударения с пульей: 525 м/с</p> <p>Суммарная масса керамического элемента и пули: 16 гр.</p>	<p>в точке 11: 10,7 мм</p> <p>в точке 1: 10 мм</p>		

Черный цвет – превышение предельных значений деформаций. Предельное значение деформаций – 15%.

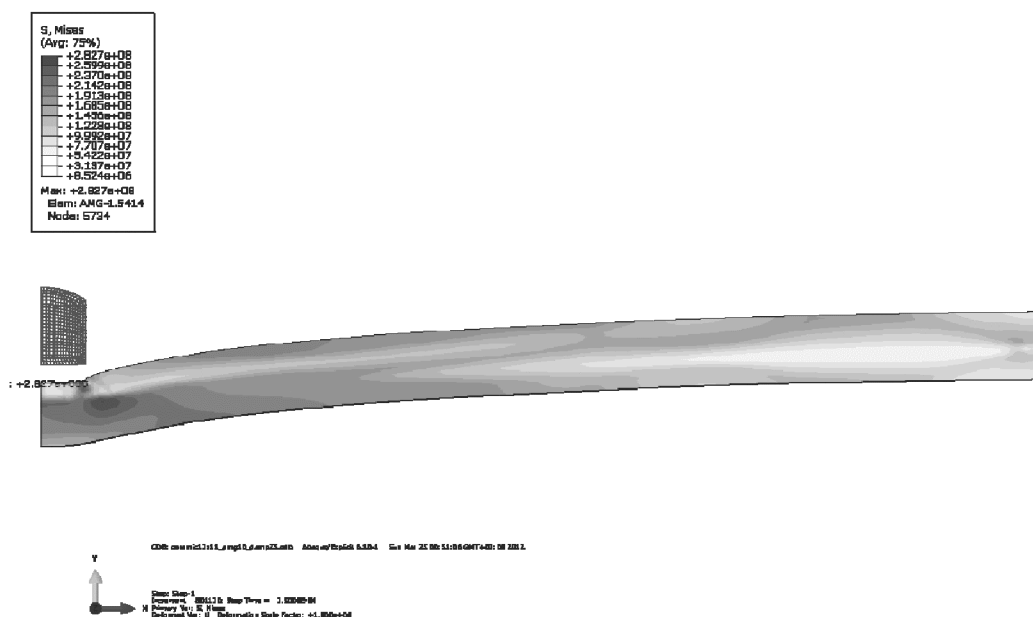


Рисунок 6 - Картина напряженно-деформированного состояния задерживающего слоя композитной брони в момент наибольшего его прогиба

Несущая способность задерживающего слоя оценивалась по максимальным расчетным деформациям (см. рисунок 4 и таблицу 1).

Сравнительный анализ полученных экспериментальных и расчётных результатов показывает хорошее совпадение по перемещениям, соответственно для верхней точки задерживающего слоя 10,5 мм и 10,7 мм и для нижней точки 12 мм и 10 мм. По результатам расчёта видно, что для некоторых расчётных точек максимальные деформации превышают предельное значение (см. таблицу 1). Это объясняется тем, что в данном расчёте рассматривается наиболее критический случай, соответствующий попаданию пули строго по центру керамического элемента, чего при испытаниях добиться крайне сложно. Кроме того, в данном расчёте не учитывалось наличие имеющейся в экспериментальном образце упругой прокладки. В целом отработанная расчётная модель даёт удовлетворительные, вполне объяснимые сравнительные результаты с экспериментальными данными и позволяет провести многовариантные расчеты различных конструктивных образцов брони с целью выбора наиболее рационального.

