

Н.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, *Г.Д. ГРИЦЕНКО*, канд. техн. наук,
Е.В. ПЕЛЕСКО, НТУ „ХПИ”

КОМПЛЕКСНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Запропоновано технологію розрахунково-експериментальних досліджень елементів корпусів легкоброньованих машин. Обґрунтовані параметри розрахункових моделей. Наведені результати досліджень елементів корпусів та їхніх макетів.

Technology of computational and experimental researches of corps elements of lightly armoured vehicles is offered. The parameters of computational models are grounded. The results of researches of corps elements and their models are presented.

Введение. Для обоснования достоверности использованных в работах [1-3] математических, геометрических и конечно-элементных моделей исследуемых элементов бронетранспортеров БТР-70, БТР-80, БТР-94, других легкобронированных машин, а также корректности программной реализации предложенных ранее методов, алгоритмов и точности проведенных численных расчетов необходимо проведение экспериментальных исследований. Для обеспечения комплексности необходимо провести экспериментальные исследования, охватывающие все стороны процесса нагружения корпусов бронетранспортера:

- для проверки адекватности моделирования сварного корпуса бронетранспортера сплошной пластинчато-оболочечной конструкцией предложено провести сравнительную экспериментальную проверку жесткостных характеристик образцов (часть – сплошной листовой материал, часть – сварная конструкция);
- для определения степени соответствия динамических характеристик бронетранспортера, полученных численно и экспериментально, желательно проведение динамических измерений реакции корпуса на действие усилия отдачи при стрельбе из автоматической пушки;
- для обоснования правильности рекомендаций по выбору схем модернизации и конструктивных параметров корпусов БТР-80 необходимо проведение комплекса заводских и полигонных испытаний модернизированного бронетранспортера.

В статье описана методика и начальные этапы лабораторных элементов и макетов корпусов методом голографической интерферометрии и виброметрии, а также проведен анализ полученных данных.

1. Методика исследования элементов корпуса методом голографической интерферометрии. Задача выбора типа конечных элементов для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) корпуса легкобронированной машины как очень сложной пространственной конструк-

ции в

данном случае может быть решена только на основании экспериментальных исследований. Дополнительная сложность при формировании математической модели и численных моделей корпуса – моделирование сварных соединений. В практике исследований сварочных конструкций подобного типа этот вопрос до конца не решен. Решение его в данном конкретном случае предполагается провести по следующей методике:

1) Изготовление образцов (рис. 1).

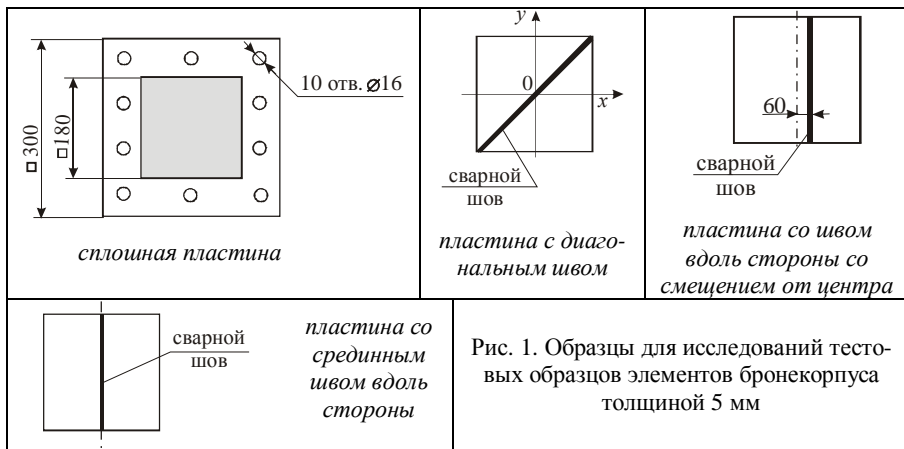


Рис. 1. Образцы для исследований тестовых образцов элементов бронекорпуса толщиной 5 мм

Элементы панели сваривались встык с предварительной разделкой кромок, как показано на рис. 2, и последующей сваркой с полным проплавлением, механообработкой и термообработкой.

