

ДО ОБГОВОРЕННЯ

УДК 623.438: 539.3

*Литвиненко А.В., канд. техн. наук; Ткачук Н.А., докт. техн. наук; Васильев А.Ю.,
Литвин Б.Я., Шейко А.И.*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ БРОНЕКОРПУСОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Введение. Одной из актуальных научно-практических проблем при проектировании и технологической подготовке производства боевых легкобронированных машин является обоснование таких конструктивных и технологических решений, которые бы в наибольшей степени обеспечивали защищенность их бронекорпусов от воздействия поражающих факторов. Среди данного множества факторов выделяется, в частности, ударная волна. Она осуществляет распределенное по всей поверхности подвижное воздействие на бронекорпус. Численному и экспериментальному исследованию реакции бронекорпуса на данное воздействие посвящены работы [1-7]. В ходе проведенных исследований установлено, что для описания реакции корпусов на волновое воздействие требуется существенное совершенствование математических моделей данного процесса, для чего были модифицированы модели газодинамического обтекания ударной волной бронекорпусов и упруго-пластического деформирования элементов корпуса.

Проведенные на примере корпуса машин серии МТ-ЛБ расчеты продемонстрировали, что уже достаточно низкие уровни избыточного давления во фронте ударной волны приводят к появлению пластических деформаций, в первую очередь – в элементах внутреннего силового каркаса. Это заставило обратиться к проблеме концептуальных формулировок проектных критериев защищенности бронекорпусов. Очевидно, что критерий появления первых пластических деформаций таковым быть не может, т.к. в основном корпус после этого состояния сохраняет сопротивляемость внешним нагрузкам, герметичность и форму.

Таким образом, требуется поиск уточненных решений. С этой целью было исследовано поведение материалов элементов бронекорпусов при дальнейшем росте нагрузки. Оказалось, что критерий сохранения герметичности бронекорпуса при получении значительных местных пластических деформаций дает возможность практически вдвое увеличить допустимую величину избыточного давления.

В то же время практически не изучен вопрос поведения элементов бронекорпусов при дальнейшем возрастании нагрузки. Эта проблема упирается, с одной стороны, в развитие математических моделей процесса, а с другой, – в модификацию действующих критериев защищенности бронекорпусов. В связи с этим в данной работе уделяется внимание этим задачам, определяя ее цель как разработку методологических основ дальнейших исследований.

Уровни и критерии защищенности при действии ударной волны на бронекорпуса боевых бронированных машин легкой категории по массе. При анализе быстротекающих процессов поведение конструкционных материалов становится зависимым от скорости деформирования (рис. 1). В этом случае необходимо рассматривать в качестве определяющей зависимости не кривую « $\sigma - \varepsilon$ », а поверхность « σ » в

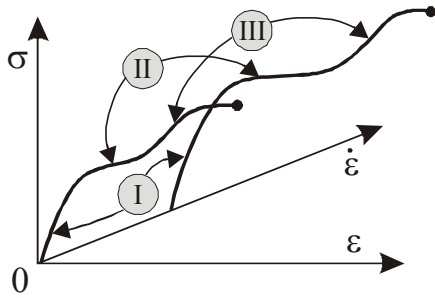


Рис. 1. Кривые зависимостей « $\sigma - \epsilon - \dot{\epsilon}$ » при скоростном деформировании

координатах « $\epsilon - \dot{\epsilon}$ ». Кроме того, при этом сдвигаются участки упругого деформирования I, развития упруго-пластических деформаций II и упрочнения III (см. рис. 1).

В дополнение к данным обстоятельствам при повышенных скоростях деформирования может изменяться и механизм разрушения различных материалов. Например, могут сменять друг друга критерии предельных состояний по максимальной деформации, по максимальной интенсивности напряжений, по главным максимальным напряжениям и т.п. Первые из них ха-

рактерны для пластического материала, последний – для хрупкого. Следовательно, следует принимать в расчет не только уровень напряжений, но и вид напряженного состояния, т.е. соотношение различных компонент тензора напряжений.

