

*Бруль С.Т., канд. техн. наук; Ткачук Н.А., д-р техн. наук;
Васильев А.Ю., Карапейчик И.Н., канд. эконом. наук*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОРПУСАХ ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН: ПОДХОДЫ, МОДЕЛИ, ЭФФЕКТЫ

Введение. Современные боевые бронированные машины легкой категории по массе предназначены для использования в самых разнообразных условиях, при действии различных видов средств поражения, при движении с большой скоростью по пересеченной местности и в плаву. Сами боевые машины оснащаются боевым модулем с усиленным артиллерийским вооружением, с большими усилиями отдачи и высоким темпом стрельбы, возможностью стрельбы в широком диапазоне углов в горизонтальной и вертикальной плоскости. При этом их бронекорпуса изготавливаются из различных по механическим и физико-механическим свойствам материалов преимущественно путем сварки бронелистов и элементов внутреннего силового каркаса. Таким образом, при боевом применении в бронекорпусах легких по массе боевых машин (как основных интегрирующих силовых элементов конструкции) возникают сложные физико-механические процессы и состояния. Характеристики этих процессов и состояний оказывают прямое и непосредственное влияние на тактико-технические характеристики (ТТХ) проектируемых легкобронированных машин (ЛБМ), в связи с чем их необходимо моделировать на этапе проектирования. Существующие традиционные методы и модели [1-7] обладают целым рядом недостатков, не позволяющим решать задачи прогнозирования реакции бронекорпусов на описанные выше воздействия с учетом большого разнообразия вариантов конструктивных решений и режимов их боевого применения. Во-первых, это проблема адекватности применяемых моделей. Во-вторых, это задача обеспечения вариативности исследуемого объекта. И, в-третьих, это вопрос автоматизации процесса исследований.

Частично вторая и третья из упомянутых задач нашла решения в статьях [1-7]. В то же время в качестве базовых моделей для расчетных исследований реакции бронекорпусов на различные виды воздействий (первая задача) используются традиционные упрощенные модели. Это не обеспечивает их адекватности при описании реальных физико-механических процессов, и поэтому задача разработки соответствующих усовершенствованных подходов и моделей для определения возникающих эффектов является актуальной и важной. Эта задача и решается в данной работе.

Подходы и модели для описания физико-механических процессов в бронекорпусах легкобронированных машин. Для описания физико-механических процессов, происходящих в бронекорпусах легкобронированных машин, можно использовать подходы и модели различной степени полноты, сложности и точности. Рассмотрим некоторые аспекты, возникающие при этом.

1. Моделирование геометрической формы и свойств материалов бронекорпусов. Первичной информацией в процессе исследования реакций бронекорпусов на различные виды воздействия является описание геометрической формы и свойств материалов, из которых они изготовлены. Тут можно выделить три аспекта: конструктивный, технологический и расчетный. Первый определяет способ представления формы. Как правило, бронекорпуса моделируют в виде пространственной совокупности оболочек, пластин и стержней (рис. 1).

Таким образом, трехмерный объем Ω , занимаемый конструкцией бронекорпуса, представляется в виде поверхностного S и линейчатого L «скелета», на который наращены соответствующие толщины h и сечения F :

$$\Omega = \bigcup_j S_j \times h_j \bigcup_k L_k \times F_k. \quad (1)$$

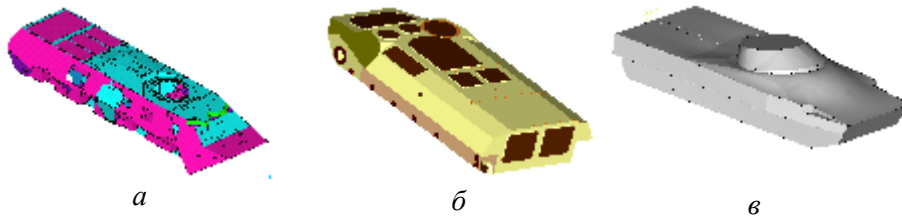


Рис. 1. Поверхностные геометрические модели бронекорпусов:
a – БТР-80; *б* – МТ-ЛБ; *в* – БМП-3