2) Метод испытания образцов. Поскольку для сравнительной оценки влияния сварного соединения на напряженно-деформированное состояние недостаточно только одного численного значения жесткости, а требуется определение характера распределения компонент тензора напряжений или вектора перемещений, то соответственно для экспериментальных исследований необходимо привлекать методы, которые обеспечивают определение полей измеряемых величин.

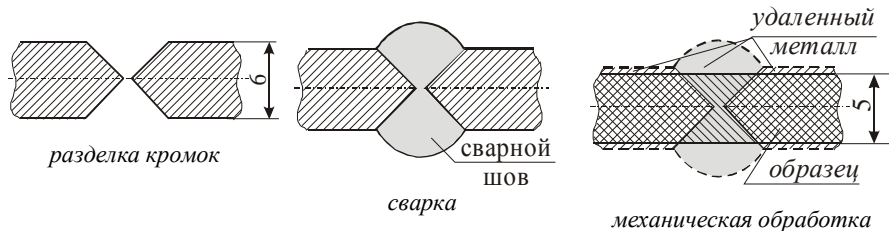


Рис. 2. Этапы изготовления сварного образца для исследования жесткости

Одним их наиболее мощных методов, обеспечивающих решение данной задачи с высокой точностью, является метод голографической интерферометрии [4]. Его отличительной особенностью является наглядность получаемых картин, фиксируемых бесконтактным способом. В связи с этим данный метод используется для решения задачи исследования характеристик напряженно-деформированного состояния изготовленных образцов. Требуется выбрать способ фиксации голографических интерферограмм и их расшифровки.

3) Лабораторная установка для испытаний. Для проведения испытаний образцов необходимо спроектировать и изготовить специальный стенд. К этому стенду предъявляются следующие требования:

- возможность приложения регулируемой нагрузки для обеспечения удобной для расшифровки густоты полос на голографических интерферограммах;

- высокая жесткость во избежание влияния податливости стенда на деформацию образцов;

- обеспечение оптической доступности области контроля.

Рассмотрим организацию экспериментальных исследований в соответствии со сформулированными требованиями.

Для экспериментальных исследований была использована голографическая установка СИН-1 с гелий-неоновым лазером ЛГН-215 с частотой $\lambda=0,628$ мкм (рис. 3). Анализ различных методов фиксации и расшифровки голографических интерферограмм [4-7] позволил остановить свой выбор на схеме регистрации интерференционной картины во встречных пучках по методу Денисюка [5-7]. Для расшифровки предложено использовать метод расчета количества полос по фотографии интерферограммы. При этом нормальные перемещения точек поверхности образца w определяется по формуле [4]

$$w = \lambda \cdot \frac{N}{2}, \quad (1)$$

где λ – длина волны лазера; N – номер полосы, отсчитываемой от нулевой.

Для удовлетворения предъявляемых требований в качестве стенда была спроектирована и изготовлена установка „КРАБ”, представленная на рис. 4.

Стенд изготовлен из комплекта универсально-сборочных приспособлений. Нагружение пластин осуществляется при помощи силового винта М16 с тыльной стороны образца. Фиксация интерференционной картины производится с лицевой стороны при помощи фотопластин ПФГ-03, размещенных в непосредственной близости от исследуемого объекта на 3-х точках (3 шарика \varnothing 5 мм, расположенные на лицевой плоскости стенда „КРАБ”).

2. Результаты испытаний образцов методом голографической интерферометрии. На рис.5 приведены образцы и полученные голографические интерферограммы при деформировании пластин.



