

УДК 539.3

А.В. ЛИТВИНЕНКО, к.т.н., дир. НИЦ УК «Рейлтрансхолдинг»,
Мариуполь

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Запропоновано розвиток узагальненого параметричного підходу для дослідження напружено-деформованого стану корпусів транспортних засобів спеціального призначення на етапі проектування і технологічної підготовки виробництва. Математична формалізація параметричного опису конструкцій та всіх етапів їх життєвого циклу дає можливість будувати високоефективні спеціалізовані системи комп'ютерного проектування, технологічної підготовки виробництва, дослідження, виготовлення та експлуатації.

Ключові слова: транспортний засіб спеціального призначення, бронекорпус, системи комп'ютерного проектування, напружено-деформований стан, власні частоти коливань

© А.В. Литвиненко, 2013

Предложено развитие обобщенного параметрического подхода для исследования напряженно-деформированного состояния корпусов транспортных средств специального назначения на этапе проектирования и технологической подготовки производства. Математическая формализация параметрического описания конструкций и всех этапов их жизненного цикла дает возможность строить высокоэффективные специализированные системы компьютерного проектирования, технологической подготовки производства, исследования, изготовления и эксплуатации.

Ключевые слова: транспортное средство специального назначения, бронекорпус, системы компьютерного проектирования, напряженно-деформированное состояние, собственные частоты колебаний

Development of generalized parametric method for stress-strain state investigation of special-purpose transport vehicle hulls is proposed at the stage of technological preparation of production. Mathematical formalization of construction parametrical description and all life-cycle stages enables an opportunity to build high-efficient specialized CAD-systems, systems for technological preparation of production, research, manufacturing and exploitation.

Keywords: special-purpose transport vehicle, armored hull, CAD-systems, stress-strain state, vibrations eigenfrequencies

Введение. Как отмечается в ряде работ [1-12], при проектировании новых транспортных средств специального назначения типа бронетранспортеров (БТР), боевых машин пехоты (БМП), боевых машин десанта (БМД) и их модернизации возникает масштабный комплекс работ по проектированию, исследованию и технологической подготовке производства. При этом, как известно, обладающей тенденцией современного бронетанкостроения является широкое применение CAD/CAE/CAM-систем как при проектировании элементов машин, так и при технологической подготовке их производства. Поскольку универсальные компьютерные системы, применяемые на большинстве отечественных предприятий, не всегда в полной мере дают возможность учитывать специфику конструкций БТР, БМП, БМД, технологической оснастки и оборудования отечественных предприятий бронетанкостроения, то возникает актуальная и важная задача интенсификации и повышения качества работ на этапах проектирования, исследования и технологической подготовки производства. Для решения получаемой задачи предлагается развитие подхода, описанного в работах [11, 12].

Отличительной особенностью сложившейся в настоящее время ситуации является акцентированное внимание, которое уделяется анализу влияния проектных параметров на характеристики элементов транспортных средств специального назначения и на тактико-технические характеристики (ТТХ) машин в целом. При этом существенно меньше внимание исследователей уделено выявлению влияния технологических режимов, возможностей оборудования, оснастки и условий производства на результирующие ТТХ, реально достигаемые на конкретных изделиях, хотя наличие и важность такого влияния очевидно. В связи с этим актуальной, важной и новой научно-практической проблемой является развитие подходов, методов, моделей, алгоритмов и программного обеспечения, которые предоставляют возможности не только увязать ТТХ проектируемых машин с множеством технологических факторов, но и создать основы решения задачи обоснования таких технологических параметров, которые бы не ухудшали конструктивно заложенные показатели их тактико-технических характеристик. Поскольку возникающая проблема выходит за пределы применимости известных подходов [13, 14], а общие

принципы, изложенные в этих работах, достаточно привлекательны и имеют значительный потенциал развития и обобщения, то в данной работе предлагается совершенствование обобщенного параметрического моделирования и адаптация на множество технологических факторов, влияющих на ТТХ проектируемых машин.

