

## РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБТ

УДК 623.438:539.3

А.Ю. Васильєв<sup>1</sup>, С.Т. Бруль<sup>2</sup>, І.М. Карапейчик<sup>3</sup>, М.А. Ткачук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

<sup>2</sup>Міністерство оборони України, м. Київ

<sup>3</sup>ПАТ «Азовмаш», м. Маріуполь

### ЗАХИЩЕНІСТЬ БРОНЕКОРПУСІВ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН ВІД ДІЇ УДАРНОЇ ХВИЛІ: ПІДХОДИ, МЕТОДИ, МОДЕЛІ, РЕЗУЛЬТАТИ

*Бронекорпуси сучасних легкоброньованих машин є досить уразливими до дії різних чинників, оскільки намагання зробити корпус легким вступає у протиріччя з вимогами захищеності. У статті мова йде про ту компоненту захищеності, яка відповідає дії ударної хвилі. Для моделювання реакції бронекорпусу на проходження такої хвилі необхідно розробити нові підходи, методи і моделі. Це і запропоновано в роботі. На відміну від традиційних підходів передбачається визначення розподілу надлишкового тиску та напружено-деформованого стану бронекорпусу з урахуванням пластичних деформацій.*

**Ключові слова:** бронекорпус, військові легкоброньовані машини, ударна хвиля, напружено-деформований стан, тактико-технічні характеристики

#### Вступ

При проектуванні об'єктів військової техніки конкретними вимогами до тактико-технічних характеристик (ТТХ) є намагання забезпечити, з одного боку, рухливість, а з іншого – захищеність. Перша вимога диктує мінімізацію маси, що нашоветься на вимогу забезпечення захищеності від дії надлишкового тиску, який спричиняє ударна хвиля від вибухів різного походження.

Ця обставина понукає моделювати дію ударної хвилі на об'єкт. Свого часу з цією метою використовувалися різноманітні аналітичні залежності, числові методи та експериментальні установки. Проте їм властиві певні недоліки. Так, аналітичні співвідношення мають обмеження у застосуванні щодо об'єктів складної форми (а бронекорпуси легкоброньованих машин є якраз такими). Експериментальні методики є складними, дорогими, потребують багато часу і, що важливо, наявності уже готового натурального об'єкта або хоча б його фізичної моделі. Числові методи, що широко застосовуються, не мають механізмів моделювання нерівномірного розподілу надлишкового тиску, що діє на корпус, з урахуванням особливостей обтікання ударною хвилею складних зовнішніх обводів машини. Крім того, зазвичай вони моделюють тільки пружну поведінку матеріалу бронекорпусу, що надто звужує величини надлишкового тиску та невиправдано порушує показники стійкості бронекорпусів до дії даного уражаючого чинника.

Таким чином, склалося протиріччя між можливостями традиційних підходів [1-6] та потребами промисловості і Збройних Сил у інструменті для визначення реальних показників захищеності. Враховуючи, що в сучасних умовах найбільш оперативні та достатньо точні результати при розв'язанні складних задач дає метод скінчених елементів (МСЕ), то якраз удосконалення підходів, методів та моделей для визначення реакції бронекорпусів легкоброньованих машин на дію ударної хвилі із застосуванням МСЕ є метою цієї роботи.

#### Постановка задач досліджень

Задля вдосконалення методів забезпечення захищеності легкоброньованих військових гусеничних і колісних машин (ВГКМ) при їх проектуванні і модернізації шляхом вибору раціональних конструктивних параметрів і схем посилення корпусів на основі аналізу динамічного напружено-деформованого стану бронекорпусів ВГКМ у нелінійній постановці при дії ударної хвилі для досягнення поставленої мети поставлені і розв'язані наступні задачі досліджень:

1. Розробка нових підходів і комплексної математичної моделі для аналізу процесу обтікання ударною хвилею бронекорпусів легкоброньованих машин і пружно-пластичного їх деформування під цим навантаженням.

2. Розробка алгоритмів і моделей для числового розв'язання задач аналізу і синтезу бронекорпусів

ВГКМ за критеріями захищеності від дії ударно-хвильового навантаження.

3. Проведення числових досліджень фізико-механічних процесів при дії ударної хвилі на бронекорпуси різних легкоброньованих машин, визначення особливостей реакції їх елементів та розробка рекомендацій із забезпечення рівня захищеності проєктованих корпусів.

