

На правах рукописи
УДК 629.113, УДК 623.093

ШАШ НЕБРАС

**МЕТОД СОЗДАНИЯ БРОНЕКАБИН ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ
НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ТРЕБУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
ПО ЗАЩИТЕ ОТ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ**

Специальность 05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

МОСКВА – 2018

Работа выполнена на кафедре колесных машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

Зузов Валерий Николаевич,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры колёсных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

Келлер Андрей Владимирович,

доктор технических наук, профессор, проректор по стратегическому развитию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

Кулаков Николай Алексеевич,

Кандидат физико-математических наук, профессор кафедры динамики и прочности машин и со- противления материалов Московского Политеха

Ведущая организация:

Нижегородский государственный технический университет (НГТУ) им. Р.Е.Алексеева

Защита состоится « 04 » июня 2018 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н.

Е.Б. Сарач



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность: Развитие средств поражения и широкое распространение террористических действий в нестабильных регионах или в локальных конфликтах стимулировало создание новых образцов техники для транспортировки людей с броневой защитой. В настоящее время используются разные материалы для бронезащиты, свойства которых постоянно совершенствуются. При разработке таких конструкций, в том числе бронекабин, приходится решать сложные и взаимоисключающие проблемы: обеспечение требуемой защиты, отвечающей жестким стандартам, при минимальной массе конструкции и ее стоимости. В связи с этим возникает необходимость в теоретической оценке создаваемой конструкции на стадии проектирования, позволяющей выбрать наилучший вариант, сократить время и стоимость разработки и количество испытуемых образцов. Таким образом, тема данной научной работы, посвященной разработке метода совершенствования конструкции бронекабин грузовых автомобилей на стадии проектирования с целью удовлетворения требований безопасности против стрелкового оружия, является актуальной.

Научная новизна результатов выполненных исследований, выносимых на защиту:

- в разработке метода совершенствования конструкций бронекабин грузовых автомобилей на стадии проектирования с целью удовлетворения требований по защите от стрелкового оружия, включающего в себя:
 - разработку оригинальных рациональных конечно-элементных моделей (КЭМ) бронелистов и пули применительно к различным металлическим сплавам (алюминиевым (АС) и стальным СС), отличающихся определенным типом и размером конечных элементов (КЭ), учетом взаимодействия пули и пластин различных толщин и углов (между пулей и пластиной) как однослойных, так и многослойных конструкций, обеспечивающих получение требуемой точности результатов расчётов при минимальных трудозатратах на подготовку и решение (многовариантное) с помощью программных комплексов, реализующих метод конечных элементов (МКЭ) (ANSYS и LS-DYNA);
 - разработку метода целенаправленного повышения сопротивления проникновению пули и уменьшения массы конструкции бронекабин грузовых автомобилей путём обоснованного задания рациональных параметров бронелистов и использования многослойных конструкций, являющимся новым подходом к проектированию бронекабин автомобилей.
- полученные новые научные результаты и выводы.

Цель работы: совершенствование конструкций бронекабин грузовых автомобилей на стадии проектирования для обеспечения требований стандартов уровня защиты против стрелкового оружия путём обоснованного задания рациональных параметров листовых конструкций из металлических сплавов.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие основные задачи: 1. Разработка рациональных КЭМ пластин из АС и пули для исследования пробития пулей, обеспечивающей получение результатов с приемлемой точностью и минимальным временем расчетов;

2. Определение степени влияния параметров АС бронелистов на сопротивление прониканию пули в конечно-элементном моделировании высокоскоростного удара пулей и выработка рекомендаций по их улучшению;
3. Разработка рациональных КЭМ пластин и пули для исследования пробития пулей монослойных и двухслойных пластин из СС, а также прогнозирование значений рациональных толщин и свойств стали для обеспечения требуемой защиты (по европейской норме EN1063);
4. Исследование влияния углов контакта пули с пластинами из разных СС различных толщин на степень проникания пули МКЭ в программном комплексе LS-DYNA на базе рациональных КЭМ пластин и пули с целью уменьшения толщин пластин из броневых сталей путём определения угла установки пластин, исключающего проникание пули;
5. Прогнозирование сопротивления прониканию пули в монослойные и многослойные пластины из СС;
6. Анализ влияния толщин пластин и угла наклона средней пластины в комплексных трехслойных конструкциях, обеспечивающих требуемый уровень защиты (« BR7 » по европейской норме EN1063) и минимальную массу конструкции и оценка целесообразности их применения;
7. Разработка метода совершенствования конструкции бронекабины, обеспечивающей защиту от стрелкового оружия в соответствии с требованиями стандарта уровня защиты.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработанный метод может быть использован при проектировании и доводке бронекабин грузовых автомобилей (в том числе на его базе можно создать кабину с требуемым уровнем защиты и уменьшить массу кабины);
- результаты численных исследований и рекомендаций позволяют выбрать наилучший (в перспективе оптимальный) набор критериев, таких как тип материала, толщина пластины, угол наклона пластины и использовать многослойные пластины в соответствии с требуемой степенью уровня защиты;
- теоретические и методологические разработки и полученные результаты используются в НИР и в учебном процессе научно-учебного комплекса «Специальное машиностроение» (НУК СМ) МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность научных положений диссертации подтверждалась известными теоретическими решениями, экспериментальными исследованиями, а также сравнениями теоретических результатов с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на:

- Девятой Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» (октябрь). М., 2016.
- Научной конференции, посвященной юбилею кафедры колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2016.
- Десятой Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» (сентябрь). М., 2017.

Реализация работы. Материалы диссертационной работы используются при обучении студентов кафедры колесных машин НУК СМ МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 научных статей, из них 4 в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, общим объёмом 6,42 п.л.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы. Работа содержит 151 страницы, 19 таблиц, 113 рисунков. Список литературы имеет 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации и общую характеристику работы.

В первой главе проведен обзор литературы по проблеме бронезащиты и методам её оценки.

С целью выявления современных тенденций и особенностей конструирования в работе проанализированы конструкции бронеавтомобилей в целом и их кабин разных типов.

Проблеме безопасности от поражения пулями, осколками и другими поражающими средствами посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ. Однако в открытой печати их существенно меньше, поэтому в диссертации в значительной степени представлены и проанализированы публикации зарубежных авторов. Рассмотрены стандарты, применяемые для оценки уровней броневой защиты в мире, в том числе ГОСТ Р 50963-96 (Россия), EN 1063 (Европа), BRV2009 (Германия) и др., и наиболее распространенные виды и типы пуль. На основе этого анализа в диссертации используются стандарт EN 1063 (Европа) и два типа пуль: 7,62мм «Шар НАТО» (с мягким свинцовым сердечником) и 7,62мм «АРМ2» (с жестким стальным сердечником). Проанализированы особенности различных материалов, применяемых для бронирования: стальные сплавы, алюминиевые сплавы, керамические материалы и др. В результате в данной работе сделан акцент на исследовании алюминиевых сплавов (из-за их лёгкости, жёсткости, прочности и стойкости к коррозии) и особенно стальных сплавов (как наиболее доступных, более плотных и относительно недорогих).

На основе проведенного анализа существующих методов расчета отмечено, что исследование пробития бронелистов конструкций, в том числе кабин, возможен только с помощью МКЭ. Причем, при моделировании быстротечного соударения объектов важную роль играет описание пластических эффектов в материале. Из анализа публикаций следует, что наиболее подходящей для поставленных задач является модифицированная версия Джонсона-Кука (MJC), поскольку она учитывает адиабатическое нагревание, высокую скорость деформации и большие эффекты деформации и позволяет получать приемлемую точность результатов расчетов. В конце главы сделаны основные выводы по проблеме исследования и обеспечения бронезащиты конструкций типа кабин автомобилей и поставлены основные задачи исследования.