Такое геометрическое моделирование достаточно удобно как с точки зрения конструкторских и технологических, так и расчетных работ. При проведении первых достаточно описать проекцию каждой бронеплиты в плане и указать ее толщину, как правило, из набора сортамента поставки. Для вторых важна карта раскройки и порезки элементов, для чего тоже вполне достаточно владеть «усеченной» информацией (1). Для последних из вышеуказанного списка работ такое представление геометрической информации также удобно, поскольку оно естественным образом приспособлено для последующего конечно-элементного моделирования с применением конечных элементов типа Shell (оболочечные) и Beam (стержневые) (рис. 2).

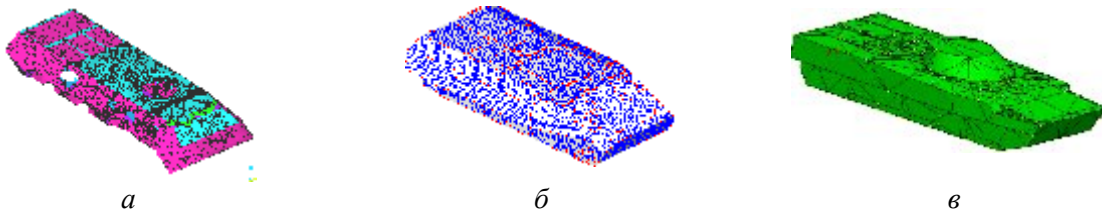


Рис. 2. Конечно-элементные модели бронекорпусов легкобронированных машин:
a – БТР-80; *б* – МТ-ЛБ; *в* – БМП-3

В результате используемое представление обладает большими преимуществами с точки зрения удобства, оперативности и вариативности. При этом очевидным недостатком является наличие коллизии при описании стыковых зон. Эти зоны являются, как правило, зоной размещения сварных швов и резкого изменения характера напряженно-деформированного состояния (НДС), которое не всегда адекватно описывается Shell - Beam моделями. Это также существенный недостаток.

Что касается описания свойств материалов, из которых состоит корпус, то тут важны несколько моментов. Во многих случаях бронекорпус моделируется в виде цельной структуры из однородного по свойствам материала. В то же время он естественным образом состоит из существенно разнородных материалов:

1) бронелисты изготавливаются из специальных сталей, алюминиевых или титановых сплавов, керамики и т.п., для них характерны высокие механические характеристики материала, обеспечивающие защищенность и прочность бронекорпусов;

2) силовой внутренний каркас изготавливается из прокатного профиля, как правило, в качестве материала служит углеродистая сталь с более низкими, чем у материала бронепанелей, механическими свойствами;

3) сварные швы, заполненные материалом электродов или сварной проволоки; в этом случае необходимо вести речь о комплексе физико-механических характеристик, определяемых, кроме свойств самого материала, также типами швов, их размерами и технологическими режимами сварки; характеристики материала сварного шва неравномерны по объему и могут быть осереднены в виде некоторых номинальных величин, контролируемых в процессе расчета в определенных зонах на удалении от корня шва.

Соответственно, уже на этапе создания математической и численной моделей геометрическую информацию и свойства материалов следует учесть отдельно, а особенно на

этапе оценки, например, прочности элементов бронекорпуса. Для решения этой задачи предлагается область, занимаемую конструкцией бронекорпуса, представить в виде:

$$\Omega = \bigcup_j \bar{S}_j \times h_j \bigcup_i \bar{L}_i \times \bar{F}_i \bigcup_k L_k \times F_k,$$

где \bar{S}_j – области, очерчиваемые бронепанелями, за исключением зон сварных соединений; \bar{L}_i – контуры сварных швов с сечениями \bar{F}_i .