Следует также учитывать и различные свойства и характеристики материалов бронепанелей, а также элементов внутреннего силового каркаса (рис. 2). Деформирование элементов бронекорпусов в целом происходит совместно, однако уровень действующих напряжений различен. Это обстоятельство дополняется тем, что различные элементы бронекорпусов переходят на разные участки I-III (см. рис. 1) при разных уровнях нагрузок. В первую очередь в упруго-пластическое состояние переходит, как правило, материал элементов внутреннего силового каркаса. Если для его изготовления используется обычная конструкционная сталь, то этот материал может пройти все участки I, II и III вплоть до разрушения, в то время как материал бронепанелей останется на участке I либо только перейдет на начало участка II.

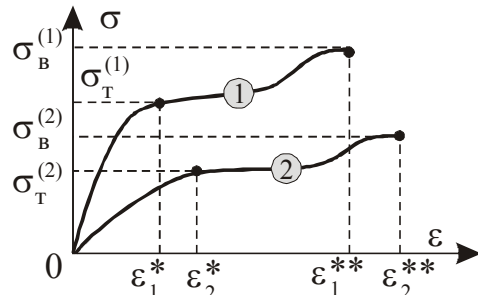


Рис. 2. Диаграммы « $\sigma - \epsilon$ » для материалов бронепанелей 1 и внутреннего силового каркаса 2

Учитывая, что в силу высоких механических свойств материалов бронепанелей они (см. выше) как правило, переходят на участки II, III после материала внутреннего силового каркаса, сформулирована следующая последовательность критериев уровней защищенности, которая используется при проектных численных исследованиях бронекорпусов.

А. Критерий недопущения пластического деформирования:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{(2)} \leq \sigma_{\text{T}}^{(2)}, \quad (1)$$

где индекс «2» относится к материалу элементов внутреннего силового каркаса, а величина $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ соответствует актуальному механизму связи « $\sigma - \epsilon$ » (т.е. эквивалентные напряжения по той или иной теории прочности).

В. Критерий сохранения герметичности бронекорпуса:

$$\epsilon^{(2)} \leq \delta, \quad (2)$$

где $\epsilon^{(2)}$ – деформации элементов внутреннего силового каркаса (в основном – их пластическая составляющая), а δ – предельно допустимый уровень остаточных деформаций, определяемый условиями сохранения герметичности бронекорпуса и зависящий от конструктивного его исполнения.

С. Критерий сохранения цельности элементов бронекорпуса:

$$\sigma_{\text{экв}}^{(2)} \leq \sigma_{\text{в}}^{(2)}. \quad (3)$$

Он определяет момент начала разрушения элементов внутреннего силового каркаса (см. рис. 2). После начала этого процесса дальнейший рост нагрузки может привести к лавинообразному процессу потери бронекорпусом какой-либо функциональности.

Именно на интервале между выполнением равенства в критерии (2) и до выполнения равенства в критерии (3) происходит ощутимый рост пластических деформаций в материале 2 и могут появляться пластические деформации в материале 1. Для описания поведения всей исследуемой конструкции требуется привлечение и адаптация соответствующего математического аппарата.

Математические модели для описания процесса деформирования бронекорпусов. Для адекватного описания процессов деформирования бронекорпусов в зоне больших и развивающихся пластических деформаций предпочтительным является применение теории инкрементального типа [8], связывающей скорости (приращения) деформаций и напряжений при активном нагружении соотношениями

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1-2\nu}{E} d\sigma \delta_{ij} + \frac{ds_{ij}}{2G} + \left[\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varepsilon}_{ij}} \right] d\Phi; \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}$ – шаровая (гидростатическая) часть тензора напряжений; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma$ – девиаторная его часть соответственно; E, G, ν – модули упругости I и II рода и коэффициент Пуассона соответственно; δ_{ij} – символ Кронекера; $\Phi(\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}) = 0$ – поверхность текучести.

Уравнение (4) можно обратить

$$d\sigma_{ij} = \frac{E}{1-2\nu} d\varepsilon \delta_{ij} + 2G de_{ij} + \alpha_{ijkl} d\varepsilon_{kl} + \beta_{ijkl} d\dot{\varepsilon}_{kl}; \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где $\varepsilon = \frac{1}{3} \varepsilon_{ii}$ – шаровая (гидростатическая) часть тензора деформаций; $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \varepsilon$ – девиаторная часть тензора напряжений; $\alpha_{ijkl}, \beta_{ijkl}$ – коэффициенты, получаемые из обращения уравнения (4).