Постановка задачи. Отталкиваясь от подходов, изложенных в работах [11, 12], рассматривается три типа факторов, обуславливающих ТТХ проектируемых машин. Во-первых, это проектные параметры $P_G^{(i)}, i = 1, \dots, N_G$, которые определяют общую компоновку машин, габаритные и присоединительные размеры отдельных элементов, свойства материалов и т.п. Во-вторых, это режимы боевого применения данных машин $P_B^{(k)}, k = 1, \dots, N_B$, которые в целом определяют виды и степени воздействий на элементы БТР, БМП, БМД. В-третьих, это технологические режимы изготовления элементов исследуемых машин $P_T^{(j)}, j = 1, \dots, N_T$. Последние порождаются типами обработки, видами технологических операций и назначенными технологическими режимами. В комплексе все три множества параметров P_G, P_B, P_T образуют множество обобщенных параметров, в целом определяющих уровень достигаемых ТТХ:

$$T = T(p), \quad p = \{P_G, P_B, P_T\}^T. \quad (1)$$

Здесь T – массив тактико-технических характеристик, p – объединенное множество обобщенных параметров.

Естественно, что для многих компонент ТТХ установление связи (1) требует проведения анализа процессов и состояний, которые сопровождают все этапы жизненного цикла изделия, в особенности – в условиях боевого применения:

$$L(u, p, t) = f, \quad (2)$$

где L – оператор процесса или состояния, u – массив переменных, описывающих исследуемый процесс или состояние, t – время, f – внешнее воздействие на исследуемый объект.

Например, в качестве системы (2) могут выступать уравнения теории упругости (для определения напряженно-деформированного состояния массивных тел, оболочек, пластин или стержней), уравнения теории колебаний (для определения частот и форм колебаний или переходных процессов). В любом случае система уравнений (2) устанавливает (обычно в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных) связь переменных состояния u с параметрами p , проявляющаяся в виде параметрического семейства:

$$u = u(f, p, t) \quad (3)$$

по итогам интегрирования (2).

Имея в распоряжении соотношения (2), можно ставить задачи обеспечения требуемых ТТХ

$$T^{(s)}(u(p)) \rightarrow \max(\min), \quad s = 1, 2, \dots \quad (4)$$

при некоторых ограничениях H_* на отдельные величины

$$H^{(q)}(u(p)) \leq H_*^{(q)}, \quad q = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Так, например, в качестве критериев (4) могут выступать масса, скорость движения машины, степень деформирования ее отдельных элементов и т.п. Как ограничения могут фигурировать прочностные свойства используемых материалов, допустимые амплитуды или частоты колебаний и другие величины.

Таким образом, соотношения (1)–(5) формируют систему соотношений, позволяющих ставить и решать задачи параметрического анализа, чувствительности, а также структурного и параметрического синтеза. При этом, в отличие от традиционных подходов, пространство варьируемых параметров содержит также новое, ранее не учитываемое множество величин – технологические параметры P_T (см. выше). Это существенно расширяет возможности и результативность предлагаемого усовершенствованного подхода как в плане полноты математической модели, ее адекватности, так и в плане практической эффективности получаемых результатов исследований. Также важным вопросом является точность компьютерного моделирования, используемого для получения решений (2), способность бесконфликтного обмена информацией между этапами и системами геометрического моделирования (CAD), исследований (CAE) и технологической подготовки производства (CAM). Кроме того, не менее важным является проблема верификации параметров математической и численной моделей, описывающих исследуемый объект.

Все описанные выше задачи формально могут быть охвачены подходами, описанными в работах [13, 14]. В то же время, как отмечалось выше, само множество определяющих параметров в настоящей работе расширено именно за счет неучитываемых ранее технологических факторов. Это составляет существенное дополнение с точки зрения решения конечной задачи обеспечения требуемых ТТХ проектируемых машин специального назначения.

Следует заметить, что в зависимости от типа исследуемого процесса или состояния (2), критериев и ограничений (4), (5) порядок и содержание решения возникающих при этом задач видоизменяются. В связи с этим предлагается проиллюстрировать некоторые этапы исследований на примере анализа изменения спектра собственных частот колебаний бронекорпусов транспортных средств специального назначения при изменении их проектно-технологических параметров (см. далее).