В данном представлении автоматически получаем весь комплекс информации, требуемый для создания расчетных моделей элементов бронекорпусов, учитывающий и конструкторскую (\bar{S}_j, h_j, L_k, F_k), и технологическую составляющие. Что касается задания различных свойств для различных материалов, то это после процедуры (2) можно реализовать естественным образом, заполнив соответствующие области $\bar{S}_j \times h_j, \bar{L}_i \times \bar{F}_i, L_k \times F_k$ заданными материалами (например, в данном случае: бронематериал, материал сварных швов, материалы внутреннего силового каркаса).

В результате применения описанного подхода формируется более полная, адекватная расчетная модель бронекорпуса, а, значит, и результаты расчетов будут ожидаемо точнее и детальнее.

II. Газодинамика обтекания ударной волной бронекорпусов легкобронированных машин. Ударная волна является мощным фактором, воздействующим на боевые машины. Особенно это воздействие чувствительно для тонкостенных бронекорпусов легкобронированных машин. В этом случае большие толщины, делающие воздействие избыточного давления на стенки корпусов и башен танков или других тяжелых боевых машин несущественным, отсутствуют. В связи с этим возникает задача физически более адекватного приложения всплеска избыточного давления на бронекорпус ЛБМ.

Традиционным способом представления эпоры распределения действующего давления (рис. 3) и временного распределения (рис. 4) по ходу распространения волны в этом случае неприменимы, т.к. искажают реальные картины. Для более точного определения распределения избыточного давления Δp при обтекании ударной волной бронекорпусов ЛБМ требуется решить задачу газодинамики с учетом реальной геометрии бронекорпуса. Математическая модель процесса [8] трансформируется к численной модели с применением технологий дискретизации, принятых в методах конечных элементов, конечных объемов и конечных разностей. Эта часть процесса описана в [8]. Рассмотрим, следуя этим работам, получаемые модели и результаты расчетов.

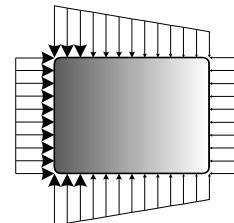


Рис. 3. Эпоры распределения действующего на элементы бронекорпуса давления при традиционном подходе

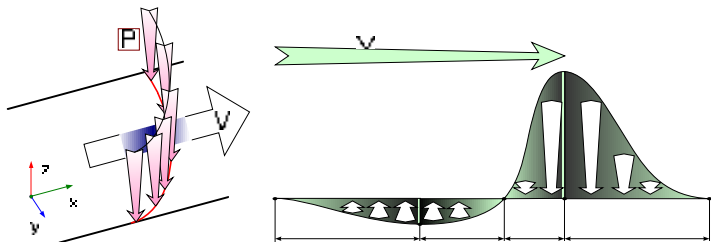


Рис.4. Вид пространственно-временного распределения избыточного давления по ходу распространения волны

избыточного давления Δp для легкобронированных машин. Видно, что сам характер рас-

На рис. 5 представлены дискретные модели, использованные для анализа обтекания ударной волной бронекорпусов некоторых боевых машин. Видны зоны пристеночного сгущения сеток дискретизации. На рис. 6 – некоторые характерные распределения

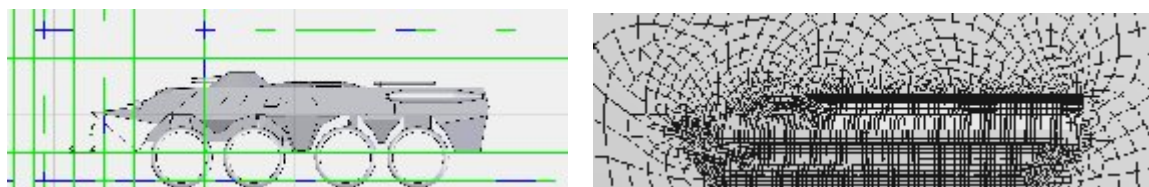


Рис. 5. Дискретные модели, использованные для анализа обтекания ударной волной бронекорпусов некоторых боевых машин (БТР-80 и МТ-ЛБ)

предела Δp неравномерен, его нельзя предсказать априори. В качестве других эффектов, кроме упомянутого – неоднородности распределения Δp , – можно выделить особенности, характерные для разных типов машин.