Во второй главе сформулированы и решены основные цели данного этапа работы: разработка рациональной КЭМ для исследования пробития пулями бронепластин из АС, обеспечивающей получение результатов с приемлемой точностью и минимальным временем решения, определение степени влияния параметров АС в конечно-элементном моделировании высокоскоростного удара пулей на точность результатов и рекомендации по их назначению.

Для выполнения поставленных задач были проведены многовариантные расчеты, позволившие провести анализ решений для двух проблем исследования алюминиевых сплавов:

1. Численное моделирование пробития пластин из АС пулями стрелкового оружия с использованием МJC;
2. Оценка влияния параметров АС на сопротивление прониканию пуль 7,62 мм «Шар НАТО» и «АРМ2».

Для сравнения результатов в диссертации используются параметры «скорость» и «кинетическая энергия».

В первой задаче моделировалось и исследовалось пробитие пластин из АС AA5083-H116 (AA5), AA6082-T4 (AA6) и AA7075-T6 (AA7), используемых для бронезащиты, трех различных толщин ($h = 10, 20, 30$ мм) со скоростью удара $v_h = 830$ м/с во всех тестах. Для проведения расчетов разработаны модели бронепластины и пули (для решателя LS-DYNA) (Рис. 1).

Во второй задаче была проанализирована проблема влияния основных параметров материала (E , B , A , n , и m) на результаты моделирования МКЭ (на базе МJC) процесса проникания пуль «Шар НАТО» и «АРМ2» в пластины из АС (AA7) с двумя толщинами 10 и 30 мм, используемых в бронезащите.

Для обоснованного получения рациональной КЭМ использовалось моделирование 8-и узловыми КЭ постоянного напряжения с разным их количеством и размерами (Δ от 0,2 мм до 1,0 мм). Точность расчетных значений оценивалась сравнением с экспериментом.

В результате получено, что скорость пули «Шар НАТО» уменьшилась на 89% от ее первоначального значения при проникании в пластину толщиной 30 мм из АС AA7, на 55% при проникании в пластину из сплава AA6 и на 59% при проникании в пластину из сплава AA5.

Скорость пули «АРМ2» снизилась на 40,5% от её первоначального значения при проникании в пластину толщиной 30 мм из АС AA7, на 27,8% при проникании в пластину из АС AA6 и на 27,9% при проникании в пластину из АС AA5. На Рис. 2 показан процесс проникания пуль и на Рис. 3 зависимость между толщинами АС и остаточной скоростью пули v_{ost} «Шар НАТО» и «АРМ2».

На Рис. 4 показан механизм разрушения пластины при проникании пули в пластину для разных по сложности КЭМ. Рекомендуемый размер КЭ $\Delta = 0,2$ мм, при котором получена погрешность около 5% по сравнению с эксперимен-

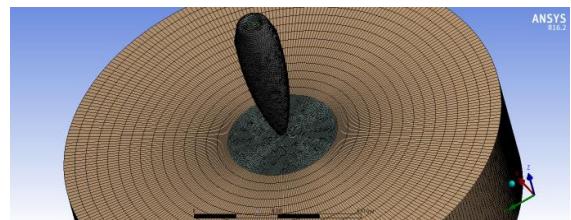


Рис. 1. КЭМ пули и пробиваемой пластины

том (при более грубой сетке КЭ получены значения остаточной скорости с большой погрешностью: до 70% при $\Delta = 1,0$ мм и до 30% при $\Delta = 0,5$ мм).

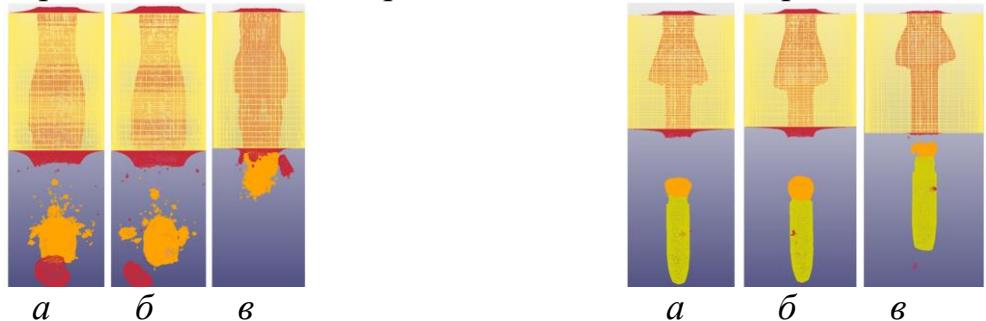


Рис. 2. Процесс проникания пуль «Шар НАТО» (слева) и «АРМ2» (справа) в пластину из АС толщиной 30 мм: *a* — АС АА5; *б* — АС АА6; *в* — АС АА7

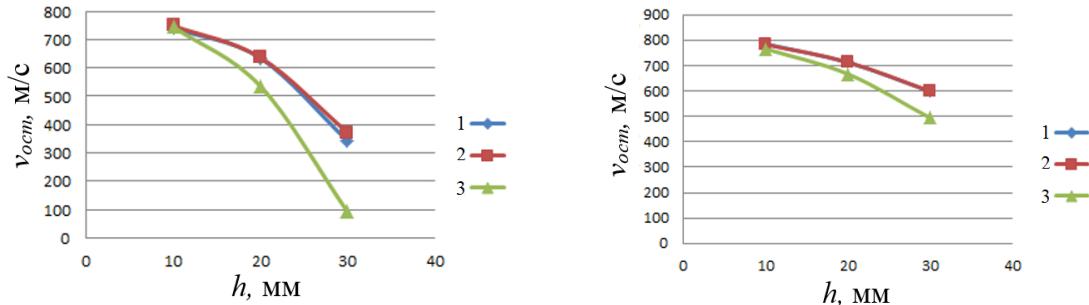


Рис. 3. Зависимость между толщинами АС h и остаточной скоростью пуль v_{ocm} «Шар НАТО» (слева) и «АРМ2» (справа): 1 — АА5; 2 — АА6; 3 — АА7

Для определения эквивалентного напряжения для модели МЖС необходимы пять параметров: A - предел текучести материала (МПа), B - константа деформационного упрочнения (МПа), n - коэффициент деформационного упрочнения, C - коэффициент скорости деформации и m - коэффициент термического размягчения. В работе проведена оценка влияния параметров A и m на остаточную скорость v_{ocm} (Рис. 5), а также влияние параметров E , B и n (выявлено, что их влияние очень мало).