Рис. 3. Голографическая установка СИН-1, укомплектованная гелий-неоновым лазером ЛГН-215



Рис. 4. Стенд „КРАБ” для испытательных сварных образцов



пластина со срединным швом вдоль стороны



пластина с диагональным швом

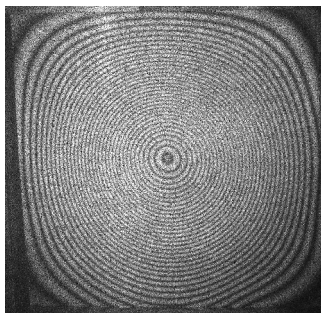
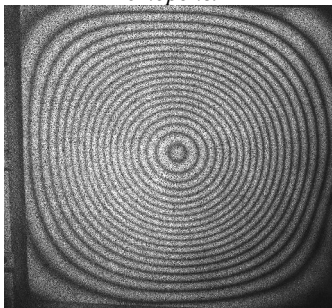


Рис. 5. Образцы и интерферограммы сварных панелей

Уже визуальный качественный анализ полученных интерферограмм показывает практически идентичный их характер как для сплошной пластины, так и для сварных образцов с различным расположением сварных швов.

Как показал предварительный анализ, полученные распределения (в том числе качественно и количественно) отличаются друг от друга не более чем на 5-7%. Это свидетельствует, во-первых, об удовлетворительной точности численных моделей для исследования напряженно-деформированного состояния элементов корпуса ЛБМ, а, во-вторых, о допустимости моделирова-

ния в данном случае сварного соединения цельной пластинчато-стержневой конструкцией с приемлемой погрешностью.

3. Метод численного исследования корпуса. Для решения задач численного исследования динамических характеристик корпуса транспортных средств специального назначения наиболее применим метод конечных элементов (МКЭ) [8]. Наиболее важные преимущества МКЭ: *варьируемость размеров элементов*, что позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы (при необходимости) для достижения заданной точности при минимальном времени решения; *свойства материалов смежных элементов могут быть различными* (позволяет применять метод к телам, состоящим из нескольких материалов); криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов; возможность рассмотрения граничных условий с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанных граничных условий. Алгоритм МКЭ позволяет составить общую программу для решения задач различного класса.

Основной недостаток МКЭ заключается в высоких требованиях к компьютеру. Необходимы как можно больший объем оперативной и дисковой памяти и высокое быстродействие процессоров. В настоящее время развитие компьютерной техники практически устранило этот недостаток.

Для выбора наиболее рациональной модернизации корпуса транспортного средства специального назначения для обеспечения заданных прочности и жесткости необходимо провести очень большое количество расчетов при различных значениях параметров. В качестве параметров в данном случае выступают различные геометрические параметры (размеры), физические параметры (свойства материалов), силовые параметры (нагрузки), обусловленные режимами эксплуатации машины, а также структурные параметры (конструктивные решения модернизации).

Решение большого количества задач напряженно-деформированного состояния конструкции с использованием мощнейших систем автоматизированного проектирования, таких как ANSYS, ADAMS, COSMOS/M и других даже при современном аппаратном компьютерном обеспечении займет огромное количество времени.

Для экспресс-анализа напряженно-деформированного состояния корпусов транспортных средств специального назначения при варьировании параметров и конструктивных решений предлагается использовать комплексное решение – CAD/CAE-систему Pro/ENGINEER с интегрированной системой автоматизированного анализа Pro/Mechanica. Данный способ позволяет в полной мере использовать возможность параметризации модели в САПР-системе Pro/ENGINEER для решения задачи синтеза. Решение задачи анализа НДС в этой системе служит для экспресс-оценки выбора оптимальных параметров и конструктивных решений, так как модуль анализа Pro/Mechanica не является полностью сертифицированным.

4. Методика и результаты расчетно-экспериментального исследования макета корпуса БТР-80. Для подтверждения достоверности численных моделей и расчетного модуля САПР Pro/МЕCHANICA, использующихся в работах [9-12] для анализа напряженно-деформированного состояния корпусов транспортных средств специального назначения, а также проведения многовариантных расчетов для выбора оптимальных параметров и структурных схем корпусов был проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований при помощи созданного программно-модельного комплекса. Данный комплекс включает в себя следующие элементы, приведенные на рис. 6. Объектом исследований выступил корпус БТР-80. Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен макет верхней части корпуса БТР-80, изображенный на рис. 7. Выбор именно этой части обусловлен тем, что ранее проведенные исследования показали большую восприимчивость верхней части корпуса к действию импульсных нагрузок.