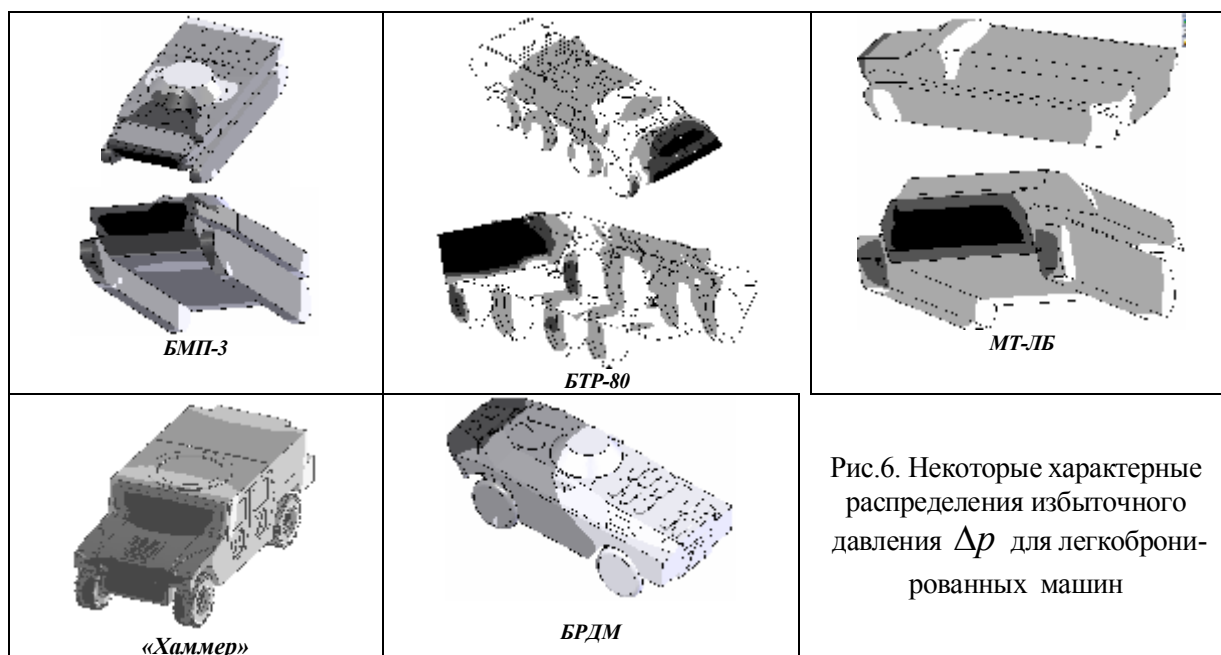


Рис.6. Некоторые характерные распределения избыточного давления Δp для легкобронированных машин

Так, бронекорпус МТ-ЛБ достаточно удачен с точки зрения обеспечения как можно более равномерного обтекания ударной волной. Далее следуют корпуса других боевых машин: БТР, BMP-3, BRDM, а наихудшими показателями обладает корпус автомобиля «Хаммер». При этом следует отметить такую особенность: при исследовании реакции бронекорпуса на действие ударной волны моделирование процесса обтекания является не *желательно вспомогательным*, а *обязательно необходимым* этапом, поскольку неучет этого эффекта может привести к многократным ошибкам в определении величины избыточного давления, действующего на отдельные панели бронекорпуса в различных проекциях.