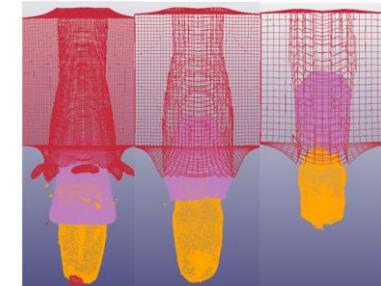


Рис. 4. Картина проникания пули и разрушения пластины для трёх КЭМ с различными размерами КЭ: *а* — $\Delta=0,2$ мм; *б* — $\Delta=0,5$ мм; *в* — $\Delta=1$ мм

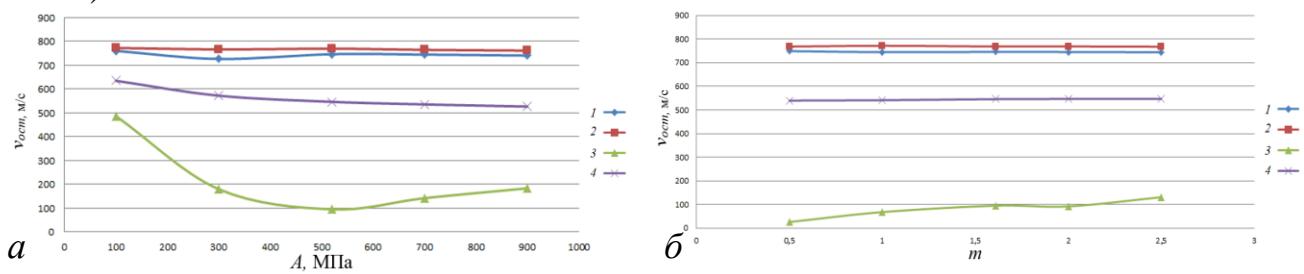


Рис. 5. Влияние основных параметров (*а* — A ; *б* — m) на остаточную скорость v_{ocm} : 1 — пуля «Шар НАТО» и $h=10$ мм; 2 — пуля «АРМ2» и $h=10$ мм; 3 — пуля «Шар НАТО» и $h=30$ мм; 4 — пуля «АРМ2» и $h=30$ мм

По результатам исследований сделаны следующие основные выводы:

1. Предел текучести является параметром, который в наибольшей степени влияет на величину остаточной скорости пули. 2. При малых толщинах АС (до 10 мм) влияние изменения параметров на остаточные скорости пули незначительно (при проникании пуль «Шар НАТО» и «АРМ2»). 3. Рекомендуем использовать КЭ с размером не более 0,2 мм для получения высокоточных результатов, адекватных результатам экспериментов. КЭМ с такими размерами КЭ относим к рациональным.

Третья глава. Цель данного этапа работы состояла: в разработке рациональных КЭМ пластин и пули для исследования пробития пулей монослойных и двухслойных пластин из СС; в прогнозировании значений рациональных толщин и свойств стали для обеспечения защиты по европейской норме EN1063; в исследовании влияния углов контакта пули с пластинами из разных СС и разных толщин этих пластин для последующего задания минимальных толщин пластин при обеспечении степени защиты BR7.

Представлены результаты и анализ решения двух проблем:

- анализ сопротивления прониканию пули «АРМ2» (с жестким стальным сердечником) в броневые стали;
- численное исследование влияния угла контакта пули 7,62 мм АРМ2 и бронелистов кабин бронеавтомобилей из СС на степень проникания пули.

Для обоснованного получения рациональной КЭМ как и в предыдущей главе использовалось моделирование 8-и узловыми КЭ постоянного напряжения с разным количеством и размерами КЭ (Δ от 0,2 мм до 1,0 мм). Точность оценивалась сравнением с экспериментом.

В первой части исследовалось пробитие пластин из СС Armox 560T (Ar), Domex protect 500 (Do), Weldox 700 E (We), Hardox 400 (Ha), и Armstal 500 (As), используемых для бронезащиты, пяти различных толщин h (6 мм, 8 мм, 10мм, 6+6 мм, и 8+8мм) со скоростью удара v_{ocm} 830 м/с и 920 м/с во всех тестах пулей 7,62мм «АРМ2». Также произведен анализ влияния коэффициента трения на результаты численного моделирования.

Во второй части исследовался процесс пробития пулей 7,62мм «АРМ2» пластин трех видов СС (Ar, Ha и We) при разных углах контакта α (90° , 80° , 70° , 60° , 50° , 45° , и 30°) шести различных толщин h (3 мм, 4 мм, 5 мм, 6 мм, 7 мм и 8 мм) со скоростью удара пули v_{ocm} 830 м/с во всех задачах.

В результате расчетов получено, что пуля пробила все монослойные пластины толщиной 6, 8, и 10 мм из всех СС. При толщине двухслойных пластин 6x2 мм пуля не пробивает пластины из сплавов Ar, Do, и As и пробивает пластины из сплавов Ha и We. Таким образом, уровень защиты «BR7» обеспечивается при использовании двухслойных пластин толщиной не менее 6x2 мм из сплавов Ar, Do и As. (на Рис. 6 показан механизм разрушения сплава Do при всех толщинах).

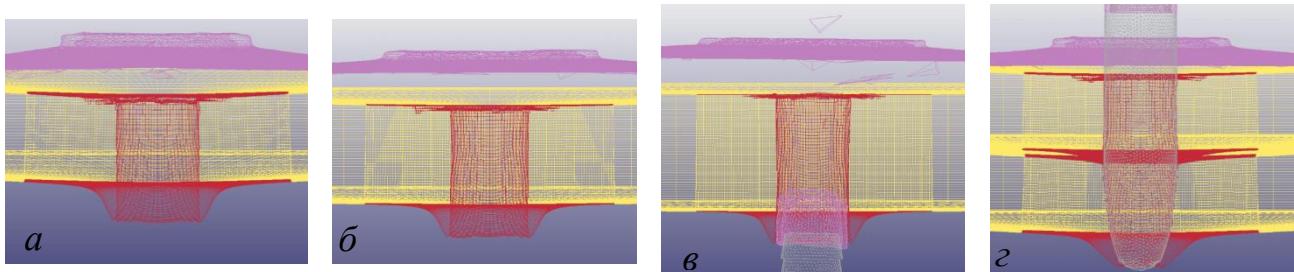


Рис. 6. Механизм разрушения сплава Domex Protect 500 при толщинах h : a — $h=6\text{мм}$, $б$ — $h=8\text{мм}$, $в$ — $h=10\text{мм}$, $г$ — $h=6\times 2\text{мм}$

Из анализа графиков (Рис. 7) можно сделать выводы, что характер уменьшения остаточных скоростей с увеличением толщины идентичен для сплавов Ar и Do и отличается у сплава As. Уменьшение остаточной скорости пули с увеличением толщины для сплава Ha не до нуля указывает на то, что при толщине более 13 мм пробитие пластины не происходит. Уменьшение остаточной скорости пули с увеличением толщины сплава We имеет близкий к линейному характер.

Анализ результатов контакта без трения и с трением показывает, что разница для пластин с малой и большой толщинами не превышает 3%, т.е. трением можно пренебречь.

Для сравнительной оценки в Таблице 1 представлены значения остаточных скоростей при проникновении пули в двухслойные пластины из разных материалов толщиной $6\times 2\text{ мм}$ для двух значений начальной скорости. При скорости 920 м/с пуля пробила пластины из всех рассматриваемых СС. Из Таблицы 1 видно, что увеличение начальной скорости пули на 90 м/с, привело к увеличению остаточной скорости.

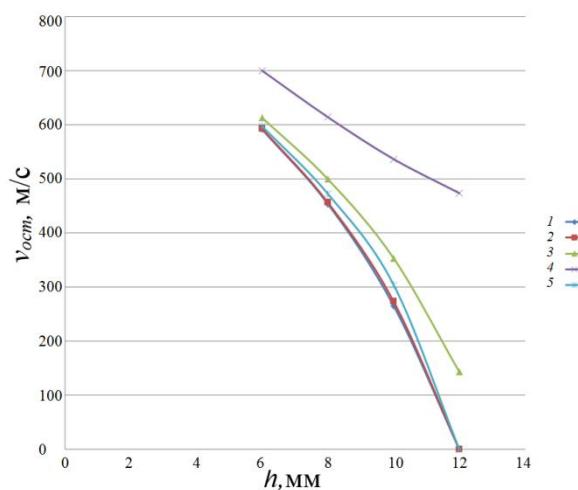


Рис. 7. Изменение остаточных скоростей v_{ocm} пули «АРМ2» в зависимости от толщин h и типов сплавов пластин: 1—Ar; 2—Do; 3—Ha; 4—We; 5—As

Таблица 1.