Таким образом, уравнения (5) содержат 3 компоненты: первые 2 слагаемых соответствуют упругим деформациям, третье описывает приращение напряжений, вызванное приращением пластических деформаций, а четвертое вызвано изменением скоростей деформаций.

Принимая во внимание существенную зависимость параметров данной поверхности Φ от скорости деформирования, зависимость приращения напряжений при активном нагружении

$$\Delta \sigma_{\tau} = \Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_1 + \Delta \sigma', \quad (6)$$

содержит компоненту $\Delta \sigma_1$, вызванную приращением деформаций, и $\Delta \sigma'$, вызванную приращением скорости деформаций (рис. 3, здесь σ_+, ε_+ – приращения напряжений и деформаций при активном нагружении, а σ_-, ε_- – приращения напряжений и деформаций при разгрузке).

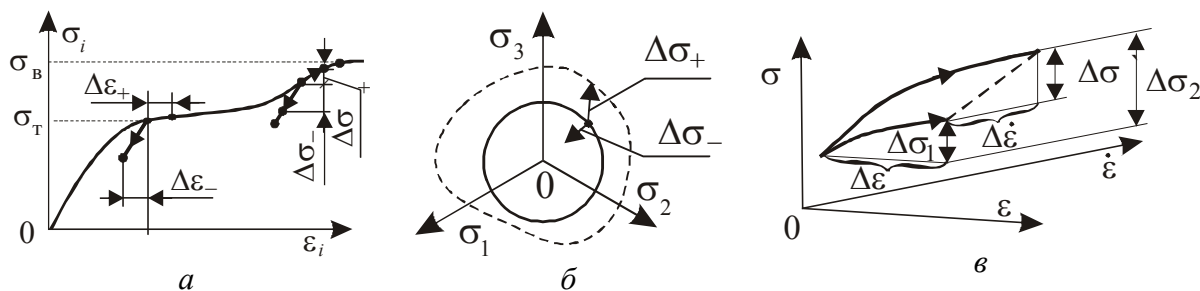


Рис. 3. Связь приращений деформаций и напряжений:
 а – в координатах интенсивностей напряжений и деформаций « $\sigma_i - \varepsilon_i$ »;
 б – в пространстве главных напряжений; в – в пространстве « $\sigma - \varepsilon - \dot{\varepsilon}$ »

Учитывая наличие в конструкции больших деформации, связь компонент тензора деформаций и вектора перемещений \mathbf{u} [8] –

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}). \tag{7}$$

Условия равновесия в дифференциальном виде

$$\sigma_{ij,j} + f_i(r, t) = \rho \ddot{u}_i, \tag{8}$$

где ρ – плотность материала.

Соотношения (7), (8), переписанные в приращениях или скоростях, образуют начально-краевую задачу. Эта система замыкается соотношениями (4), (5), а также соответствующими начальными и краевыми условиями:

$$\mathbf{u}(r, 0) = \mathbf{u}_0(r); \quad \dot{\mathbf{u}}(r, 0) = \dot{\mathbf{u}}_0(r); \quad \mathbf{u}(r|_{S_u}, t) = 0; \quad \mathbf{y}(r|_{S_\sigma}, t) = \mathbf{p}(r, t). \tag{9} \tag{10}$$

Здесь \mathbf{r} – радиус-вектор точек бронекорпуса, t – время.

В данном случае в (10) присутствует подвижная нагрузка $\mathbf{p}(r, t)$, описывающая действие ударной волны, движущаяся со скоростью \mathbf{v} в выбранной системе координат. При обтекании бронекорпусов машин возникает нестационарное неравномерное распределение избыточного давления, определение и описания которого подробно описано в работах Ткачука Н.А., Васильева А.Ю., Бруля С.Т. [1-7]. Таким образом, к усложненной модели поведения материала добавляется также и подвижная нестационарная нагрузка. В итоге получена система дифференциальных уравнений, начально-краевых условий и нагрузок, в результате можно считать завершенным этап формирования математической модели. Это дает возможность переходить к созданию численной модели.