III. Пластическое деформирование материалов элементов бронекорпуса. Расчет прочности бронекорпуса при действии высокоинтенсивных поражающих факторов (например, ударная волна с *большими* избыточными давлениями), неизбежно приведет к недопустимым погрешностям, если в модели поведение материала не будет заложена возможность появления пластических деформаций. Действительно, коль скоро бронекорпус состоит из бронелистов, изготовленных из высокопрочных материалов, и силового внутреннего каркаса из менее прочных материалов, то в процессе совместного деформирования бронекорпуса под действием избыточного давления в определенный момент материал этого каркаса начнет переходить в зону упруго-пластического деформирования (рис. 7). Как показывает практика

расчетов и экспериментальных (полигонных) испытаний, необходимое для начала такого перехода избыточное давление незначительно.

Рассмотрим схематически поведение материала бронекорпуса при действии нарастающе-спадающего избыточного давления Δp (см. рис. 7). Без учета пластических деформаций напряжения в элементах корпуса прямо пропорциональны деформациям ε , а текущий их уровень находится, в зависимости от уровня Δp в тот или иной момент времени, на прямой $0-1-2'$ (путь I). С учетом пластических деформаций напряжения следуют пути II: $0-1-2-3$ (здесь 2 – момент достижения максимума Δp и начала разгрузки). Кроме того, возможен путь III: $0-1-2-4$ (4 – точка начала разрушения).

Видно принципиальное отличие путей I и II – III (см. рис. 7). В первом случае нет возможности учесть историю нагружения и нелинейность поведения материала, во втором она есть. Это качественно новый эффект, привносимый в расчетную модель бронекорпуса. Он также дает и значительный количественный эффект. Так, если по модели идеально упругого тела получаем при некоторой нагрузке Δp напряжения $\sigma_{2'}$, то при использовании модели упруго-пластического деформирования – σ_2 . При этом может оказаться, что $\sigma_{2'} \gg \sigma_2$, причем $\sigma_{2'} > \sigma_B$.

Упругая модель материала приводит к завышению уровня расчетных напряжений. Она не дает возможности прогнозировать условия начала разрушения, в то время как упруго-пластическая модель при движении по линии III вдоль траектории $1-2-4$ дает оценку Δp , при которой материал начнет разрушаться.

Таким образом, данная модель, кроме прогнозирования и оценки остаточных напряжений при больших значениях избыточного давления Δp , дает возможность рассчитать также и его критический уровень, приводящий к началу разрушения конструкции. Это еще один существенный эффект от применения более адекватной модели поведения материала в расчетной модели бронекорпуса.

Естественно, что при учете многокомпонентности НДС реальное поведение напряжений следует подчинить более сложным моделям, например, инкрементальным соотношениям теории пластичности. В то же время качественное объяснение поведения материала бронекорпусов в первом приближении согласуется с данными наблюдений и измерений при натурных испытаниях образцов легкобронированных машин под действием ударной волны.

IV. Ударный резонанс при действии серии импульсных нагрузок на бронекорпуса

легкобронированных машин. Боевые модули современных машин оснащены скорострельными артиллерийскими системами с темпами стрельбы до 1000 и более выстрелов в минуту и реактивным усилием отдачи несколько тонн. Это приводит к высокому уровню динамического нагружения бронекорпусов. Однако существующие традиционные модели для анализа динамических процессов в бронекорпусах не учитывают такой важный фактор, как возможность ударного резонанса в элементах бронекорпуса, который может быть вызван стрельбой из боевого модуля длинными очередями (рис. 8). Последовательность импульсов силы F с периодом $\tau = 2\pi/\omega$ может привести к ударному резонансу на собственных частотах [9]