Анализ влияния толщины и свойств материалов элементов бронекорпусов на спектр собственных частот их колебаний. Рассмотрим бронекорпус транспортного средства специального назначения, определяемый проектно-технологическими его параметрами (форма и размеры бронепанелей в плане, карта распределения толщин листов и силовой структуры в проекциях, свойства материалов элементов бронекорпуса и сварных швов и т.п.). По-

сколькучу корпус является основным элементом, объединяющим и интегрирующим все агрегаты и системы машины, то он в процессе эксплуатации и боевого применения подвергается множеству динамических воздействий (как от внешних, так и от внутренних источников). В связи с этим чрезвычайно важным является вопрос определения спектра собственных частот его колебаний, поскольку собственные частоты и формы колебаний во многом определяют наблюдаемые переходные и установившиеся колебательные процессы. В свою очередь это влияет, например, на точность стрельбы (за счет деформирования подбашенного листа), на прочность и жесткость элементов бронекорпуса (определяют уровень защищенности) и т.п. Более того, вследствие разброса технологических режимов изготовления бронекорпусов (получается вследствие разброса толщин листов-заготовок, поступающих от металлургических производств; вследствие применения тех или иных типов сварных швов и конкретных условий и качества выполнения сварки; вследствие разнородности микроструктуры, химического состава, твердости и прочности слоев материалов бронепанелей по толщине; вследствие изменения свойств материалов бронепанелей в зонах сварных швов и т.п.).

Учитывая, что данное варьирование накладывается на варьирование проектных параметров бронекорпусов, получаемое множество варьируемых величин сильно разрастается, приводя к лавинообразному росту объема исследований. В то же время можно отметить, что во многих случаях диапазон варьирования отдельных параметров незначителен. Так, массово-геометрические характеристики сварных конструкций изменяются в пределах 2–5%; такой же порядок диапазона варьирования – для распределения толщин в плане в пределах бронепанелей, а также массы и моментов инерции размещаемых в/на бронекорпусе систем и агрегатов и т.п.

Таким образом, исходная задача модифицируется, приобретая характер анализа чувствительности исследуемых характеристик бронекорпусов на конечное, но малое изменение проектно-технологических параметров. Для ее решения предлагается применить подходы, предложенные к использованию для тонкостенных элементов машиностроительных конструкций в ряде работ [15–17]. Следуя этому подходу, переходим от континуальной формулировки задачи (2) к дискретной ее форме. Применительно к задаче определения спектра собственных частот колебаний бронекорпусов наиболее эффективно применение метода конечных элементов [18]. С учетом варьирования отдельных параметров получаем соотношения для определения собственных частот $\omega_i(p)$, где $p = \{p_1, \dots, p_n\}^T$. Разрешающая система уравнений принимает вид:

$$\det(K(p) - \omega^2 M(p)) = 0, \quad (6)$$

где K , M – матрицы жесткости и масс конечно-элементных ансамблей, моделирующих исследуемые бронекорпуса.

В соотношениях (6) можно отвлечься от природы параметрических зависи-

мостей, сконцентрировав внимание, например, на зависимости собственных частот ω_i от карты распределения толщин по панелям бронекорпуса:

$$h_\mu = h_\mu(p), \mu = 1, \dots, N_\mu. \quad (7)$$

Здесь h_μ – реальная толщина элемента μ бронекорпуса (детализация – вплоть до размеров конечного элемента) как функция проектно-технологических параметров p . Как отмечалось выше, в силу действия множества факторов p , распределение h_μ представляет определенную функцию и учитываемых параметров p , и неучитываемых стохастических воздействий p ; в результате чего

$$h_\mu = h_\mu^0 - \Delta h_\mu(p, p^-), \quad (8)$$

где h_μ^0 – распределение «номинальных» толщин (т.е. толщин для некоторого базового варианта бронекорпуса), Δh_μ – отклонения этих толщин в актуальном варианте по сравнению с базовым.

В уравнениях (8), как уже отмечалось, можно отвлечься на определенном этапе от природы возникновения Δh_μ , обратив внимание лишь на их малости:

$$\Delta h_\mu / h_\mu \ll 1 \forall \mu. \quad (9)$$

Применив используемые в работе [17] обозначения $\alpha_\mu = \Delta h_\mu / h_\mu$ и сформировав соответствующий массив относительных параметров $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_{N_\mu}\}^T$, для определения собственных частот колебаний бронекорпусов можно применить следующий прием: собственные частоты колебаний представляются в виде зависимости [17]

$$\omega_i(\alpha) \approx \omega_i^{(0)} \left(1 - \frac{1}{2} (\delta_K^G - \delta_M^G) \right), \quad (10)$$

где $\omega_i^{(0)}$ – решения (6) при $h_\mu = h_\mu^{(0)}$, а коэффициенты

$$\delta_K = \sum_k r_k \alpha_k; \quad (11) \quad \delta_M = \sum_k s_k \alpha_k; \quad (12)$$

где r , s – некоторые коэффициенты линейных форм от массива параметров α [15–17].