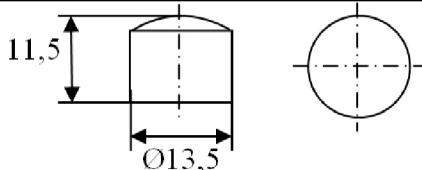
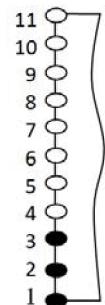
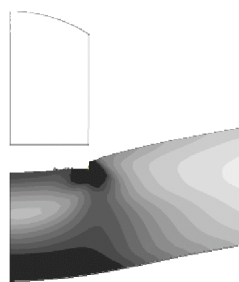
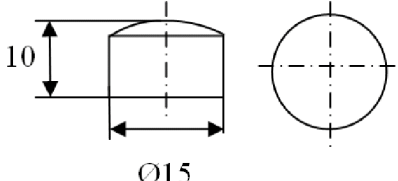
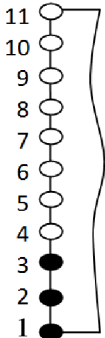
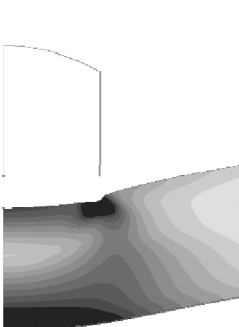
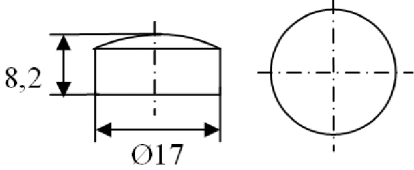

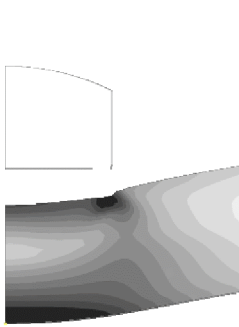
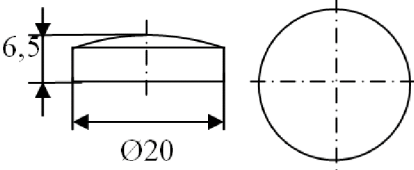
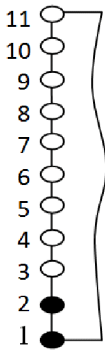
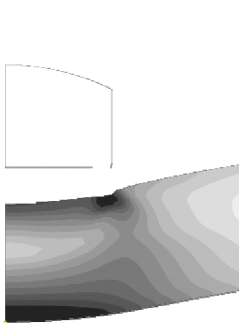
Было проведено исследование влияния площади контакта (основания) керамического элемента с задерживающим слоем на максимальный прогиб задерживающего слоя при условии одинаковой массы различных керамических элементов.

Результаты исследования показаны на рисунке 7 и в таблице 2. Видно, что существенное влияние на несущую способность композитной брони оказывает диаметр керамического элемента, т.е. площадь его основания.



Рисунок 7 - График зависимости максимального прогиба задерживающего слоя от диаметра керамического элемента

Результаты исследования влияния диаметра основания керамического элемента на прогиб задерживающего слоя

Исходные данные по образцу композитной брони	Расчётное максимальное значение перемещения (прогиба)	Расположение расчётных точек по оси симметрии задерживающего слоя	Картина деформаций задерживающего слоя в момент максимального прогиба
 <p>Скорость после соударения с пулей: 525 м/с Суммарная масса керамического элемента и пули: 16 гр.</p>	<p>в точке 11: 10,7 мм</p> <p>в точке 1: 10 мм</p>		
 <p>Скорость после соударения с пулей: 525 м/с Суммарная масса керамического элемента и пули: 16 гр.</p>	<p>в точке 11: 10,3 мм</p> <p>в точке 1: 9,7 мм</p>		
 <p>Скорость после соударения с пулей: 525 м/с Суммарная масса керамического элемента и пули: 16 гр.</p>	<p>в точке 11: 9,9 мм</p> <p>в точке 1: 9,4 мм</p>		
 <p>Скорость после соударения с пулей: 525 м/с Суммарная масса керамического элемента и пули: 16 гр.</p>	<p>в точке 11: 9,8 мм</p> <p>в точке 1: 9,3 мм</p>		

Черный цвет – превышение предельных значений деформаций. Предельное значение деформаций – 15%.

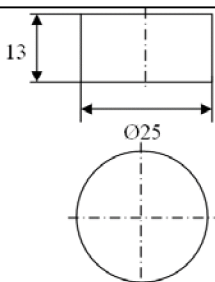
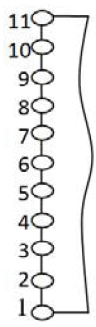
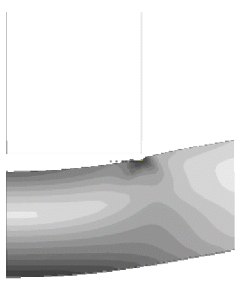
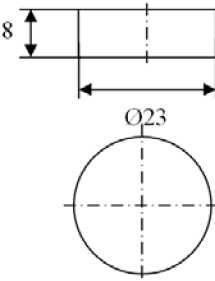