В ходе исследований был проведен эксперимент по нахождению собственных частот модели корпуса БТР. Для измерения частотных характеристик использовался анализатор спектра вибраций и датчик ДН-3-М1. В ходе эксперимента были получены таблицы перемещений, скоростей и ускорений во времени в характерных точках 1-9, изображенных на рис. 7. Для наглядного анализа полученных результатов была написана программа для построения графиков распределения перемещений, скоростей и ускорений во времени. Графические результаты эксперимента представлены на рис. 8-18.

По экспериментальной модели корпуса была построена геометрическая модель в системе автоматизированного проектирования Pro/ENGINEER. Были проведены расчеты собственных частот конструкции и реакции конструкции на импульсные воздействия.

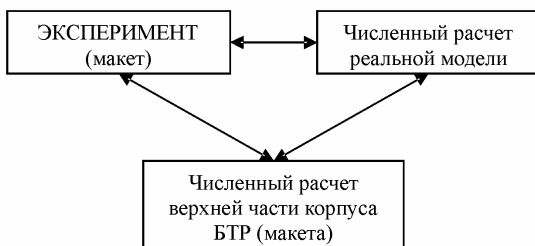


Рис. 6. Схема расчетно-экспериментальных исследований

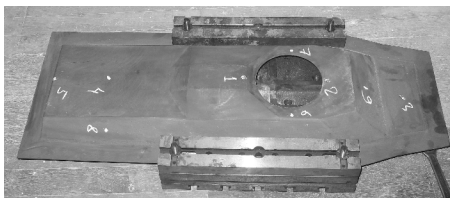


Рис. 7. Модель верхней части корпуса БТР-80, закрепленная в специальном приспособлении

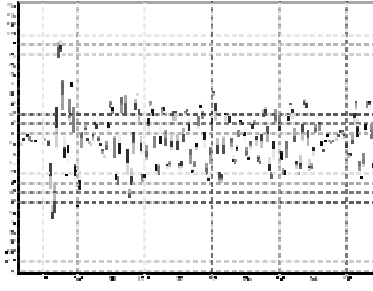
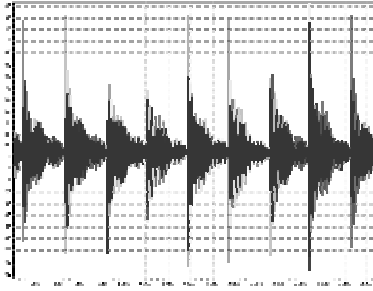


Рис. 8. Графики распределения во времени ускорений в точке 1 (эксперимент)

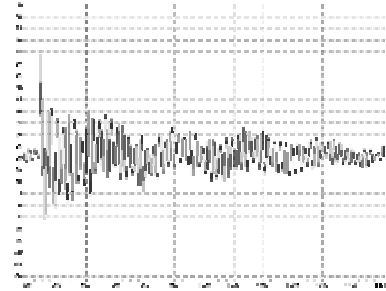
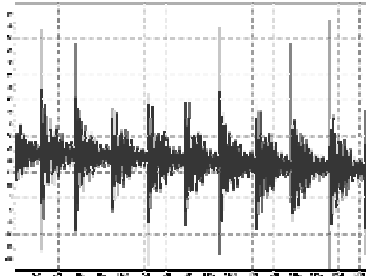


Рис. 9. Графики распределения скоростей в точке 1 (эксперимент)

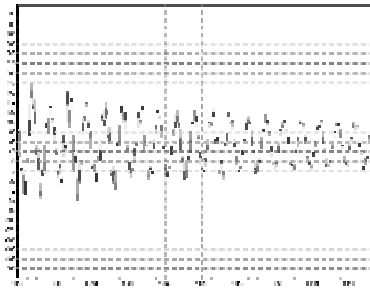
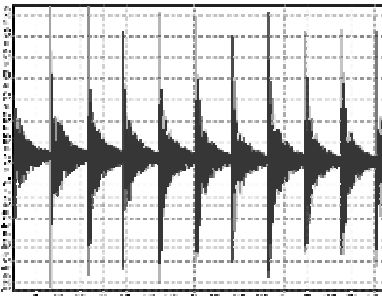