Таким образом, соотношения (10) декларируют примерно линейную зависимость $\omega_i(\alpha)$. В то же время можно обратиться к существующим нормам на допустимое изменение толщин h_μ , что диктует справедливость соотношений

$$\alpha \leq \alpha^*, \quad (13)$$

где α^* – предельно допустимое варьирование толщин отдельных элементов бронекорпуса на этапе проектирования и технологической подготовки производства.

С учетом этого предлагается также привлечь для вычисления чувствительности вместо соотношений (10–12) альтернативные конечно-разностные

соотношения [15-17]:

$$\omega_i(\alpha_j) = \omega_i^{(0)} \left(1 - \sum_s \Delta_s^{(j)} \alpha^* \right), \quad (14)$$

где $\alpha_j = \{0; 0; \dots; \alpha^*; \dots; 0\}^T$ – массив параметров, в котором ненулевым является только компонента α под номером j , $\Delta_s^{(i)}$ – компоненты чувствительности.

Определив из (14) $\Delta_s^{(i)}$, для произвольного набора α получаем:

$$\omega_i(\alpha) = \omega_i^{(0)} \left(1 - \sum \alpha \cdot \Delta^{(i)} \right). \quad (15)$$

Соответственно, для определения величин $\Delta_s^{(i)}$ необходимо вычислять корни системы уравнений (6) при наборах параметров α_p . Учитывая высокие возможности современных программно-аппаратных комплексов, многовариантные расчеты спектров собственных частот $\omega_i(\alpha_p)$ не составляют значительных затруднений. В силу этого получаемые решения дают возможность отслеживать тенденции и величины изменения собственных частот колебаний при варьировании толщин элементов бронекорпусов.

Тестовый пример. Для иллюстрации применимости предлагаемого подхода исследуется спектр собственных частот колебаний бронекорпуса БТР-3Е при варьировании толщин его бронепанелей. На рис. 1 приведена геометрическая и конечно-элементная модели бронекорпуса БТР-3Е. В качестве иллюстративного избран базовый вариант номинальных толщин 8 мм для всех элементов бронекорпусов. Варьирование всех толщин осуществляется в пределах $\pm 20\%$.

На рис. 2, 3 приведены некоторые собственные формы колебаний для номинального и измененных распределений толщин. На рис. 4 – графическая иллюстрация изменения собственных частот бронекорпуса при различных степенях его утонения/утолщения по сравнению с базовым вариантом. Видно, что собственные формы колебаний сохраняют свой характер, а частоты изменяются практически линейно в достаточно широком диапазоне варьирования толщин ($\pm 20\%$). Это свидетельствует о том, что если зависимость распределения толщин от каких-то проектно-технологических решений и носит существенно нелинейный характер, то непосредственное влияние степени утонения-утолщения α элементов бронекорпуса носит характер линейной зависимости.