Остаточная скорость при толщине двухслойных пластин $6\times 2\text{ мм}$ для двух скоростей пули и пяти типов стальных сплавов

Скорость пули	Armax560T	Domex Protect 500	Weldox 700 E	Hardox 400	Armstal 500
830 м/с	0	0	473,61	143,13	0
920 м/с	263,91	271,85	640	400,02	323,71

Расчеты проводились для разных КЭМ при углах контакта $\alpha = 30, 45, 50, 60, 70, 80, 90^\circ$ для шести толщин ($h=3, 4, 5, 6, 7$ и 8 мм) со скоростью удара пули 830 м/с во всех задачах (Рис. 8).

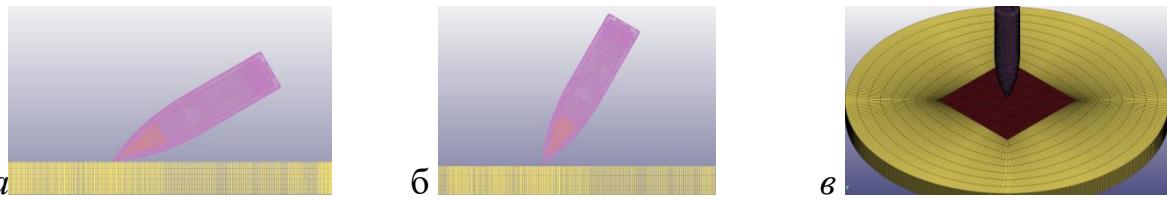


Рис. 8. КЭМ пули и пластины в момент контакта: *а* — $\alpha = 30^\circ$; *б* — $\alpha = 60^\circ$; *в* — 3-х мерное представление КЭМ

Отметим, что при $h = 3$ мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 4$ и 5 мм и $\alpha < 50^\circ$, при $h = 6$, 7 и 8 мм и $\alpha < 60^\circ$ пуля не пробила пластину из сплава Ar, а лишь скользнула по ней (Рис. 9, а). При $h = 3$ мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 4$ мм и $\alpha < 45^\circ$, при $h = 5$ и 6 мм и $\alpha < 50^\circ$, при $h = 7$ и 8 мм и $\alpha < 60^\circ$ пуля также не пробила стальную пластину из сплава Na. При $h = 3$ и 4 мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 5$ и 6 мм и $\alpha < 45^\circ$, и при $h = 7$ и 8 мм и $\alpha < 50^\circ$ пуля лишь скользнула по пластине из сплава We. Сердечник пули не пробил пластину из сплава Ar при $h = 3$ мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 4$ мм и $\alpha < 45^\circ$, при $h = 5$ и 6 мм и $\alpha < 50^\circ$, при $h = 7$ и 8 мм и $\alpha < 60^\circ$ (Рис. 9, б). При $h = 3$ мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 4$ мм и $\alpha < 45^\circ$, при $h = 5$, 6 и 7 мм и $\alpha < 50^\circ$, при $h = 8$ мм и $\alpha < 60^\circ$ сердечник пули также не пробил стальную пластину из сплавов Na. При $h = 3$, 4 и 5 мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 6$ и 7 мм и $\alpha < 45^\circ$, при $h = 8$ мм и $\alpha < 50^\circ$ сердечник пули лишь скользнул по стальной пластине из сплава We.

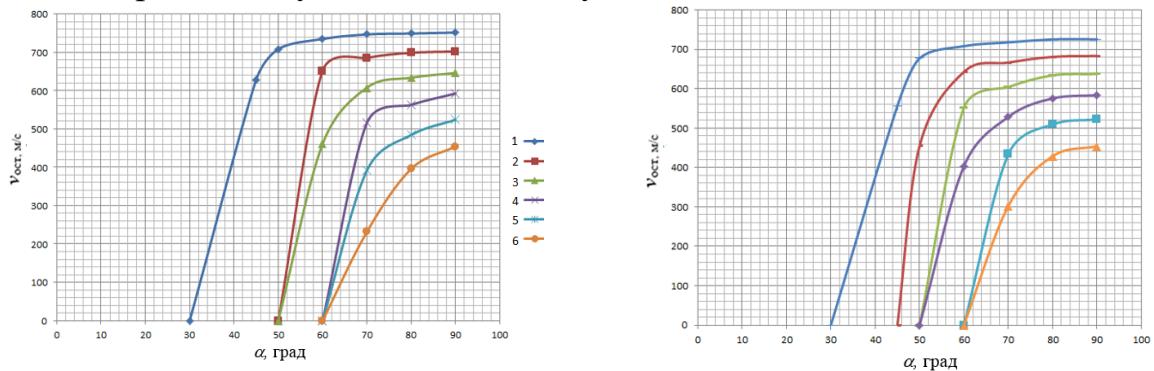


Рис. 9. Зависимости остаточной скорости $v_{ост}$ пули (а) и сердечника пули (б) от угла контакта α с стальной пластиной из сплава Ar разной толщины:
1 — $h = 3$ мм; 2 — $h = 4$ мм; 3 — $h = 5$ мм; 4 — $h = 6$ мм; 5 — $h = 7$ мм; 6 — $h = 8$ мм

На основе проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Монослойные пластины толщиной 6, 8 и 10 мм из всех исследуемых стальных сплавов не обеспечивают уровень защиты «BR7».
2. Двухслойные пластины из сплавов Ar, Do и As при суммарной толщине 12 мм обеспечивают уровень защиты «BR7».
3. Увеличение величины начальной скорости пули на 11% привело к увеличению ее остаточной скорости в 2 - 4 раза.
4. При скорости 920 м/с пуля пробила двухслойные пластины толщиной 6x2 мм из всех рассматриваемых СС, а при толщине 8x2 мм пуля их уже не пробила (кроме пластин из сплава We).
5. Эффект от уменьшения угла воздействия на сопротивление прониканию значительно повышается с увеличением толщины пластин более 7 мм.
6. Для обеспечения уровня защиты «BR7» рекомендуем и спользовать однослойные пластины: из сплава Ar толщиной 8 мм и углом наклона к направле-

нию воздействия пули не более 62° или толщиной 7 мм и углом не более 60° ; из сплава Na толщиной 8 мм и углом наклона не более 60° ; из сплава Ar толщиной 6 мм и углом не больше 56° . 7. Рекомендуем использовать КЭ с размером не более 0,2 мм (погрешность не выше 5%).

В **четвертой главе** поставлена цель этого этапа работы в прогнозировании сопротивления прониканию пули в монослойные и многослойные пластины и в обоснованном выборе толщин пластин и угла наклона средней пластины в комплексных трехслойных пластинах (КТП), обеспечивающих уровень защиты «BR7» по европейской норме EN1063 и минимальную массу конструкции, и оценке целесообразности их применения. Поставлена задача - оценить влияние двух типов пулестойких конструкций из СС на сопротивление прониканию пули и дать для сравнения значения масс конструкций: 1 - из монослойных и многослойных пластин; 2 – из КТП.

В первой части исследовалось пробитие пластин из СС Ar , Na и We суммарных толщин 12 мм для четырех разных моделей (монослойной 12 мм, двухслойной 2x6 мм, трёхслойной 3x4 мм и трёхслойной 3x4 мм с воздушным зазором 5мм между ними) со скоростью удара $v_{ocm} = 830 \text{ м/с}$ во всех тестах пулей 7,62 мм «АРМ2». Также проведен анализ влияния сочетания различных стальных материалов в двухслойной и трёхслойной модели на сопротивление прониканию пули.