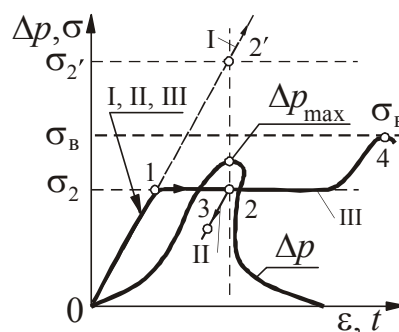


Рис. 7. Поведение компонент нагрузки и напряжений в элементах бронекорпусов

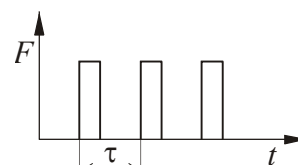


Рис. 8. Распределение реактивной силы отдачи при многоимпульсном нагружении в процессе стрельбы длинной очередью

$$p = n\omega, \quad n = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Условие наступления ударного резонанса (2) соответствует кратности некоторой собственной частоты частоте возмущения (стрельбы). В силу того, что степень кратности может быть разной, а спектр собственных частот колебаний (рис. 9) – достаточно густой, возможность реализации данного условия резко возрастает по сравнению с возможностью реализации обычного резонанса. На рис. 10 представлены некоторые формы колебаний бронекорпуса гусеничного тягача. Они дают представление о многообразии зон локализации резонансных явлений при ударном резонансе. Видно, что зачастую в ударном резонансе могут находиться элементы корпуса, удаленные от боевого модуля, а их собственная частота сильно отличается от частоты стрельбы (но близка к кратной от нее).

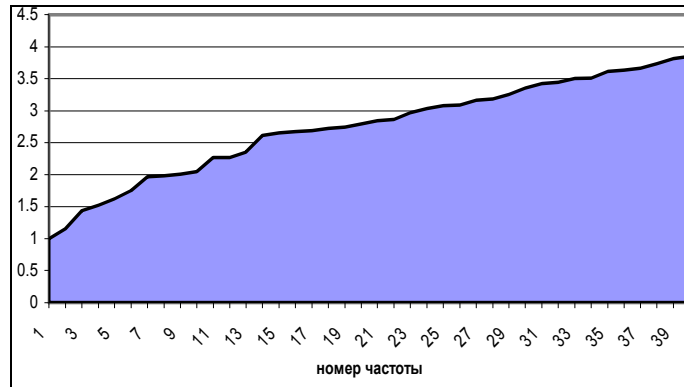


Рис. 9. Спектр относительных частот колебаний бронекорпуса тягача (частоты отнесены к первой)

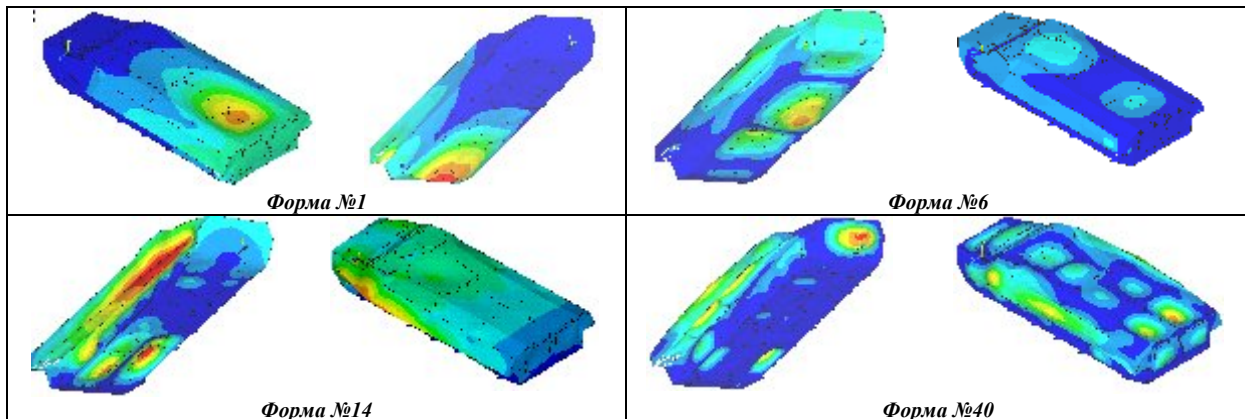


Рис. 10. Некоторые собственные формы колебаний бронекорпуса гусеничного тягача

Таким образом, привнесение в динамическую модель бронекорпусов условия ударного резонанса оказывает два эффекта. Первый из них состоит в обнаружении более разнообразных динамических процессов в исследуемых корпусах, второй – существенное ужесточение проектных ограничений, которые необходимо учесть и удовлетворить при проектировании бронекорпусов вновь создаваемых боевых машин для недопущения ударного резонанса в их силовых элементах.