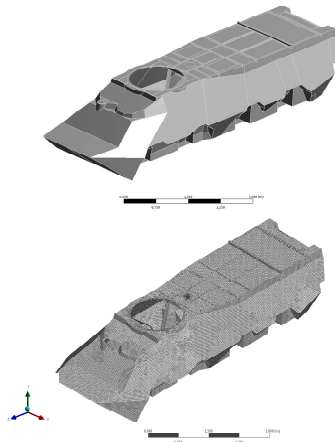


Рисунок 1 – Геометрическая и конечно-элементная модели бронекорпуса БТР-3Е

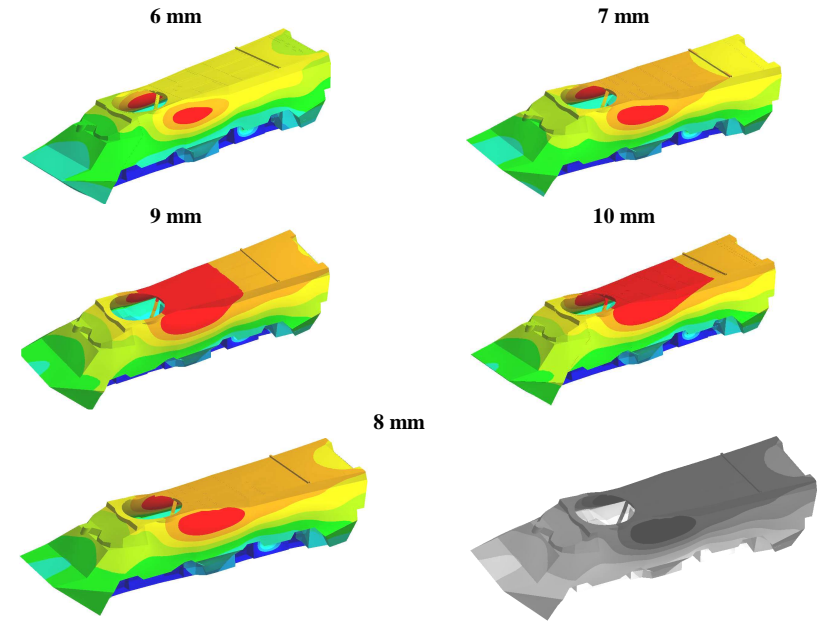


Рисунок 2 – Некоторые собственные формы колебаний для номинального (8 мм) распределения толщин и при варьировании толщин (1-я собственная частота)

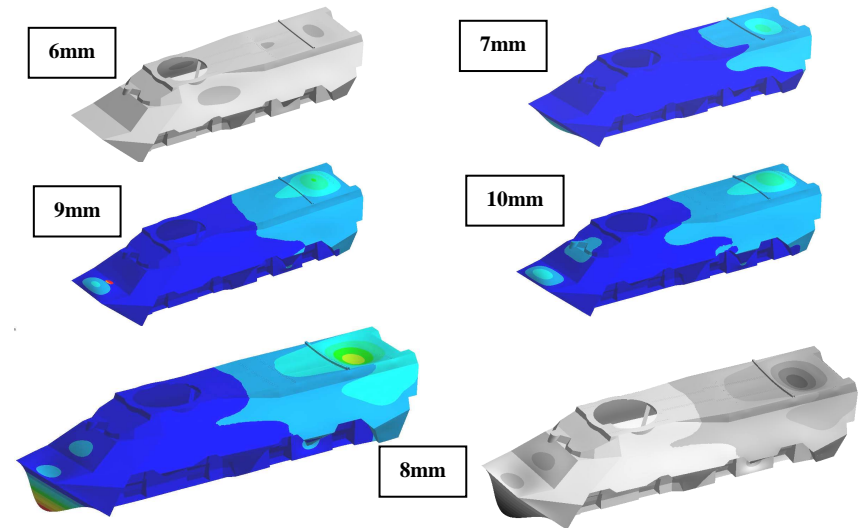


Рисунок 2 – Некоторые собственные формы колебаний для номинального (8 мм) распределения толщин и при варьировании толщин (4-я собственная частота)