Во второй части, для обеспечения эффективной защиты при минимальной массе конструкции необходимо было задать определенные толщины пластинам и углы наклона средней пластины, поэтому исследовалось пробитие КТП из СС Ar суммарной толщиной до 10,5 мм (эта величина меньше минимальной толщины двухслойной пластины 12 мм, обеспечивающей не пробитие данной пулей [Глава 3]) для восьми разных моделей (с разными соотношениями толщин и углами наклона средней пластины $\beta = 30^\circ$ или 35° , в соответствии с проведенными нами исследованиями) со скоростью удара $v_{ocm} = 830 \text{ м/с}$ пули 7,62 мм «АРМ2». Также проведен анализ и сравнение этих КТП с двухслойной пластиной 12 мм из той же стали [Глава 3] по массе, баллистике и обеспечению защиты по европейской норме EN1063. Результаты расчетов показаны на Рис. 10 и 11.

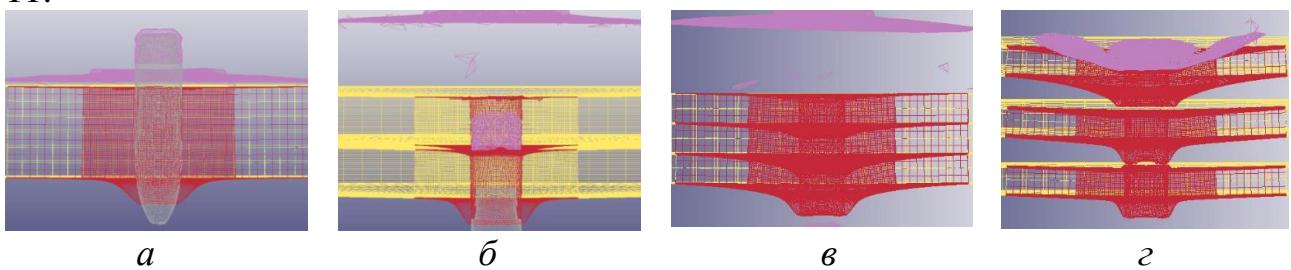


Рис. 10. Картина проникания пули в пластины Na при начальной скорости $V_i = 830 \text{ м/с}$: *а* — $h=12 \text{ мм}$; *б* — $h=6 \times 2 \text{ мм}$; *в* — $h=4 \times 3 \text{ мм}$; *г* — $h=4 \times 3 \text{ мм}$ с зазором 5 мм

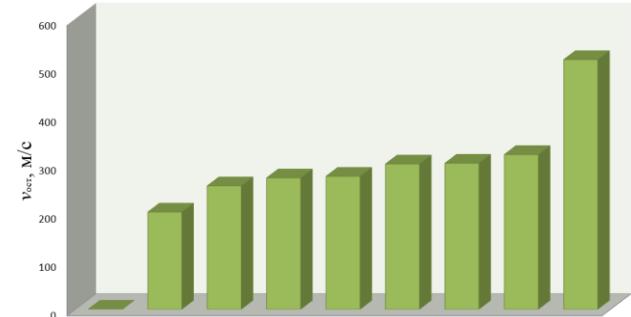
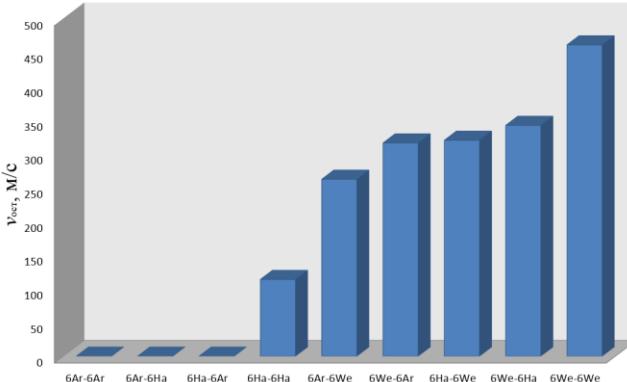


Рис. 11. Остаточные скорости пули $v_{ост}$ при суммарной толщине 12 мм двухслойных пластин (слева) и трёхслойных пластин (справа) (числа перед названием материала обозначают толщину в мм)

В КТП средняя пластина задается самой толстой (это наиболее эффективный вариант по проведенным нами исследованиям). Ей нужны крепежные опоры, поэтому будем устанавливать их на двух полосах с углублениями для фиксирования средней пластины под определенным углом (Рис. 12).

Размеры моделей S1, S2, S3, X1, X3, X4, X5 и β представлены в Таблице 2. Размеры X2 и X6 определяются при изготовлении окончательной модели.

Все полученные результаты показаны на Рис. 13.

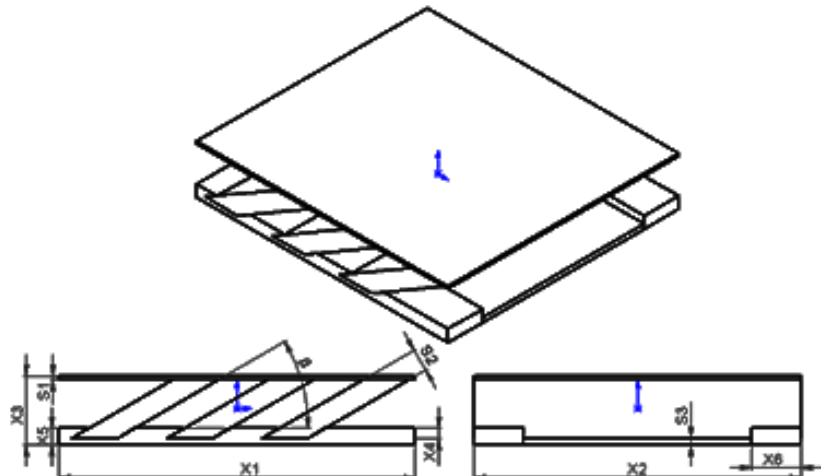


Рис. 12. Модель КТП

Таблица 2.

Размеры моделей

	S1 мм	S2 мм	S3 мм	X1 мм	X3 мм	X4 мм	X5 мм	β °
модель 1	3	3	3	70	20	2	5	35
модель 2	4	4	2	72	20	3	5	35
модель 3	3	5	2	74	19	3	5	35
модель 4	2	6	2	76	18	3	5	35
модель 5	1	7	2	95	17	3	5	30
модель 6	1	7	2	109	21	3	5	30
модель 7	1	7	2	78	17	3	5	35
модель 8	0,5	8	2	100	17	3	5	30

Если сравнивать массу этих моделей с массой пластины аналогичных размеров и результатами (остаточная скорость) из предыдущей Главы 3, то можно получить почти эквивалентную толщину по массе и результатам (на графике

соответственно «по массе» и «по результатам» - остаточная скорость пули при определенной толщине бронелистов) для каждой модели (Рис. 14). Мы видим, что эквивалентная толщина по результатам меньше, чем эквивалентная толщина по массе у моделей 1, 2 и 3. В то же время в моделях 4 и 5 эквивалентная толщина по результатам больше, чем эквивалентная толщина по массе, однако они не обеспечивают уровень защиты «BR7» по европейской норме EN1063.