Рис. 10. Графики распределения ускорений в точке 2 (эксперимент)

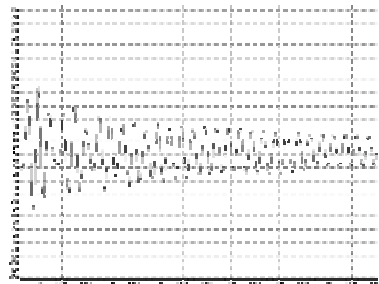
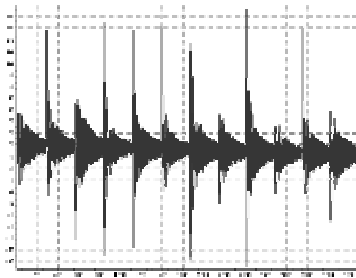


Рис. 11. Графики распределения скоростей в точке 2 (эксперимент)

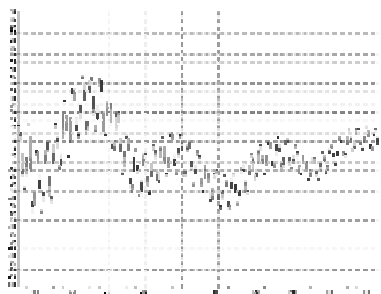
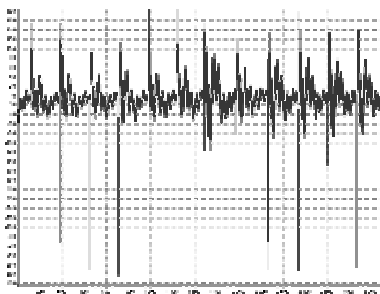


Рис. 12. Графики распределения перемещений в точке 2 (эксперимент)

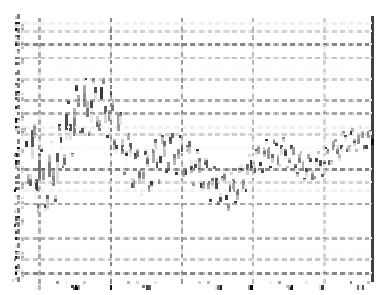
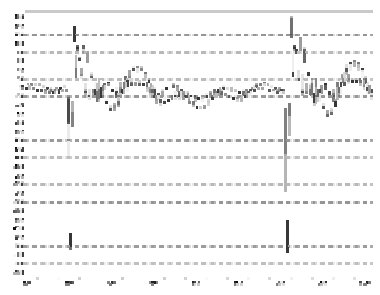


Рис. 13. Графики распределения перемещений в точке 3 (эксперимент)

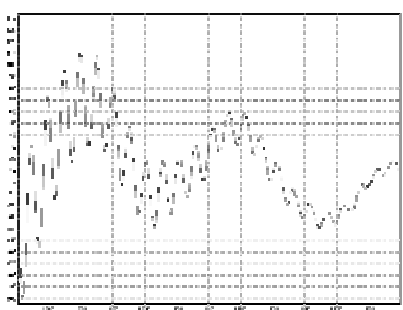
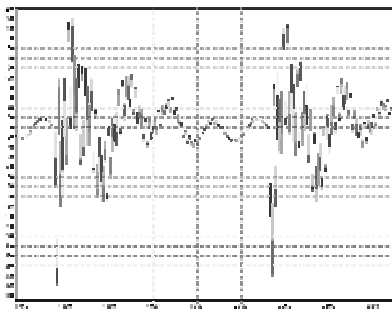


Рис. 14. Графики распределения перемещений в точке 4 (эксперимент)

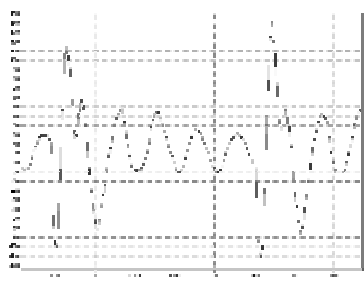
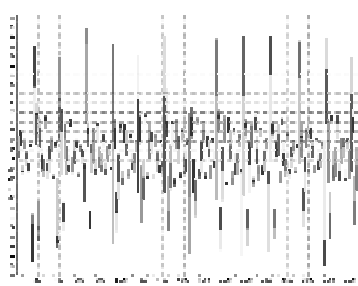