Для дослідження нелінійного напружено-деформованого стану бронекорпусів легких ВГКМ залучаються методи теорії пластичності (механіки суцільного середовища); для числового дослідження параметрів розподілу тисків на поверхні колісних і гусеничних легкоброньованих машин застосовуються методи газодинаміки; розрахунок напружено-деформованого стану та газодинаміки здійснюється за допомогою числових методів скінченних елементів, різниць (МСР) та об'ємів (МСО); теорія, методи, алгоритми геометричного моделювання і комп'ютерні системи застосовані для побудови параметризованих комбінованих просторових твердотільних, поверхневих і стержневих моделей бронекорпусів; із застосуванням розрахунково-експериментального методу визначені параметри числових моделей бронекорпусів і навантаження на бронекорпус. Дослідження проводилися із залученням програмного забезпечення ANSYS.

### Підходи, методи та моделі для дослідження напружено-деформованого стану бронекорпусів при дії ударної хвилі

Для обґрунтування використання тих чи інших методів і моделей з метою здійснення в роботі числового моделювання захищеності легкоброньованих машин проведено аналіз компонувань рішень військових колісних і гусеничних машин, особливо їх корпусів, а також розглянуті тенденції проектних рішень і методики розрахунку параметрів бронекорпусів за критеріями захищеності від дії ударної хвилі. Основними розглянутими питаннями є: геометрія досліджуваних бронекорпусів; властивості матеріалів бронекорпусів; властивості уражаючих чинників (в першу чергу – ударної хвилі); характерні особливості фізико-механічних процесів, що виникають при дії ударної хвилі на бронекорпуси та засоби їх моделювання. Це послужило основою для постановки завдань і вибору методів досліджень. Як базові числові методи обрано методи скінченних елементів, різниць та об'ємів.

Як розвиток цих методів розроблені теоретичні основи забезпечення захищеності військових гусеничних і колісних машин легкої категорії за масою шляхом дослідження напружено-деформованого

стану бронекорпусів при дії ударної хвилі на основі нелінійних моделей поведінки матеріалів бронекорпусу та обтікання його повітряним потоком.

Зокрема, сформульовано задачу забезпечення захищеності бронекорпусів легкоброньованих машин (ЛБМ) від ударно-хвильового навантаження на етапі проєктування як задачу синтезу у просторі узагальнених параметрів [7] з урахуванням розв'язання задачі аналізу фізико-механічних процесів.

Задача синтезу у загальному вигляді базується на параметричному описі досліджуваної конструкції. Вона містить критеріальні функції, обмеження, характеристики і оператори фізико-механічних процесів. Тут як варійовані узагальнені параметри виступають: тип машини; конфігурація бронекорпусу в проєкціях; карта товщини бронелістів; властивості матеріалів бронепанелей; характеристики ударної хвилі.

Звернемося до останніх. На рис.1 показано деякий зріз розподілу надлишкового тиску ударної хвилі. Багато боєприпасів створюють надлишковий тиск у фронті ударної хвилі сотні кПа на великій відстані. А це призводить до необхідності урахування їх дії на бронекорпус ЛБМ класу БТР, БМП, БМД за нелінійними моделями.

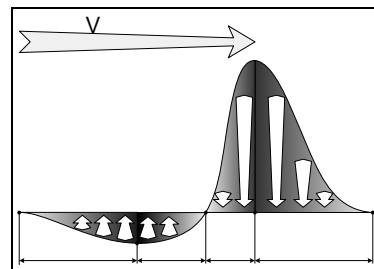


Рис. 1. Просторовий зріз надлишкового тиску при проходженні ударної хвилі

З іншого боку, є критеріальні функції: маса, габарити, жорсткість бронекорпусу тощо. Вони залежать від узагальнених параметрів, які входять у визначальні рівняння фізико-механічних процесів.

Крім того, ці ж параметри багато в чому визначають обмеження, що діють на досліджуваний об'єкт і процес. Дуже важливо осмислити саме ці обмеження. Традиційно, наприклад, обмеження за міцністю полягали в недопущенні пластичних деформацій корпусу. На наш погляд, це тільки перший рівень обмежень. На жаль, він привносить дуже жорсткі вимоги по товщині у різних проєкціях ЛБМ. У результаті неможливо зробити машину легкою, плаваючою, рухливою. У зв'язку з цим можна запропонувати другий, більш компромісний, рівень. А саме: вимагати неперевищення пластичними деформаціями рівня, при якому відбувається розгерметизація корпусу по місцях ущільнень. Далі – третій рівень – збереження цілісності корпусу.