Заключение. Описанный в статье анализ существующих подходов и моделей для исследования реакции бронекорпусов легкобронированных машин на действие различных поражающих факторов, на изменение режимов боевого применения этих машин, на варьирование конструктивно-технологических параметров позволил выявить ряд их существенных недостатков. В частности, предложены новые, усовершенствованные и более адекватные подходы и модели для учета особенностей изготовления бронекорпусов (наличие разнородных материалов и сварных соединений), для анализа газодинамики обтекания ударной волной бронекорпусов, для учета упруго-пластического поведения их материалов, а также условий возникновения ударного резонанса. Установлено, что при этом могут

наблюдаться эффекты, которые не обнаруживают традиционные модели.

Предложенные в работе подходы и модели послужат методологической основой для построения усовершенствованных численных моделей элементов бронекорпусов. С их применением в ходе дальнейших исследований будут установлены количественные характеристики физико-механических процессов, протекающих в бронекорпусах, а также их влияние на ТТХ проектируемых машин. Это составляет содержание и направление дальнейших исследований.

Литература: 1. Общий подход к обоснованию параметров проектируемых машин на основе гибридных расчетно-экспериментальных моделей / А.Д. Чепурной, Г.П. Глинин, А.В. Литвиненко [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – 2009. – №1. – С. 103-109. 2. Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Э.В. Глуценко [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – 2004. – №2. – С. 85–96. 3. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – 2006. – №1. – С. 57–79. 4. Расчетно-экспериментальная идентификация параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств / Е.В. Пелешко, А.Ю. Васильев, Г.Д. Гриценко [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – 2007. – №1. – С. 95–100. 5. Ткачук Н.А. Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем / Н.А. Ткачук // Сб. научн. тр. “Динамика и прочность машин”. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып.56.– С. 175 –181. 6. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем. / Н.А. Ткачук, А.А. Капустин // *Вестник ХГПУ. Тем. вып. Динамика и прочность машин*. – 1999. – Вып.57. – С. 148–155. 7. Ткачук Н.А. Комбинированные расчетно-экспериментальные методы исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем / Н.А. Ткачук // *Механіка та машинобудування*. – 1999. – №1. – С. 37–46. 8. Васильев А.Ю. Исследование процесса обтекания корпусов легкобронированных машин ударной волной / *Механіка та машинобудування*. – 2009. – №1. – С. 97-108. 9. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука, 1977. –224 с.

Bibliography (transliterated): 1. Obwij podhod k obosnovaniju parametrov projektiruemyh mashin na osnove gibridnyh raschetno-jeksperimental'nyh modelej / A.D. Chepurnoj, G.P. Glinin, A.V. Litvinenko [i dr.] // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2009. – №1. – S. 103-109. 2. Reshenie zadach raschetno-jeksperimental'nogo issledovanija jelementov slozhnyh mehanicheskikh sistem / N.A. Tkachuk, G.D. Gricenko, Je.V. Gluwenko [i dr.] // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2004. – №2. – S. 85–96. 3. Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisanija / N.A. Tkachuk, G.D. Gricenko, A.D. Chepurnoj [i dr.] // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2006. – №1. – S. 57–79. 4. Raschetno-jeksperimental'naja identifikacija parametrov chislennyh modelej korpusnyh jelementov transportnyh sredstv / E.V. Peleshko, A.Ju. Vasil'ev, G.D. Gricenko [i dr.] // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2007. – №1. – S. 95–100. 5. Tkachuk N.A. Intensivnaja shema jeksperimental'nyh issledovanij jelementov tehnologicheskikh sistem / N.A. Tkachuk // *Sb. nauchn. tr. “Dinamika i prochnost' mashin”*. – Har'kov: HGPU. – 1998. – Vyp.56.– S. 175 –181. 6. Tkachuk N.A. Raschetno-jeksperimental'nyj metod issledovanija deformacij jelementov mehanicheskikh sistem. / N.A. Tkachuk, A.A. Kapustin // *Vestnik HGPU. Tem. vyp. Dinamika i prochnost' mashin*. – 1999. – Vyp.57. – S. 148–155. 7. Tkachuk N.A. Kombinirovannye raschetno-jeksperimental'nye metody issledovanija prochnostnyh i zhestkostnyh harakteristik jelementov tehnologicheskikh sistem / N.A. Tkachuk // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 1999. – №1. – S. 37–46. 8. Vasil'ev A.Ju. Issledovanie processa obtekanija korpusov legkobronirovannyh mashin udarnoj volnoj / *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2009. – №1. – S. 97-108. 9. Panovko Ja.G. Vvedenie v teoriju mehanicheskogo udara. – M.: Nauka, 1977. –224 s.