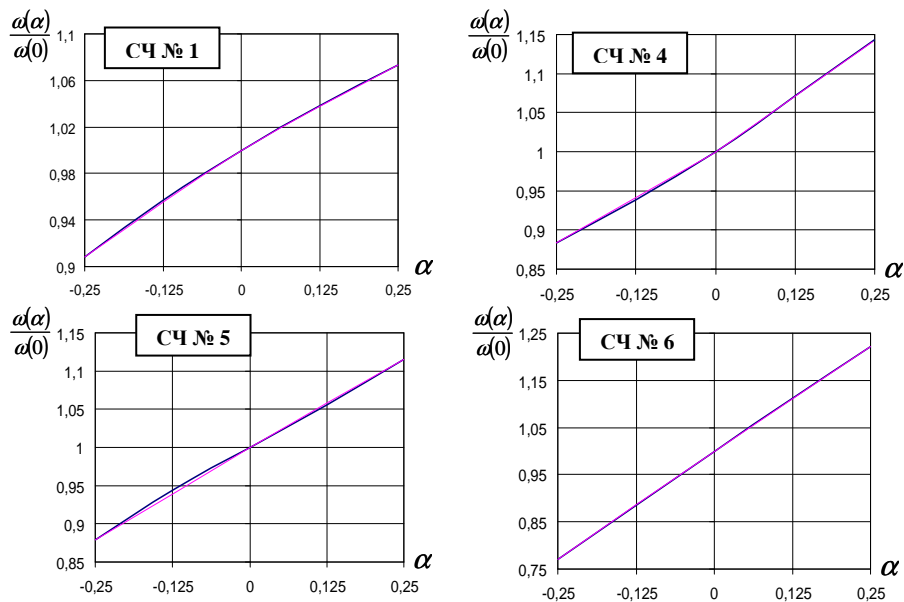


Рисунок 4 – Собственные частоты (СЧ) колебаний бронекорпуса, отнесенные к значениям СЧ с базовым значением толщины панелей (8 мм), в зависимости от степени утонения/утолщения этих панелей

Отсюда следует, что при параметрическом анализе и синтезе задачи можно разделить: в координатах α получаем линейаризованные критериальные и ограничительные функции (4), (5), а в координатах p – возможно, более сложные зависимости. Поскольку решение задач в координатах α , таким образом, кардинально упрощается (а именно решение этой части проблемы, как правило, наиболее ресурсозатратно), то, соответственно, за счет этого существенно ускоряется и решение общей задачи.

Заключение. В работе содержится описание нового подхода к расчету бронекорпусов транспортных средств специального назначения. Получены следующие результаты.

1. Путем пополнения множества обобщенных параметров, определяющих тактико-технические характеристики проектируемого и изготавливаемого транспортного средства специального назначения, удастся, в отличие от известных подходов, за счет неучитываемых ранее технологических факторов расширить постановку задачи об обосновании рациональных проектно-технологических параметров вновь создаваемой или модернизируемой машины.

2. На примере бронекорпусов машин типа БТР исследовано влияние варьирования проектно-технологических параметров на изменение толщин

отдельных бронепанелей и отдельных характеристик. При этом установлено, что малые степени изменения толщин оказывают близкое к линейному влияние на отдельные характеристики бронекорпуса. В частности, на примере спектра собственных частот бронекорпуса БТР-3Е подтверждены близкие к линейному закону тенденции изменения отдельных частот при малом, но конечном (в пределах $\pm 20\%$) утонении/утолщении его бронепанелей.

3. С учетом возможности линейаризации отклика характеристик бронекорпусов на варьирование толщин бронепанелей предложен новый подход к решению задач параметрического анализа и синтеза. Он состоит в том, то исходную задачу целесообразно решать в два этапа. На первом устанавливаются линейаризованные зависимости контролируемых характеристик от толщин бронепанелей h или степеней их утонения α , и по этим зависимостям решаются те или иные конкретные задачи в координатах h , α ; на втором этапе конкретизируются зависимости h , α от проектно-технологических параметров p , и решение переводится в эти координаты.

4. Предложенный подход с декомпозицией задач параметрического анализа и синтеза разделяет исходную постановку на 2 этапа, в которых соединяются: на первом – сложные задачи анализа процессов и состояний, но линейаризованные упрощенные зависимости – для задач параметрического анализа и синтеза; на втором – сложные зависимости толщин от проектных параметров, но без необходимости решения сложных задач анализа процессов и состояний. Таким образом, находят рациональное сочетание требования к необходимым вычислительным ресурсам: задачи анализа и синтеза разнесены с использованием в качестве промежуточного параметра массива толщин бронепанелей.

Учитывая значительную актуальность задачи обоснования рациональных проектно-технологических параметров, обеспечивающих заданные тактико-технические характеристики перспективных транспортных средств специального назначения, данный подход в дальнейшем обладает широкими возможностями при решении различных задач на этапах проектирования, исследования и технологической подготовки производства этих машин.