Таким чином, можна передбачити різні рівні вимог і підпорядкувати їм проектні рішення.

При цьому уже другий рівень вимагає дослідження на основі нелінійних моделей фізико-механічних процесів, що принципово відрізняє запропонований підхід від традиційних, які базуються на лінійних моделях першого рівня.

При розгляді моделей фізико-механічних процесів їх можна розділити на окремі підмоделі. По-перше, це модель нерівномірного нестационарного обтікання газодинамічним потоком бронекорпусу машини. Розв'язувальні співвідношення Нав'є-Стокса у тензорній формі:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho E u_k + p u_k - \tau_{ik} u_i) = S_k u_k + Q_H \quad (3)$$

де  $t$  – час,  $u$  – швидкість середовища,  $\rho$  – його густина,  $p$  – тиск у точках середовища,  $S_i$  – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу середовища;  $E$  – повна енергія одиничної маси середовища,  $Q_H$  – тепло, що виділяється,  $\tau_{ik}$  – тензор в'язких дотичних напружень,  $q_i$  – дифузійний тепловий потік [8-10].

Основна розрахункова формула методу для знаходження напружено-деформованого стану при дії навантаження, яке визначене у результаті розрахунку газодинаміки обтікання, записана нижче у матричному вигляді (лінійна модель)

$$[M]^{const} \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K]^{const} \{X\} = \mathcal{R}(\{r\} - \{V\}t) \quad (4)$$

Основна розрахункова формула методу для знаходження напружено-деформованого стану при дії рухомого навантаження має вигляд (загальний випадок)

$$[M]^{const} \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K]^{const} \{X\} = \mathcal{R}(\{r\}, \{X\}, \{\dot{X}\}, \{V\}, t) \quad (5)$$

Тут в (4), (5):  $\mathbf{M}^-$  – глобальна матриця демпфування скінченно-елементної моделі;  $\mathbf{M}^-$  – її глобальна матриця мас;  $\mathbf{K}^-$  – глобальна матриця жорсткості;  $\mathcal{R}$  – шуканий вектор вузлових переміщень моделі;  $\mathcal{R}$  – радіус-вектор довільної точки бронекорпуса;  $\mathcal{R}(\mathcal{R}, \{X\}, \{\dot{X}\}, \{V\}, t)$  – глобальний вектор навантажень;  $\mathcal{V}$  – швидкість переміщення рухомого навантаження.

Позначення *const* до матриці означає, що в ході розрахунку матриця залишається незмінною. Це справедливо на етапі пружної деформації бронекорпусу. В умовах настання пластичних деформацій ці матриці стають змінними. При поетапному інтегруванні розв'язувальних співвідношень (5) для обчислення та коригування елементів даних матриць використовуються співвідношення для опису пружно-пластичної поведінки матеріалів бронекорпусу при дії динамічного навантаження. Для цього використовують моделі матеріалу з ізотропним та кінематичним зміцненням (рис. 2). Для розрахунку використовують теорії течії інкрементального типу, які визначають на кожному етапі навантаження зв'язок приросту напруження з приростом деформацій.

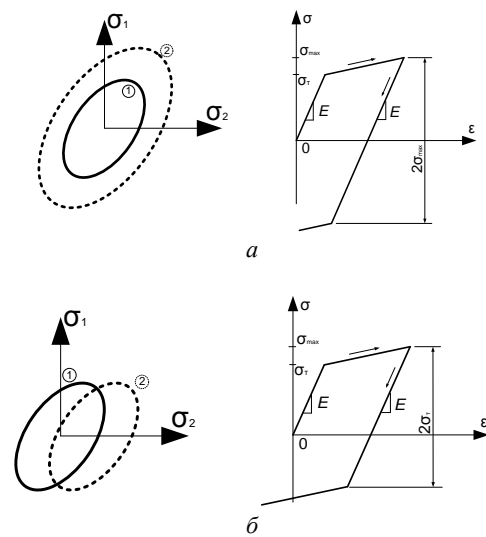


Рис. 2. Моделі ізотропного (а) та кінематичного (б) зміцнення матеріалів бронекорпусу