Рис. 15. Графики распределения перемещений в точке 5 (эксперимент)

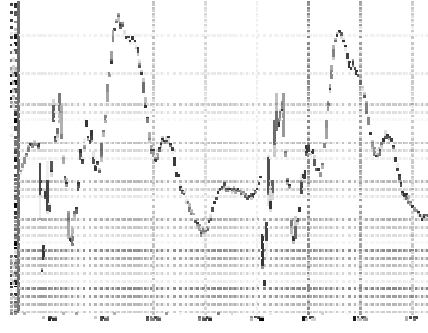
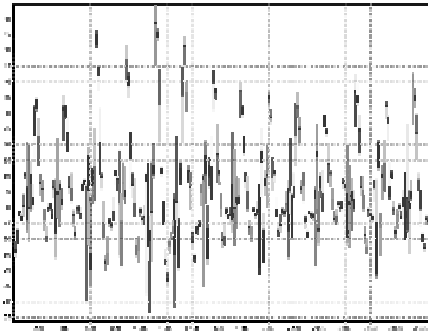


Рис. 16. Графики распределения перемещений в точке 6 (эксперимент)

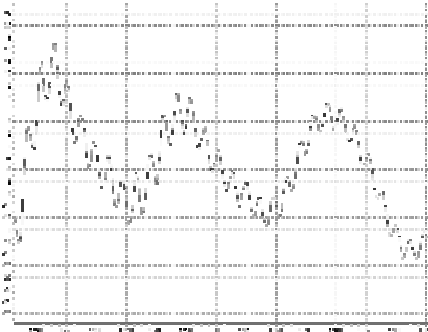
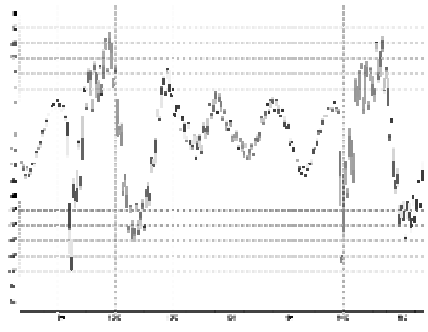


Рис. 17. Графики распределения перемещений в точке 8 (эксперимент)

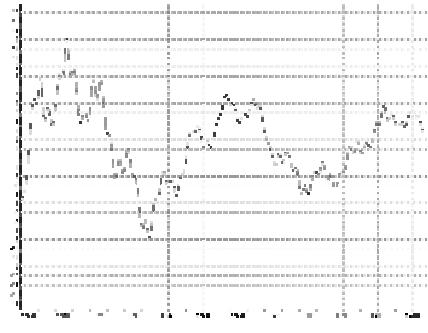
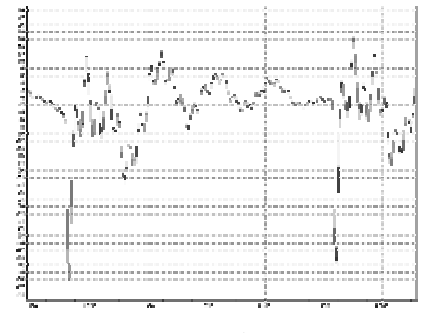


Рис. 18. Графики распределения перемещений в точке 9 (эксперимент)

На рис. 19-22 приведены некоторые формы колебаний макета верхней части корпуса бронетранспортера. На рис. 23-25 приведены характерные распределения ускорений, скоростей и перемещений точек макета корпуса БТР-80, полученных численно при моделировании действия на корпус импульсного воздействия от боевого модуля.