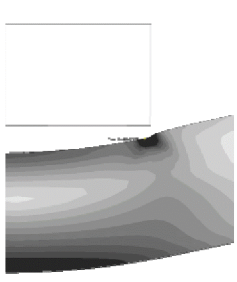
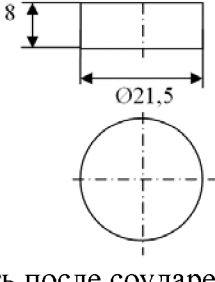

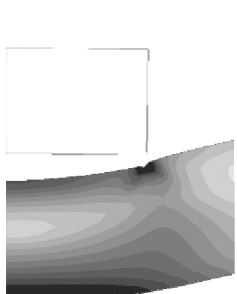
Рассматриваемую в работе конструкцию композитной брони предполагается использо-

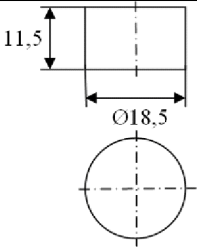

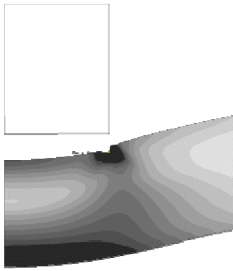
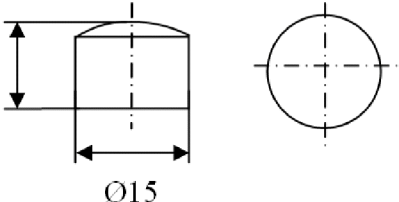
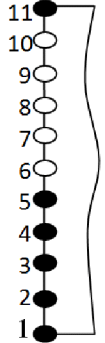
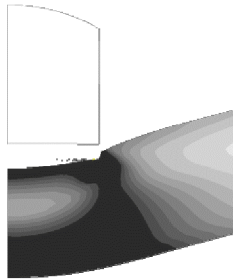
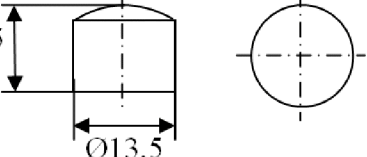
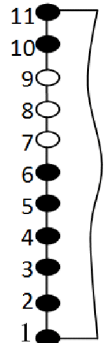
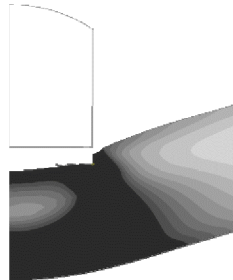
вать в качестве защиты не только от пуль, но и от осколков, которые имеют место при подрыве противолокационных ракет. При их подрыве происходит разлет осколков различной массы и скорости. Перед началом работы были заданы параметры осколочного воздействия, а именно: скорость, масса осколков и вероятный сценарий их воздействия на командно-технический пункт. Определены углы попадания осколка в различные панели кузова-контейнера при наиболее вероятном способе поражения.

Для указанных параметров по рассмотренной выше методике были проведены предварительные расчеты композитной защиты (см. таблицу 3).

Таблица 3

Результаты расчетов композитной брони при воздействии высокоскоростных осколков

Исходные данные по образцу композитной брони	Расчётное максимальное значение перемещения (прогиба)	Расположение расчётных точек по оси симметрии задерживающего слоя	Картина деформаций задерживающего слоя в момент максимального прогиба
 <p>Скорость после соударения с осколком: 323м/с Суммарная масса керамического элемента и осколка: 32,5 гр.</p>	<p>в точке 11: 10,8 мм</p> <p>в точке 1: 10,5 мм</p>		
 <p>Скорость после соударения с осколком: 517м/с Суммарная масса керамического элемента и осколка: 20,3 гр.</p>	<p>в точке 11: 11,9 мм</p> <p>в точке 1: 11,3 мм</p>		
 <p>Скорость после соударения с осколком: 564м/с Суммарная масса керамического элемента и осколка: 18,6 гр.</p>	<p>в точке 11: 12,2 мм</p> <p>в точке 1: 11,6 мм</p>		