Усі розв'язувальні співвідношення (1-5) за допомогою методів скінченних елементів, різниці та об'ємів переводяться до дискретизованої форми. Для цього використовуються можливості сучасних програмних комплексів. Проте при цьому виникають проблеми обґрунтованого вибору кроку інтегрування у часі та моделювання рухомого навантаження від дії ударної хвилі. Для розв'язання першої застосовується підхід, аналогічний використаному у роботах С.Т. Бруля [1,2,8]. При цьому на першому етапі визначаються спектри частот власних коливань конструкції. На відміну від традиційних методик моделювання за лінійними моделями (4), у яких можна застосувати спосіб розкладання за власними формами, у даному випадку застосовне тільки пряме інтегрування рівняння вимушених коливань (5). Це, звичайно, вимагає великих витрат обчислювальних ресурсів та часу. Тому потрібно особливу увагу приділити обґрунтуванню раціонального вибору часового та просторового кроків дискретизації досліджуваних процесів. З цією метою користуються

практично достатньою умовою віднесення ударної дії до короткого удару

$$0 < p_* \tau < \pi / 4, \quad (6)$$

де  $p_*$ ,  $\tau$  – власна частота коливань бронекорпусу та тривалість імпульсу.

Виходячи з (6), можна установити часову дискретизацію досліджуваного процесу та, базуючись на цьому, здійснити перехід до просторової дискретизації рухомого навантаження. Як і в попередніх дослідженнях, основною особливістю ударної хвилі є те, що імпульсне силове збурення міняє місце прикладання по поверхні конструкції в часі відповідно до напрямку та швидкості руху фронту (рис. 3). Рациональним підходом є заміна безперервної ударної хвилі системою послідовних імпульсних ударних навантажень, прикладених на обмежених ділянках поверхні скінченно-елементної моделі конструкції (рис. 4).

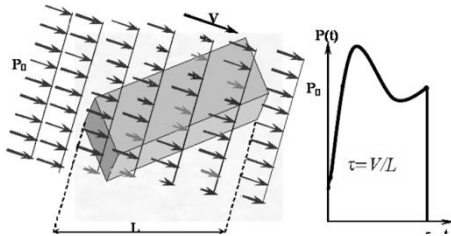


Рис. 3. Розподіл ударного хвильового навантаження на корпус ВГМ

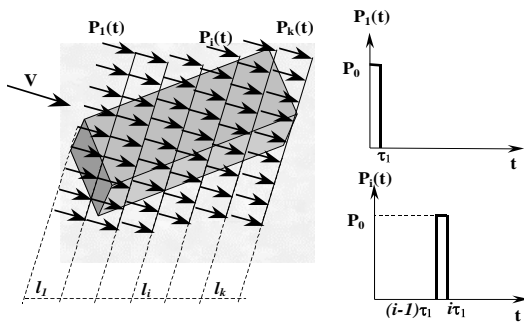


Рис. 4. Схема розділення ударної хвилі на послідовність імпульсів

Також природним є розбиття безперервного навантаження на ділянки рівної тривалості  $\tau_1$ . У цьому випадку поверхня конструкції розбивається на ділянки рівної довжини  $l_i$  уздовж напрямку руху фронту ударної хвилі. Тривалість дії і довжина ділянки визначаються як (рис. 3, 4)

$$\tau_1 = L/v/k; \quad l_i = L/k, \quad i=1, \dots, k. \quad (7)$$

При цьому на кожній ділянці діятиме своє імпульсне навантаження  $P_i(t)$  (рис. 4), яке, на відміну від традиційних підходів, має не однакову, а різну амплітуду (визначається при розв'язанні задачі

газодинамічного обтікання бронекорпусу ударною хвилею), проте – постійні тривалість і форму. Отже, забезпечується, на відміну від традиційних моделей, нерівномірна у просторі, нестационарна у часі та нелінійна при навантаженні поведінка складових процесів і станів, що моделюються.

Таким чином, описані вище підмоделі дають змогу більш адекватно і точно моделювати навантаження на бронекорпус і його реакцію на дію ударної хвилі, причому вони природним чином представляються у дискретній формі за допомогою МСР, МСО і МСЕ. Ці підмоделі легко вбудовуються у процес ітераційного розв'язання задач оптимізації конструктивних варіантів і параметрів бронекорпусу за критеріями захищеності, оскільки завдяки закладеній варіативності не виникає проблем при багатоваріантних послідовних розрахунках процесу газодинамічного обтікання та динамічного напружено-деформованого стану елементів бронекорпусів.