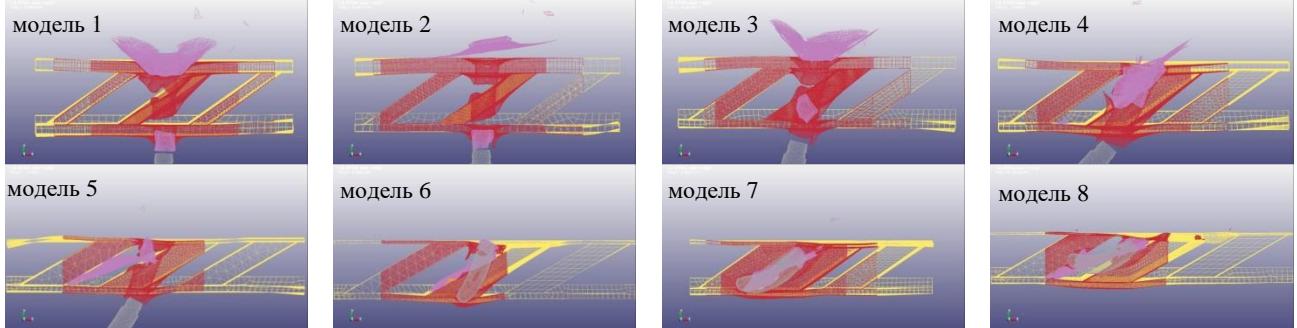


Рис. 13. Картина взаимодействия пули «АРМ2» и КТП из сплава Armax 560Т

Что касается моделей 6, 7 и 8, то эквивалентная толщина по результатам больше, чем эквивалентная толщина по массе, и они обеспечивают уровень защиты «BR7» по европейской норме EN1063. Итак, модель 7 является наилучшей по массе и результатам (снижение массы примерно на 15% по сравнению с однослойной или двухслойной конструкциями, обеспечивающими тот же самый уровень защиты). Кроме того, верхняя пластина может быть изготовлена из легкого материала, что сделает возможным дальнейшее уменьшение массы еще вплоть до 7%.

Недостатками этих моделей является сложность изготовления и высокая стоимость, однако на крупном производстве можно изготовить пресс-формы для монтажа, что позволит снизить затраты и время изготовления. Стоимость также может быть уменьшена за счет изготовления крепежных опор из обычной стали. Возможна также дальнейшая разработка КТП для обеспечения защиты против взрыва путем использования поглощающих энергию материалов между пластинами, например, АС, композиционных материалов и др. (что требует дополнительных исследований).

На основе проведённых исследований, можно сделать следующие выводы:
1. Сопротивление прониканию двухслойных пластин, изготовленных из одного и того же сплава стали, хуже, чем у монослоистых пластин, но лучше, чем у трехслойных пластин с зазорами или без них; 2. При использовании двухслойной пластины с разными стальными сплавами рекомендуется размещать пла-

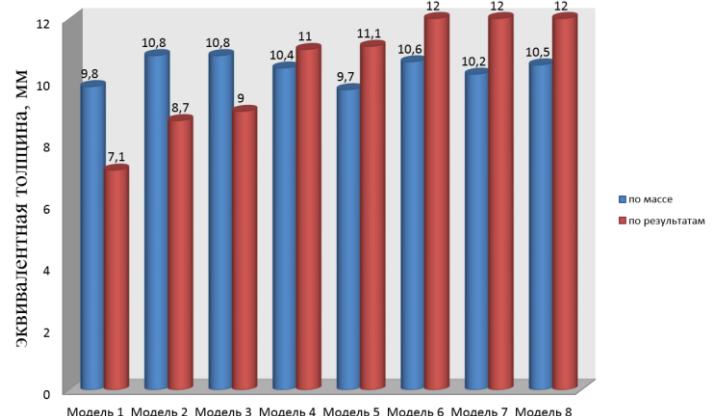


Рис. 14. Эквивалентная толщина по массе и результатам для каждой модели

стину с лучшими характеристиками сопротивления прониканию в переднюю зону по ходу движения пули; 3. В трехслойной смешанной конструкции порядок пластин по отношению к средней пластине имеет фундаментальное значение; 4. Зазор между пластинами из стальных сплавов, даже небольшой, значительно снижает сопротивление прониканию; 5. Использование КТП для бронированных кабин позволяет обеспечить требуемую защиту при меньшей массе конструкции (по сравнению с кабиной из однослойных или двухслойных бронелистов) с сохранением внутренних размеров кабины; 6. Допустимо использование моделей 6 и 8 для обеспечения уровня защиты «BR7», а также моделей 4 и 5 для уровня защиты меньше, чем «BR7»; 7. Использование средней пластины толщиной до 5 мм нецелесообразно (с точки зрения защиты и массы).

Пятая глава диссертации посвящена разработке метода совершенствования конструкции бронекабин и их параметров грузовых автомобилей на стадии проектирования для удовлетворения требованиям необходимой защиты.

В разработанной методе выделяем следующие основные этапы (Рис. 15):

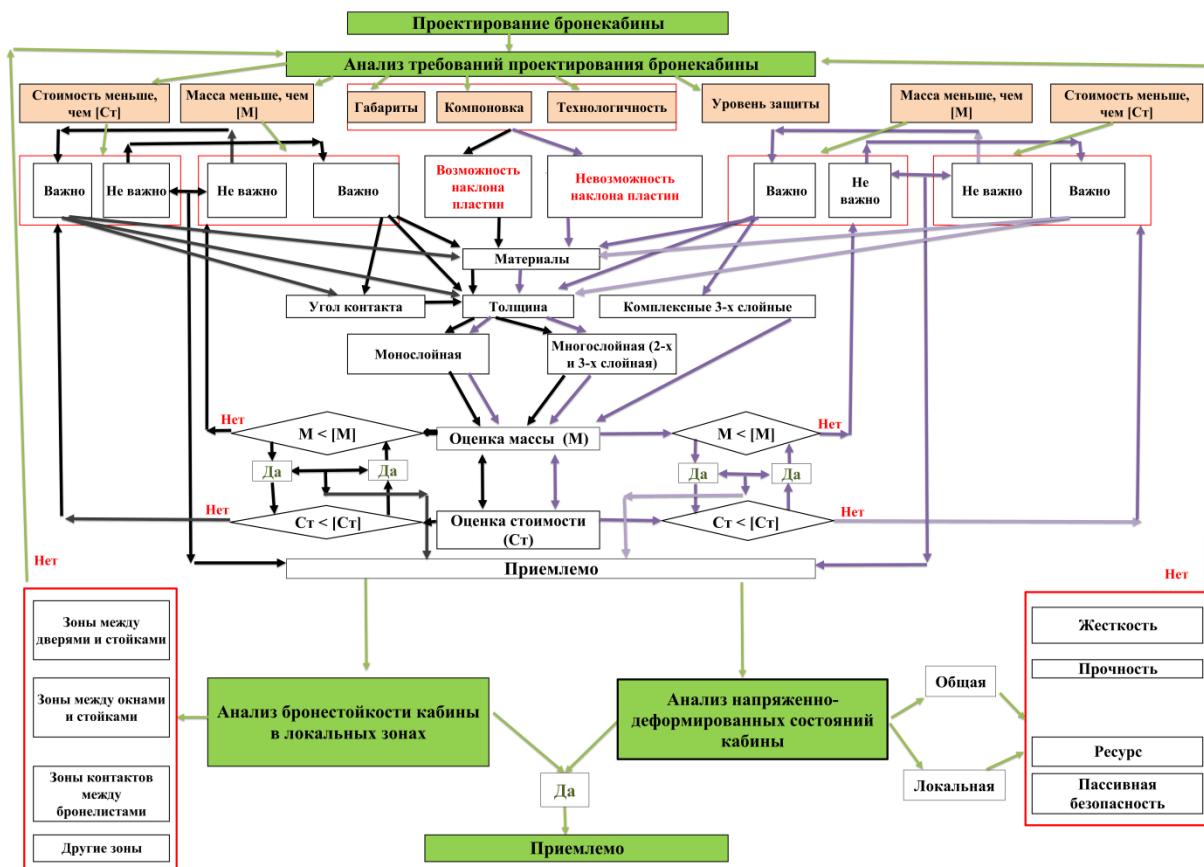


Рис. 15. Блок-схема метода

1. Анализ обеспечения требований при проектировании кабины (с позиций бронезащиты).
2. Анализ бронестойкости кабины в локальных зонах (зоны между дверями и стойками, окнами и стойками, зоны контактов между бронелистами и др.).