Конечно-элементная формулировка задачи. Решение полученной системы разрешающих уравнений для таких сложных объектов как бронекорпуса легкобронированных машин возможно только численным путем. В частности, в работах [1-7] описан специализированный программно-модельный комплекс (СПМК), реализующие подобные расчеты. Однако в нем не учтены и не реализованы «технологические» факторы, корректирующие базовые расчетные модели. Имеется ввиду наличие сварных соединений: в дополнении к материалам 1 и 2, введенным выше (см. рис. 1, 2), вводится также материал сварного соединения 3. В предлагаемом варианте СПМК такое усовершенствование производится.

Кроме того, в развитие предложенный ранее подходов рассматривается не начальный этап развития пластических напряжений, а этап их существенного роста

вплоть до предельного состояния. Под таким состоянием можно понимать начало процесса разрушения (см. выше *критерий С*). Та нагрузка, т.е. та волна с теми параметрами, которая приведет к началу разрушения, определяет верхнюю границу защищенности, в отличие от двух нижних, рассмотренных в предыдущих работах.

Таким образом, предложенный СПМК дополняет расчетные возможности конечно-элементного моделирования. Кроме того, он предоставляет новые возможности для синтеза, поскольку реализует новые критериальные соотношения при оптимизации проектно-технологических решений, новые модули варьирования последних, новые модули с расширенным моделированием свойств материалов бронекорпусов, а также с опиранием на широкие возможности универсальных современных программных комплексов геометрического и конечно-элементного моделирования.

В дополнении к известным возможностям усовершенствованный СПМК дает возможность учесть изменение пределов текучести и прочности от скорости деформирования материалов, что также расширяет арсенал проектных исследований. Это очень важно с точки зрения уточнения момента начала разрушения элементов бронекорпусов, а, значит, дает более обоснованный комплекс аргументов при принятии проектно-технологических решений по критерию уровня защищенности бронекорпусов легкобронированных машин. Данный специализированный программно-модельный комплекс, как и более ранний вариант, реализован с привлечением программного комплекса ANSYS, а также Pro/ENGINEER и SolidWorks. Он дополнен специализированными модулями, реализующими принятые в рассмотрение модели поведения материалов, приложения нагрузок и варьирования конструкции (а также технологических параметров изготовления) бронекорпусов (рис. 4).

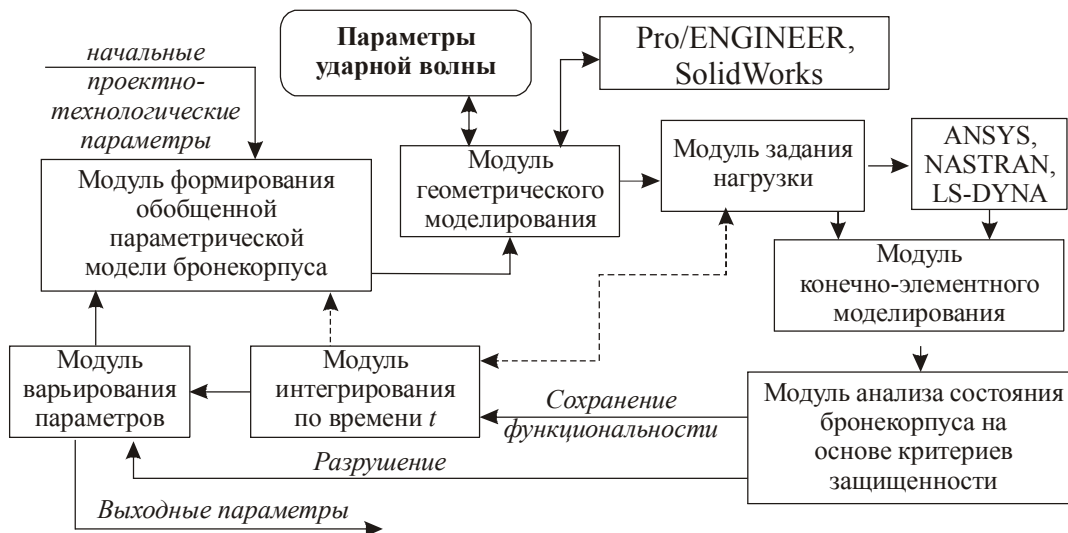


Рис. 4. Структура усовершенствованного специализированного программно-модельного комплекса