Таким чином, можна зробити висновок, що у роботі на основі параметричного підходу поставлені і розв'язані задачі синтезу бронекорпусів і аналізу процесів та станів на основі нелінійних моделей фізико-механічних процесів, що складає методичну базу роботи.

## Програмна реалізація

Враховуючи, що отримувані задачі аналізу фізико-механічних процесів є досить складними, а кількість розрахунків – дуже велика (через велику кількість варіантів конструкцій і характеристик ударної хвилі), то потрібне створення спеціального програмно-модельного середовища для розв'язання задач аналізу та адаптації його для багатоваріантних досліджень. У зв'язку з цим у роботі запропонований комплекс програм і моделей, які, по-перше, об'єднують різні етапи розрахунків, по-друге, їх автоматизують, а по-третє, дозволяють розв'язувати комплекс багатоваріантних досліджень. Структура комплексу показана на рис. 5 [8-10]. Його можливості складають практичну цінність при проведенні проектних досліджень.



Рис. 5. Спеціалізована інтегрована система автоматизованого аналізу і синтезу елементів бронекорпусів ЛБМ як складних механічних систем

Розв'язуються, зокрема, задачі: визначення силових параметрів (розподіл тиску на бронекорпус ЛБМ під впливом ударної хвилі з урахуванням обтікання його потоком повітря як об'єкта складної форми); вибір найбільш доцільного способу урахування нелінійної поведінки матеріалу бронекорпусу, в першу чергу – його пружно-пластичної деформації під дією великого за величиною знакозмінного навантаження.

Також необхідно розробити та описати загальний підхід до створення варійованих моделей ЛБМ, який ляже в основу спеціалізованого програмно-модельного комплексу (СПМК) для аналізу і синтезу з урахуванням вимог захищеності бронекорпусів. Одним із важливих пунктів при розробці даного СПМК є необхідність автоматизації наступних етапів: побудова адекватних геометричних, розрахункових і математичних моделей; можливість проведення багатоваріантних розрахунків; зберігання результатів моделювання для їх подальшого використання; накопичення бази даних моделей, розрахунків, результатів і прийнятих рішень.

Відповідно розроблені загальні підходи, адаптовані для розв'язання поставлених вище задач, а також, як результат, – створене спеціалізоване програмно-модельне середовище і множина моделей, об'єднані в СПМК (рис. 5) на основі розширеного параметричного опису та інтеграції спеціалізованих програмних модулів з універсальними системами Pro/ENGINEER, SolidWorks та ANSYS. Приклади параметричних моделей – на рис. 6.

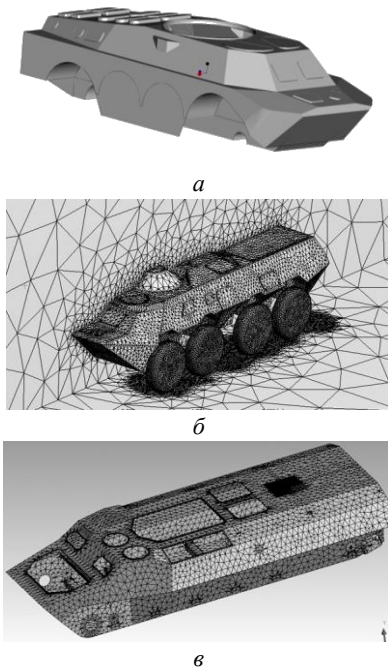


Рис. 6. Параметричні моделі корпусів ЛБМ, створені у середовищі СПМК:

*a* – геометрична модель корпусу БРДМ; *б* – граткова модель корпусу БТР-80 для розрахунку ГГД; *в* – скінченно-елементна модель корпусу МТ-ЛБ для розрахунку НДС

Створений СПМК забезпечує проведення досліджень з варіюванням параметрів ударної хвилі та конструкції бронекорпусу ЛБМ у широких межах в автоматизованому режимі з можливістю обробки одержаної інформації.

### Приклади досліджень

У роботі на прикладі декількох типів машин проведено низку досліджень, проілюстрованих на рис. 7-10.

На рис. 7 показаний розподіл тиску при обтіканні ударною хвилею різних машин. Аналіз отриманих розподілів показує різку відмінність тиску (темніший колір - більший тиск) на окремі бронелисти від тих, що задаються за традиційними методиками. Різниця може досягати до 10 і більше разів (рис. 8). Це свідчить про необхідність етапу газодинамічного аналізу в загальному процесі проектних досліджень.