3. Анализ напряженно-деформированных состояний (НДС) кабины в целом и в локальных зонах (обеспечение требуемой жесткости, прочности, ресурса, пассивной безопасности).

Основные исследования в этой работе проведены для первого этапа. Он включает в себя три составляющие: требования проектирования, параметры проектирования и наилучшее (в перспективе оптимальное) решение с позиций бронезащиты, массы и стоимости. На этом этапе определяются и выполняются требования проектирования бронекабины, а именно: создание конструкции (габариты, компоновка и технологичность, материалы, толщина пластины, угол наклона пластины, монослойные или многослойные (2-х и 3-х слойные) пластины, и КТП), обеспечивающую необходимую степень защиты по стандартам ГОСТ Р 50963-96 Россия (или EN 1063 Европа, BRV2009 Германия и др.) и минимальную массу и стоимость. Здесь учитывается также возможность или невозможность наклона бронелистов.

Из всех возможных из рассматриваемых при проектировании вариантов выбирается наилучший по обеспечению уровня требуемой защиты, массе и стоимости.

1. Пример реализации метода создания бронекабины грузовых автомобилей. На Рис. 16 показаны трехмерная и конечно-элементная модели грузового бронеавтомобиля.

Бронекабина была разработана в 2-х вариантах: с использованием однослойных пластин толщиной 12 мм и с использованием КТП (как в модели №7: толщина 17 мм и направление средних пластин к верху кабины, Глава 4, Рис. 17, б).

Масса первой модели составляет 1616 кг, второй - 1271 кг. Таким образом, использование второй модели приводит к снижению массы примерно на 20%, при сохранении того же уровня защиты. Это очень важно для производства бронеавтомобилей, учитывая, что вторая модель более дорогая с точки зрения производства.

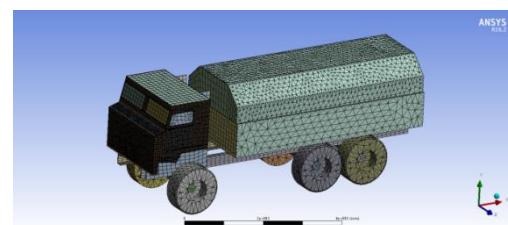


Рис. 16. КЭМ грузового бронеавтомобиля

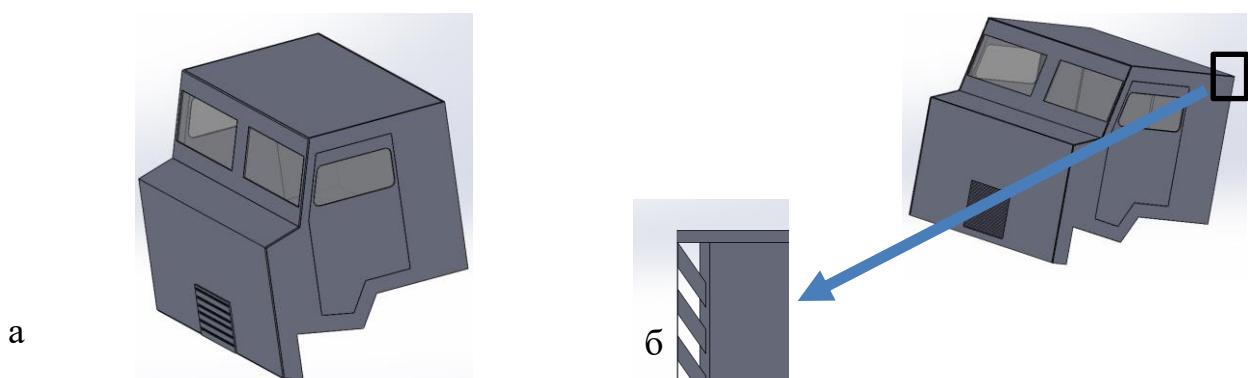


Рис. 17. Модели бронекабин: а - с использованием пластин толщиной 12 мм (модель1); б- с использованием комплексных трёхслойных пластины (модель2)

2. Анализ бронестойкости кабины в локальных зонах

Зоны между дверями и стойками, окнами и стойками, зоны контакта между бронелистами и др. являются уязвимыми местами в конструкции бронекабины. В качестве иллюстрации было рассмотрено пробитие пулей зоны между дверью и стойкой в бронекабине (модель 1) (Рис. 18, а). В КЭМ зазор принят равным 1 мм (при больших зазорах пробитие еще более вероятно) (Рис. 18, б). Пуля пробила кабину насквозь (Рис. 18, в). Для решения этой проблемы была добавлена планка толщиной 6 мм по контуру двери, закрывающая щель. В результате пуля уже не пробивает эту зону (Рис. 18, г).