Заключение. В работе изложены основные положения усовершенствованных критериев определения уровней защищенности бронекорпусов легкобронированных машин при действии на них ударно-волновой нагрузки, усовершенствованной математической модели деформирования бронекорпуса при таком воздействии, а также усовершенствованного специализированного программно-модельного комплекса, реализующего метод конечных элементов при проведении проектных исследований бронекорпусов.

Анализ изложенного материала дает основание для следующих выводов.

1. В отличие от традиционных подходов, предложенные в работе критерии защищенности дают возможность рассчитать не только появление первых пластических деформаций, но и критический для конструкции бронекорпуса момент начала разрушений.

2. В математической модели напряженно-деформированного состояния исследуемых бронекорпусов учитывается, в отличие от известных подходов, зависимость механических свойств деформируемых материалов от скорости данного процесса.

3. В усовершенствованном специализированном программно-модельном комплексе для анализа реакции бронекорпусов на действие ударной волны введены дополнительные, по сравнению с известными, модули и учтены дополнительные факторы, которые, с одной стороны, реализуют расширенные возможности, предоставляемые предложенными в работе новыми подходами к формированию критериев защищенности и усовершенствованной математической моделью, а с другой, – описывающие также «технологическую» (а не только конструктивную, как у предшественников) компоненту обобщенной параметрической модели проектируемого бронекорпуса. Это обеспечивает более широкий базис факторов при принятии проектно-технологических решений, в т.ч. о местах расположении сварных швов, их типам, свойствах материала и т.п.

С применением предложенных в работе усовершенствованных критериев, моделей и СПМК планируется в дальнейшем проведение углубленного анализа реакции бронекорпусов на действие ударной волны и разработка на этой базе обоснованных проектно-технологических рекомендаций.

Литература: 1. 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. 2. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения / Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н. и др. // *Механіка та машинобудування*. – 2005. – №1. – С.184-194. 3. Бруль С.Т. К вопросу о моделировании воздействия ударной волны на корпус боевой машины С.Т./ Бруль, А.Ю. Васильев // *Вестник НТУ „ХПИ”*. Тем. вып.: *Машиноведение и САПР*. – 2005. – №53. – С.29-34. 4. Бруль С.Т. Моделирование реакции корпуса боевой машины на действие подвижной нагрузки: теория, методы и модели // *Вісник НТУ „ХПИ”*. Тем. вип.: *Машинознавство та САПР*. – 2007. – №3. – С.24-43. 5. Моделирование реакции корпусов легкобронированных машин на действие ударно-импульсных нагрузок / Бруль С.Т., Карапейчик И.Н., Мазин В.М. и др. // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. вып.: *Машиноведение и САПР*. – 2011. – № 22. – С. 12–19. 6. Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты / Бруль С.Т., Ткачук Н.А., Васильев А.Ю. и др. // *Механіка та машинобудування*. – 2011. – №1. – С. 66–73. 7. Численное моделирование реакции тонкостенной конструкции на действие ударно-волновой загрузки / Карапейчик И.Н., Бруль С.Т., Мазин В.М. и др. // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. вып.: *Машиноведение и САПР*. – 2011. – № 51. – С. 59–65. 8. Васидзу К. *Вариационные методы в теории упругости и пластичности*. – М.: Мир, 1987. – 542 с.