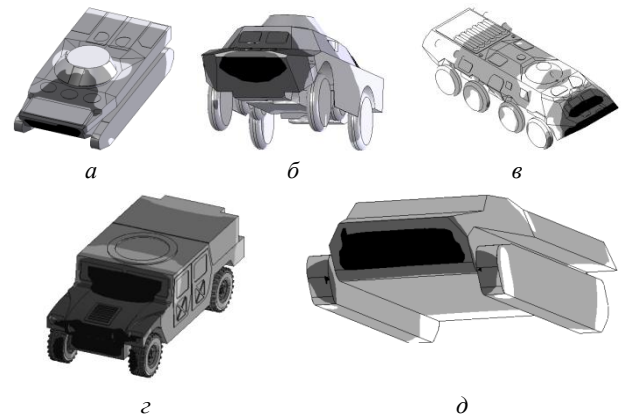


Рис. 7. Картини розподілу надлишкового тиску при обтіканні корпусів ЛБМ ударною хвилею:

*a* – БМП-3; *б* – БРДМ; *в* – БТР-80;  
*г* – «Хаммер»; *д* – МТ-ЛБ

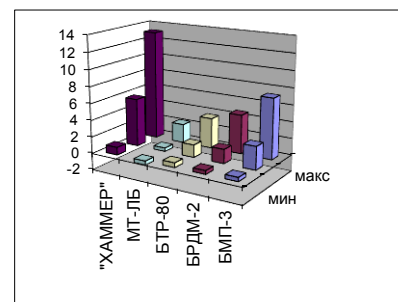


Рис. 8. Розбіжність тиску по поверхнях бронекорпусів різного типу відносно величин за традиційною методикою

На рис. 9, 10 представлена реакція елементів бронекорпусів на дію ударної хвилі. Видно, що із зростанням надлишкового тиску в ударній хвилі різко зростають пластичні деформації силової структури, виготовленої із конструкційної сталі. Наприклад, в корпусах МТ-ЛБ велика частина силової структури набуває пластичних деформацій

при незначному тиску. При цьому бронелисти знаходяться у пружному стані. Таким чином, можна зробити висновок про доцільність використання як матеріалу силової структури сталей з вищою межею текучості матеріалу. Це дуже ефективно для підвищення захищеності бронекорпусів від дії ударної хвилі з точки зору обмежень як першого рівня, так і другого.

Отже, бронекорпус при невисокому тиску опирається його дії за рахунок як внутрішнього силового каркаса із звичайної конструкційної сталі, так і зовнішньої оболонки із спецматеріалу. При знятті навантаження корпус досить швидко повертається у початковий недеформований стан.

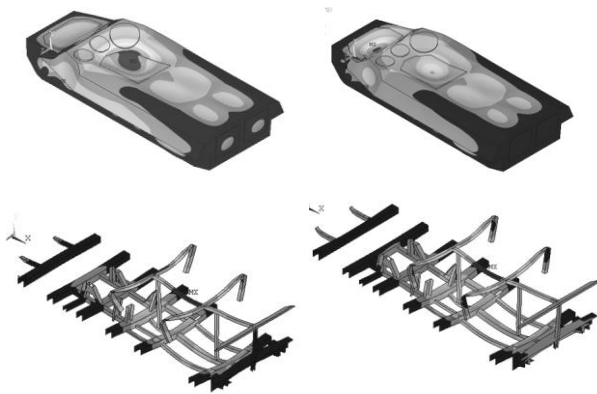


Рис. 9. Загальна картина деформування корпусу МТ-ЛБ та його силової структури у різні моменти проходження ударної хвилі

Проте при рості надлишкового тиску внутрішній каркас перестає опиратися росту тиску і різко зростають напруження у бронелистах із спецматеріалу. При цьому вони залишаються у пружній області. Після проходження ударної хвилі за рахунок пластичних деформацій внутрішнього каркаса корпус отримує залишкову деформацію, причому бронелисти обшивки переважно залишаються у пружному стані.