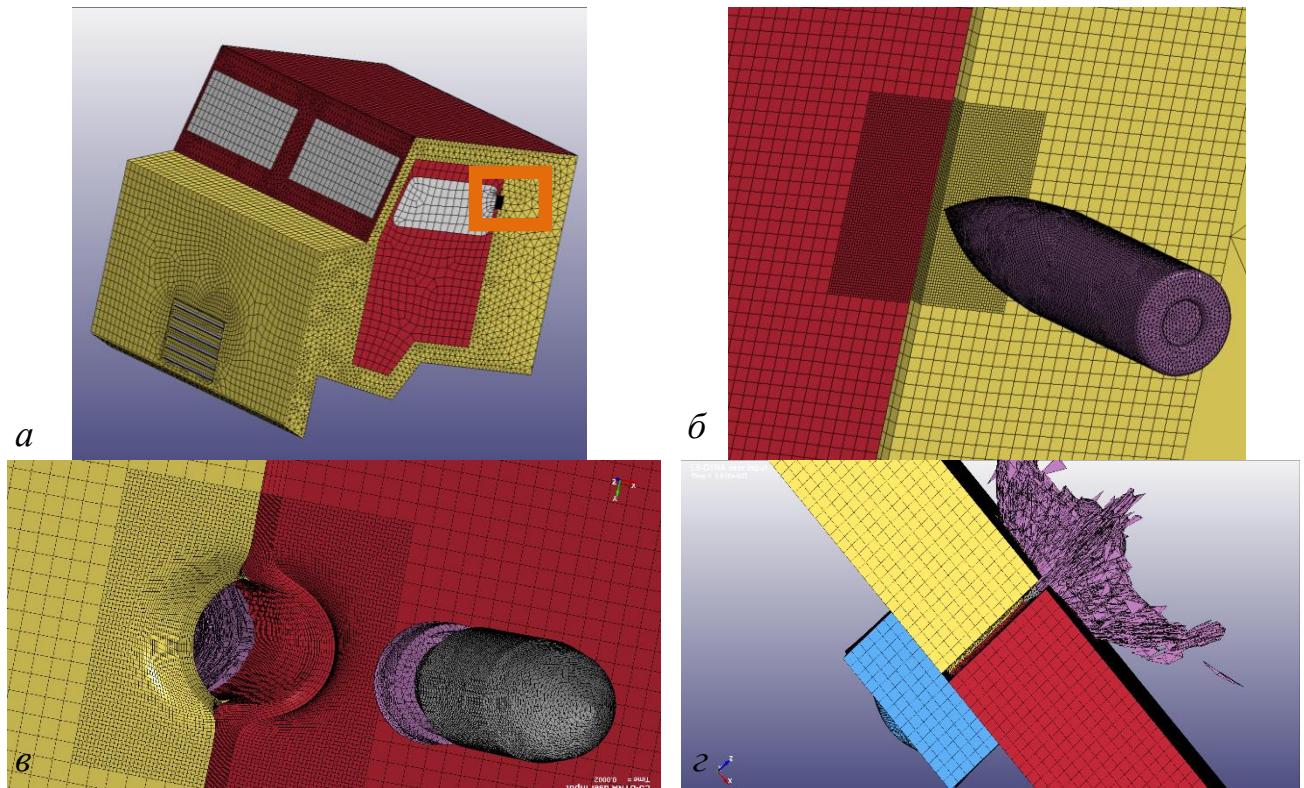


Рис. 18. Модели проникания пули в зону между дверью и стойкой: а – место попадания пули; б – КЭМ пули и кабины в зоне с зазором; в – пробитие пулей зоны с зазором; г – проникание пули в зазор с планкой (без пробития)

3. Анализ НДС бронекабины

Согласно разработанному методу проведены расчеты и оценка НДС бронекабин из КТП и монослоевой пластины 12 мм на экстремальные (предельные) режимы нагружения (в том числе, на режим опрокидывания автомобиля на задний угол крыши и режим вывешивания колеса). Несмотря на то, что кабина может быть изготовлена (сварена) из достаточно толстых листов, тем не менее, возможно наличие концентраторов, которые следует изучать. Особенно это касается кабин из КТП. В нашем случае из анализа результатов расчета следует, что напряжения для бронекабины из монослойных пластин 12 мм даже для экстремальных режимов имеют небольшие значения - до 74 МПа (вывешивание колеса), а напряжения в бронекабине из КТП примерно в два раза меньше. Однако характер изменений напряжений в КТП неоднородный, и зоны

сварки листов следует исследовать более детально (в том числе на возможность возникновения усталостных трещин). Деформации в конструкции небольшие.

На основе проведённых исследований можно сделать следующие выводы по Главе 5:

1. Создание бронекабины грузового автомобиля с использованием КТП приводит к снижению массы по сравнению с бронекабиной из однослойных пластин (до 20%).
2. Предлагаемый метод позволяет подобрать решение обеспечения бронезащиты в уязвимых зонах между дверями, стойками, окнами и др.
3. Исследование НДС проектированных кабин при наиболее тяжелых (предельных) режимах нагружения показало, что кабины обладают достаточной прочностью и жесткостью, однако может потребоваться уточненный расчет на наличие концентраторов и возможности образования усталостных трещин в них (особенно при использовании КТП).

ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. В работе разработан метод совершенствования конструкции бронекабин и их параметров грузовых автомобилей на стадии проектирования, который включает в себя:

- принципы создания рациональных КЭМ бронелистов (монослойных, двухслойных и комплексных трехслойных пластин), пули, и КЭМ автомобиля в целом;
- определение основных факторов, позволяющих создать кабину с требуемой бронезащитой и наименьшей массой.

2. Исследовано влияние параметров материалов (алюминиевых сплавов) на сопротивление прониканию пули, позволяющее осуществить выбор наилучших материалов и спрогнозировать их свойства на стадии проектирования для обеспечения требуемой бронезащиты грузовых автомобилей.

3. Проведено сравнительное исследование алюминиевых и стальных сплавов с точки зрения бронезащиты, массы конструкции и стоимости и сделан вывод о целесообразности использования стальных сплавов применительно к кабинам бронеавтомобилей.

4. Исследовано влияние угла воздействия пули или сердечника пули на сопротивление прониканию при разных толщинах пластин (от 3 мм до 8 мм) и сплавов (Armax 560T, Hardox 400 и Weldox 700E) и рекомендованы наилучшие соотношения между ними (в частности, толщина пластины 8 мм с углом наклона 30° из Armax 560T может использоваться вместо пластин толщиной 12 мм).

5. Проведено всестороннее исследование влияния параметров монослойных, многослойных и структурных трехслойных пластин из разных стальных сплавов на сопротивление прониканию пули и на массу бронелистов. Выявлено, что зазор между пластинами из стальных сплавов, даже небольшой, значительно снижает сопротивление прониканию; использование комплексных структурных трехслойных пластин для бронированных кабин позволяет обеспечить требуе-

мую защиту при меньшей массе конструкции (по сравнению с кабиной из однослоиных или двухслойных бронелистов) с сохранением внутренних размеров кабины; модель, имеющая наибольшую толщину средней пластины (7 мм) и углом ее наклона 35° и минимальную толщину наружной (1 мм) и внутренней (2 мм) пластин (модель №7), является лучшей с точки зрения защиты и массы.

6. Применение разработанного метода к кабине перспективного автомобиля с целью иллюстрации основных положений метода позволило предложить конструкцию, обеспечивающую требуемую бронезащиту при меньшей массе. Использование комплексных трехслойных пластин позволило существенно уменьшить массу кабины (до 20%) по сравнению с кабиной из однослоиных пластин.

МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Шаш Н. Численное моделирование пробития пластин из алюминиевых сплавов пулей «Шар НАТО» калибра 7,62 мм с использованием модели модифицированного метода Джонсона — Кука // Будущее машиностроения России: Электронный сборник трудов девятой всероссийской конференции молодых учёных и специалистов. Москва; 2016. С. 703-708. (0,57 п.л.)
2. Шаш Н., Зузов В. Н. Влияние параметров алюминиевых сплавов на сопротивление прониканию пуль 7.62 «Шар НАТО» и «АРМ2» // Наука и Образование. Электрон. журн. Эл. № ФС77-48211. 2016. № 11. С.15–27. DOI: 10.7463/1116.0850281. (1,38 п.л. / 1,05 п.л.)
3. Шаш Н., Зузов В.Н. Численное моделирование проникания пуль стрелкового оружия в пластины из алюминиевых сплавов с использованием модифицированной модели Джонсона–Кука // Наука и Образование. Электрон. журн. Эл. № ФС77-48211. 2017.№1. С. 1–19. DOI:10.7463/0117.0000922. (2,19 п.л. / 1,8 п.л.)
4. Шаш Н., Зузов В.Н. Анализ противопульной стойкости броневых сталей иностранного производства// Наука и Образование. Эл. № ФС77-48211. 2017.№5. С21-41. DOI:10.7463/0517.0001156. (2,31 п.л. / 1,7 п.л.)
5. Шаш Н., Зузов В.Н. Анализ сопротивления проникновению пули «АРМ2» в броневые стали // Будущее машиностроения России: Электронный сборник трудов десятой всероссийской конференции молодых учёных и специалистов. Москва; 2017. С. 455- 461. (0,57 п.л. / 0,4п.л.)
6. Шаш Н., Зузов В.Н. Численное исследование влияния угла контакта пули 7,62 мм АРМ2 и бронелистов кабин бронеавтомобилей из стальных сплавов на степень проникновения пули // Известия высших учебных заведений. Машиностроение . 2018. №3 (696). С 23-33. (1,15 п.л. / 0,9 п.л.)

Подписано к печати 30.03.2018г. Заказ № 177.

Объем 1.0 п.л. Тираж 100 экз. Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана,
105005, г. Москва, 2-я Бауманская, 5