Bibliography (transliterated): 1. Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnyh mehani-cheskih sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisanija / N.A. Tkachuk, G.D. Gri-cenko, A.D. Chepurnoj i dr. // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2006. – №1. – S. 57–79. 2. Struktura specializirovannyh integrirovannyh sistem avtomatizirovannogo analiza i sinteza jelementov transportnyh sredstv special'nogo naznachenija / Tkachuk N.A., Brul' S.T., Malakej A.N. i dr. // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2005. – №1. – S.184-194. 3. Brul' S.T. K vo-prosu o modelirovanii vozdeystvija udarnoj volny na korpus boevoj mashiny S.T./ Brul', A.Ju. Vasil'ev // *Vestnik NTU „HPI”*. Tem. vyp.: *Mashinovedenie i SAPR*. – 2005. – №53. – S.29-34. 4. Brul' S.T. Modelirovanie reakcii korpusa boevoj mashiny na dejstvie podvizhnoj nagruzki: teorija, metody i modeli // *Visnik NTU „HPI”*. Tem. vip.: *Mashinознаvstvo ta SAPR*. – 2007. – №3. – S.24-43. 5. Modelirovanie reakcii korpusov legkobronirovannyh mashin na dejstvie udarno-impul'snyh nagruzok /

Brul' S.T., Karapejchik I.N., Mazin V.M. i dr. // Vestnik NTU «HPI». Tem. vyp.: Mashinovedenie i SAPR. – 2011. – № 22. – S. 12–19. 6. Modelirovanie fiziko-mehaničeskikh processov v korpusah legkobroniro-vannyh mashin: podhody, modeli, jeffekty / Brul' S.T., Tkachuk N.A., Vasil'ev A.Ju. i dr. // Mehanika ta mashinobuduvannja. – 2011. – №1. – S. 66–73. 7. Chislennoe modelirovanie reakcii tonkostennoj konstrukcii na dejstvie udarno-volnovoj zagruzki / Karapejchik I.N., Brul' S.T., Mazin V.M. i dr. // Vestnik NTU «HPI». Tem. vyp.: Mashinovedenie i SAPR. – 2011. – № 51. – S. 59–65. 8. Vasil'ev A.Ju. Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti. – M.: Mir, 1987. – 542 s.

Литвиненко О.В., Ткачук М.А., Васильєв А.Ю., Литвин Б.Я., Шейко О.І.
ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ І ЧИСЛОВИХ МОДЕЛЕЙ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ
БРОНЕКОРПУСІВ ПРИ ДІЇ УДАРНОЇ ХВИЛІ

Пропонується як розвиток існуючих підходів та моделей для визначення реакції корпусів легкоброньованих бойових машин на дію ударної хвилі застосувати розширені критерії їх захищеності. Вони базуються не на розгляді тільки критичних станів окремих елементів, а на відтворенні усього процесу сумісного пружно-пластичного деформування бронепанелей та внутрішнього силового каркасу. Це дає змогу більш адекватно відобразити реальні фізико-механічні процеси у бронекорпусах. Більш точно прогнозуються різні рівні захищеності, відповідно суттєво уточнюються проектно-технологічні рішення, що здійснюються за даними критеріями.

Литвиненко А.В., Ткачук Н.А., Васильєв А.Ю., Литвин Б.Я., Шейко А.И.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
БРОНЕКОРПУСОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Предлагается как развитие существующих подходов и моделей для определения реакции корпусов легкобронированных боевых машин на действие ударной волны применить расширенные критерии их защищенности. Они базируются не на рассмотрении только критических состояний отдельных элементов, а на воссоздании всего процесса совместного упруго-пластического деформирования бронепанелей и внутреннего силового каркаса. Это дает возможность более адекватно отобразить реальные физико-механические процессы в бронекорпусах. Более точно прогнозируются разные уровни защищенности, соответственно существенно уточняются проектно-технологические решения, которые осуществляются по данным критериям.

Litvinenko A.V., Tkachuk N.A., Vasiliev A.Y., Litvin B.Y., Sheyko A.I.
IMPROVEMENT OF MATHEMATICAL AND NUMERICAL MODELS FOR
STRESSED-DEFORMED STATE OF ELEMENTS OF ARMORED HULLS AT
THE ACTION OF SHOCK WAVE

It is offered to apply the extended criteria of protection as development of existent approaches and models for determination of reaction of lightly armored fighting vehicles hulls on the action of shock wave. They are based not on consideration only critical conditions of separate elements, but on the recreation of all process of compatible resiliently-plastic deformation of armored panels and internal power framework. It gives an opportunity to represent real physical and mechanical processes in armored hulls more adequately. The different levels of protection are more exactly forecasting, and project and technological solutions are substantially specified on these criteria.