 <p>Скорость после соударения с осколком: 542м/с Суммарная масса керамического элемента и осколка: 19,4 гр.</p>	<p>в точке 11: 12,5 мм</p> <p>в точке 1: 11,8 мм</p>		
 <p>Скорость после соударения с осколком: 750м/с Суммарная масса керамического элемента и осколка: 14 гр.</p>	<p>в точке 11: 14,4 мм</p> <p>в точке 1: 13,5 мм</p>		
 <p>Скорость после соударения с осколком: 810м/с Суммарная масса керамического элемента и осколка: 13 гр.</p>	<p>в точке 11: 15,3 мм</p> <p>в точке 1: 14,1 мм</p>		

Черный цвет – превышение предельных значений деформаций. Предельное значение деформаций – 15%.



Рисунок 8 - Момент попадания осколка в композитную броню

По результатам расчетов видно, что наиболее приемлемыми являются керамические элементы с высотой не менее 13 мм и диаметром не менее 25 мм.

На основании результатов расчетов были изготовлены варианты защитных композиций. Была разработана и согласована программа испытаний указанных композиций. Совместно со специалистами ФГУП ЦНИИмаш была отлажена методика испытаний образцов. Бы-

ло проведено 25 огневых испытаний образцов при угле обстрела 0° и 60° к нормали при температуре 20°C . При нормальной температуре были выбраны наиболее оптимальные варианты в плане выполнения требований по стойкости брони и минимальной удельной массе. Выбранные варианты дополнительно испытывались при температуре -60°C . На основании защитных композиций, минимальных по удельной массе и успешно прошедших все испытания, была разработана конструкторская документация противоосколочной защиты кузова-контейнера.

Литература

1. Патент РФ № 2329455, МПК F41H5/04, публ.20.07.2008г. Авторы: Заболотский А.А., Козлова Т.М., Кулаков Н.А.
2. Кулаков Н.А., Любин А.Н. Исследование взаимодействия пробойника с композиционной защитной панелью. Известия МГТУ «МАМИ» №1(5), научный рецензируемый журнал. М. окт. 2008, 53-56с.
3. Кулаков Н.А., Любин А.Н. Особенности конструкции композитной брони повышенной живучести. Известия МГТУ «МАМИ» № 1(11), научный рецензируемый журнал. М. окт. 2001, 46-51с.
4. Заявка № 2010150701/11 от 13.12.2010 на изобретение “Композитная броня повышенной живучести”. Авторы: Кулаков Н.А., Любин А.Н.
5. Заявка № 2011139666/11 от 30.09.2011 на изобретение “Композитная броня с облицовочным слоем”. Авторы: Кулаков Н.А., Любин А.Н.
6. Заявка № 2011139667/11 от 30.09.2011 на изобретение “Комбинированная композитная броня”. Авторы: Кулаков Н.А., Любин А.Н.

Использование теории оптимального управления при исследовании силовой установки гибридного автомобиля

Куликов И.А.

Университет машиностроения
8(495)223-05-23 (1204), mansmart@list.ru

Аннотация. В статье описываются теоретические аспекты создания стратегии управления для автомобиля с гибридной силовой установкой (ГСУ). Охарактеризованы свойства ГСУ, которые определяют топливную экономичность и экологическую безопасность гибридного автомобиля. Проведен анализ энергообмена в ГСУ и предложен путь его оптимизации с помощью использования методов теории оптимального управления, в частности динамического программирования (ДП). Представлена математическая модель автомобиля с ГСУ, используемая в программе поиска управления ГСУ. Изложены теоретические основы динамического программирования. Описаны наиболее интересные результаты исследований, проведенных с использованием ДП. В конце статьи сделаны выводы о целесообразности использования динамического программирования при разработке и исследовании ГСУ.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, гибридная силовая установка, ГСУ, стратегия управления ГСУ, оптимальное управление, динамическое программирование, математическое моделирование.

1. Свойства гибридных автомобилей

Основными целями создания гибридного автомобиля являются повышение эффективности использования энергии жидкого топлива (и, как следствие, уменьшение его расхода) и локальное улучшение экологической ситуации. Для достижения первой цели используются в основном два свойства комбинированной энергетической установки (КЭУ):

- возможность обеспечивать трогание и движение автомобиля на электрической тяге без использования двигателя внутреннего сгорания (ДВС), которая позволяет выключать ДВС при остановке автомобиля и, следовательно, не расходовать топливо в режиме холо-