Список литературы: 1. *Чепурной А.Д.* Автоматизированное проектирование карт раскроя, подготовок и выпуска управляющих программ для машин термической резки в производстве брондеталей корпусов и башен БТР / А.Д. Чепурной, А.В. Литвиненко, И.В. Артемов // Вісник НТУ «ХПІ». 36. наук. праць. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №23. – С. 121-127. 2. *Гриценко Г.Д.* Применение специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза сложных механических конструкций: определение напряженно-деформированного состояния и обоснование параметров / Г.Д. Гриценко, А.В. Ткачук, Н.А. Пелешко, С.Т. Бруль, А.В. Литвиненко // Вісник НТУ «ХПІ». 36. наук. праць. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №14. – С. 17-25. 3. *Гриценко Г.Д.* Экспериментальные исследования динамических процессов в макетах бронекорпусов транспортных средств специального назначения / Г.Д. Гриценко, Н.А. Ткачук, Е.В. Пелешко, А.В. Литвиненко // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – №28. – С. 16-20. 4. *Чепурной А.Д.* Общий подход к обоснованию параметров проектируемых машин на основе гибридных расчетно-экспериментальных моделей / А.Д. Чепурной, Г.П. Глинин, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – №2. – С. 103-108. 5. *Пелешко С.В.* Комплексне до-

слідження міцності та жорсткості корпусів транспортних засобів спеціального призначення / Є.В. Пелешко, М.А. Ткачук, С.Т. Бруль, О.В. Литвиненко, І.М. Карапейчик // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вип.: Транспортное машиностроение. – Харьков: НТУ 2010, «ХПИ». – №39. – С. 116–131.

6. Пелешко Е.В. Расчетно-экспериментальные исследования динамических характеристик бронекорпусов машин легкой категории по массе / Е.В. Пелешко, А.В. Литвиненко, С.Т. Бруль // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – №22. – С. 81–86.

7. Карапейчик И.Н. Численное моделирование реакции тонкостенной конструкции на действие ударно-волновой нагрузки / И.Н. Карапейчик, С.Т. Бруль, В.М. Мазин, А.В. Литвиненко, А.Ю. Васильев // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2011. – № 51. – 2011. – №51. – С. 59–65.

8. Карапейчик И.Н. Расширенная расчетно-экспериментальная идентификация параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств специального назначения / И.Н. Карапейчик, А.В. Литвиненко, С.Т. Бруль, Н.А. Ткачук, А.Ю. Васильев // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Тем.вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №22. – С. 69–77.

9. Ткачук Н.А. Экспериментальные исследования корпусов легкобронированных машин / Н.А. Ткачук, И.Н. Карапейчик, А.В. Литвиненко // Вісник СевНТУ. Зб. наук. праць. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – № 133/2012. – С. 37–43.

10. Литвиненко А.В. Совершенствование математических и численных моделей напряженно-деформированного состояния элементов бронекорпусов при действии ударной волны / А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук, А.Ю. Васильев, Б.Я. Литвин, А.И. Шейко // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №1. – С. 155–161.

11. Литвиненко А.В. Общий подход к проектно-технологическому обеспечению защищенности бронекорпусов транспортных средств специального назначения / А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук, Б.Я. Литвин, А.И. Шейко // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №2. – С. 221–229.

12. Литвиненко А.В. Комплексные экспериментальные исследования динамических характеристик фрагментов, макетов и натуральных образцов элементов бронекорпусов транспортных средств специального назначения / А.В. Литвиненко // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 1(975). – С. 85–93.

13. Ткачук Н.А. Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Э.В. Глушенко и др. // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 2. – С. 85–96.

14. Ткачук Н.А. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной, Е.А. Орлов, Н.Н. Ткачук // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 1. – С. 57–79.

15. Танченко А.Ю. Связанная задача о напряженно-деформированном состоянии и коррозионном утонении тонкостенных элементов конструкций / А.Ю. Танченко // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010 – №1. – С. 55–60.

16. Танченко А.Ю. Напряженно-деформированное состояние пространственных тонкостенных конструкций с учетом утонения стенок несущих элементов / А.Ю. Танченко, Н.А. Ткачук, Ю.Б. Гусев // Вісник СевНТУ. Зб. наук. праць. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь, 2011. – Вип. 120. – С. 35–40.

17. Ткачук Н.А. Анализ чувствительности прочностных и динамических характеристик машиностроительных конструкций на основе прямого возмущения конечно-элементных моделей / Н.А. Ткачук, А.Ю. Танченко, А.Н. Ткачук [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 22. – С. 147–169.

18. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

Поступила в редколлегию 30.01.13