Бруль С.Т., Ткачук М.А., Васильєв А.Ю., Карапейчик І.М.

**МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОРПУСАХ
ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН: ПІДХОДИ, МОДЕЛІ, ЕФЕКТИ**

При проектному обґрунтуванні параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин необхідно враховувати весь спектр діючих навантажень та виникаючих при цьому фізико-механічних процесів. Для цього у роботі запропоновані нові підходи, побудовані удосконалені моделі та виявлені деякі ефекти. Основна увага приділена газодинаміці ударно-хвильових потоків, що обтікають корпус, пружно-пластичній поведінці його матеріалів, ударному резонансу при імпульсному навантаженні, а також впливу зварних швів на напружено-деформований стан досліджуваних бронекорпусів.

Brul S.T., Tkachuk N.A., Vasilyev A.Y., Karapeychik I.N.

MODELING OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROCESSES IN LIGHTLY ARMORED VEHICLES HULLS: APPROACHES, MODELS, EFFECTS

At the project foundation of lightly armored vehicles hulls parameters it is necessary to consider the whole range of operating loadings and emerging physical and mechanical processes. For this purpose new approaches are proposed, improved models are built and some effects are found in this work. The main attention is paid to gas-dynamics of shock wave flows around the hull; to elastic-plastic behavior of its materials; to shock resonance at impulse loading, and also the influence of welded seams on the stress-strain state of investigated armored hulls.

УДК 629.1.032.1

*Вакуленко В.В., канд. техн. наук; Возгрин Ю.В., Иванов Ю.П.,
Кузьминский В.А., Лазурко А.В.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВ ДВИГАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННЫМ ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ НА ВЫПУСКЕ

Актуальность темы. Преодоление водных преград расширяет возможности боевого применения танков. Высокие темпы и скоротечность боевых действий в современных условиях требуют от танков возможности быстрого, с ходу форсирования водных преград, без применения для этого специальных инженерных переправочных средств (понтонные переправы, перекидные мосты, и др.), которые, в свою очередь, требуют длительного времени на развертывание и могут использоваться только в определенных условиях. В настоящее время основным способом преодолением танком водной преграды является движение танка по дну.

Современными танками используется, в зависимости от глубины водной преграды, преимущественно два способа преодоления водных преград по дну:

- преодоление водных преград вброд, без установки дополнительного оборудования. При этом глубина брода, которую может преодолеть танк, ограничивается расположением воздухозаборных устройств силовой установки;

- преодоление водных преград под водой, после установки дополнительного съёмного оборудования (герметизирующих устройств, водооткачивающих насосов, воздухопитающих и выхлопных труб, и т.д.). Преодоление водной преграды этим способом требует дополнительного времени для подготовки танка, и как правило, требует наличия вспомогательного оборудования, для установки дополнительного съёмного оборудования.