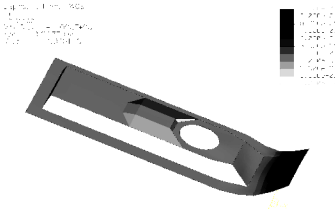


Рис.19. 1-я форма колебаний, 79 Гц

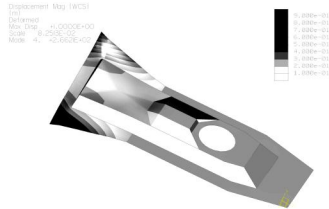


Рис. 20. 4-я форма колебаний, 266 Гц



Рис. 21. 9-я форма колебаний, 418 Гц

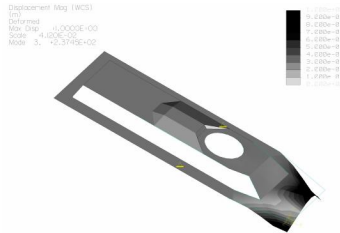


Рис. 22. 3-я форма колебаний, 237 Гц

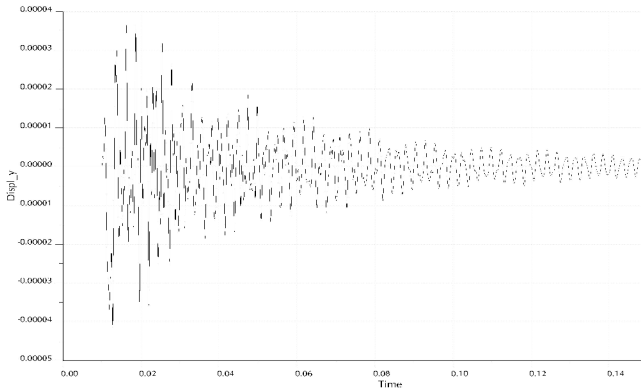


Рис. 23. Перемещения точки 2 при импульсном воздействии

Сравнение частот, полученных численным путем и при проведении эксперимента, приведено в таблице.

Таблица

Собственные частоты исследуемой конструкции, Гц

Экспериментально определенные частоты	Численно определенные частоты	Экспериментально определенные частоты	Численно определенные частоты
–	79	–	266
190-210	237	420-440	418

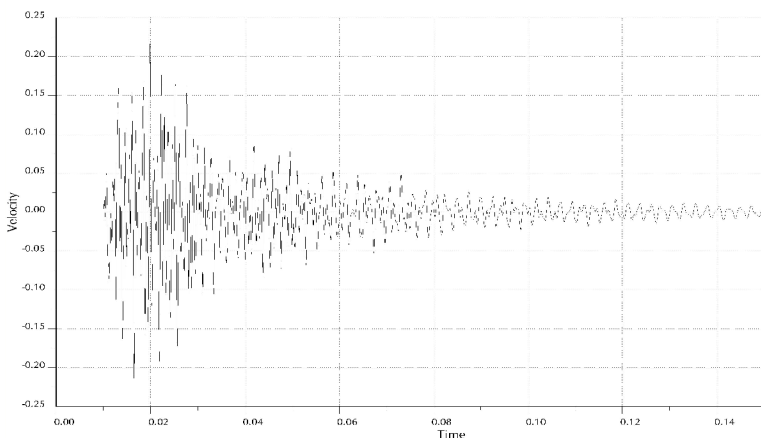


Рис. 24. Скорости точки 2 при импульсном воздействии

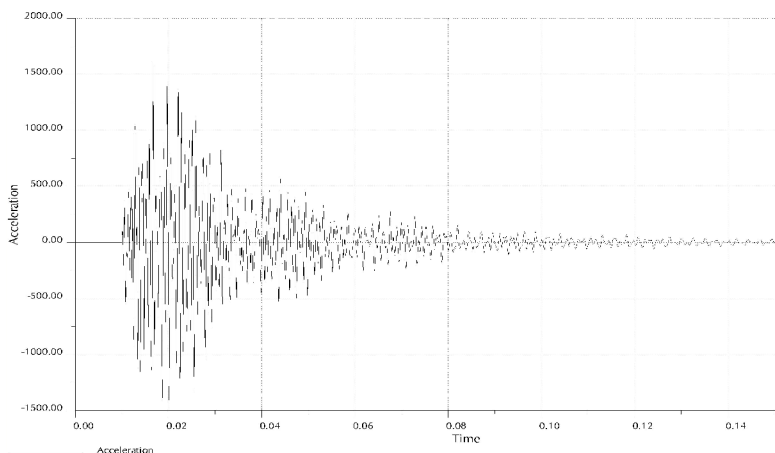


Рис. 25. Ускорения точки 2 при импульсном воздействии

Заключение. Описанная в работе комплексная методика и предварительные результаты могут служить в качестве обоснования расчетных схем элементов бронетранспортеров. В ходе проведенных исследований были выполнены следующие работы:

- предложена технология исследования фрагментов сварных пластин методом голографической интерферометрии;
- предложен метод экспресс-анализа напряженно-деформированного состояния и последующего синтеза корпусов транспортных средств специального назначения;

- построен программно-модельный комплекс для решения задачи нахождения собственных частот и форм модели верхней части корпуса БТР;
- проведен эксперимент по решению задачи нахождения собственных частот и форм колебаний корпуса БТР.

Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований показывает, что наблюдается хорошее качественное и удовлетворительное количественное соответствие распределений перемещений, собственных форм и частот колебаний макета корпуса БТР-80. Погрешность в определении частот не превышает 10 %, погрешность в определении перемещений – около 5 %. Это свидетельствует в пользу применимости используемых конечно-элементных моделей в пакетах ANSYS, CosmosWorks, Pro/MECHANICA к решению задач о динамическом нагружении усилиями отдачи при производстве выстрелов.

В дальнейшем предполагается использовать разработанный программно-модельный комплекс для анализа и синтеза корпусов боевых машин с учетом реакции на различные виды нагружения.

Список литературы. 1. Гриценко Г.Д., Малакей А.Н., Миргородский Ю.Я., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Интегрированные методы исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик элементов сложных механических систем // Механіка та машинобудування. – 2002. – №1. – С.6-13. **2.** Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Глуценко Э.В., Ткачук А.В. Программно-аппаратный комплекс для анализа и синтеза моделей элементов сложных механических систем // Вісник НТУ “ХПІ”. Тем. вип.: “Динаміка і міцність машин”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2004. – № 31. – С.154-165. **3.** Ткачук Н.А., Пономарев Е.П., Медведєва А.В., Миргородский Ю.Я., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д. Определение рациональных параметров элементов механических систем // Механіка та машинобудування. – 2001. – №1, 2. – С.308-314. **4.** Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 504 с. **5.** Капустин А.А. Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натуральных конструкций / В кн.: Физические основы голографии. – Л.: ЛИЯФ, 1979.– С.137–159. **6.** Капустин А.А. Методы, использующие голографическую интерферометрию для спекл-интерферометрических измерений / В кн.: Методические указания /Применение спекл-интерферометрии для контроля качества промышленных изделий. – Горький: ГФ. ВНИИМАШ, 1980.– С.45–53. **7.** Капустин А.А. Количественная оценка голографических интерферограмм с помощью спекл-интерферометрии в прочностных исследованиях / В кн.: Оптико-когерентные информационно-измерительные системы. – Харьков, 1977. – С.149–154. **8.** Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541с. **9.** Пелешко Е.В. Обобщенно-параметрический подход к исследованию корпусов транспортных средств специального назначения. // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: „Машинознавство і САПР” – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.– № 53. – С.106-111. **10.** Васильев А.Ю., Мартыненко А.В., Шталов О.Е., Пелешко Е.В. Комплексный подход к модернизации корпусов легкобронированных машин с использованием современных программных комплексов // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – 2005. – №26. – С.169-174. **11.** Пелешко Е.В. Применение обобщенно-параметрического подхода к анализу корпусов транспортных средств специального назначения // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – №1. – С.83-87. **12.** Васильев А.Ю., Пелешко Е.В. Построение параметрических моделей корпусов многоцелевых транспортеров для расчета их прочностных и жесткостных характеристик // Вестник НТУ “ХПІ”. Тем. вип.: „Колесные и гусеничные машины специального назначения” – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – № 28. – С.102-112.

Поступила в редакцию 10.12.07