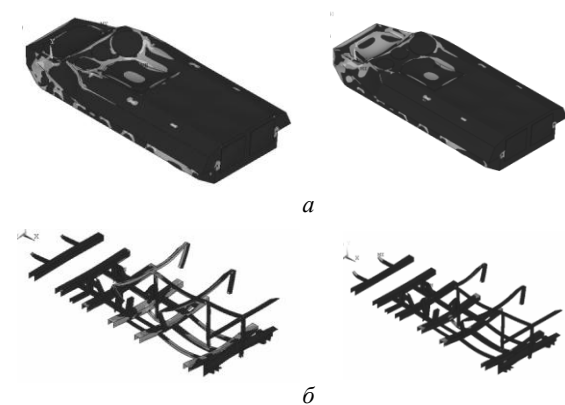


Рис. 10. Еквівалентні напруження у корпусі МТ-ЛБ (а) та його силівій структурі (б) у різні моменти проходження ударної хвилі

З аналізу представлених результатів видно їх різка відмінність від раніше одержаних. Для машин серії МТ-ЛБ при низькому рівні надлишкового тиску отримувані результати практично збігаються. У той же час при перевищенні  $\Delta P$  деякого порогу розрахункові напруження відрізняються вже у кілька разів. Це – кількісна відмінність. Якісна відмінність полягає в тому, що запропонований підхід допускає пружно-пластичну деформацію корпусу. Це означає, що створена на його основі модель бронекорпусу зберігає цілісність при високих деформаціях окремих елементів попри та навіть завдяки пластичним деформаціям внутрішньої силової структури. Цим самим «розширюється» розрахункова «зона живучості» бронекорпусу при дії ударної хвилі.

Часовий розподіл компонент напружено-деформованого стану демонструє, що після проходження ударної хвилі корпус «відпрацьовує» коливальний затухаючий процес, причому розмах коливань досягає максимуму на перших 1-3 махах, далі монотонно зменшуючи рівень амплітудних відхилень.

Кількісно різницю між результатами, одержаними за пропонуваними моделями, з одного боку, та традиційними методиками, - з іншого, досягає кількох відсотків.

Таким чином, проведені дослідження дають підстави для висновків про значне уточнення результатів, одержаних за допомогою нелінійних моделей порівняно з випадком застосування традиційних моделей. Більш того, при підвищеному надлишковому тиску в ударній хвилі лінійні моделі принципово неприйнятні.

Виявлені також у ході числових досліджень найбільш навантажені ділянки бронекорпусів, найбільш уразливі елементи конструкції та найбільш слабкі проєкції. Також установлена необхідність урахування пружно-пластичної деформації (крім елементів внутрішньої силової структури) матеріалу зварних з'єднань.

### Експериментальні дослідження

Одержані результати потребують експериментальної перевірки. У роботі представлені результати порівняння отриманих числових результатів з експериментально зафіксованими. Залучалися дані лабораторних випробувань макета фрагмента бронекорпусу МТ-ЛБ для ідентифікації та оцінки точності при визначенні частот та власних форм коливань досліджуваних бронекорпусів.

У ході лабораторних випробувань досліджувався макет був підданий дії збудження на вібростенді (рис. 11). Установлені спектри та форми власних коливань, які узгоджуються з даними числових досліджень (рис. 12). Це служить показником того, що побудована скінченно-елементна модель коректно

та досить точно (похибка - на рівні 10%) описує пружно-інерційні властивості конструкції.

Модель з аналогічною скінченно-елементною сіткою була використана у подальшому при числовому моделюванні напружено-деформованого стану бронекорпусу МТ-ЛБ при дії ударної хвилі. Одержані при цьому результати порівнювалися з даними випробувань у полігонних умовах.

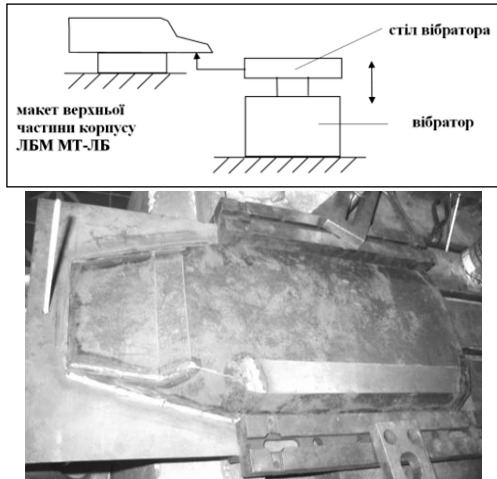


Рис. 11. Лабораторна установка для випробувань макета фрагмента бронекорпусу МТ-ЛБ

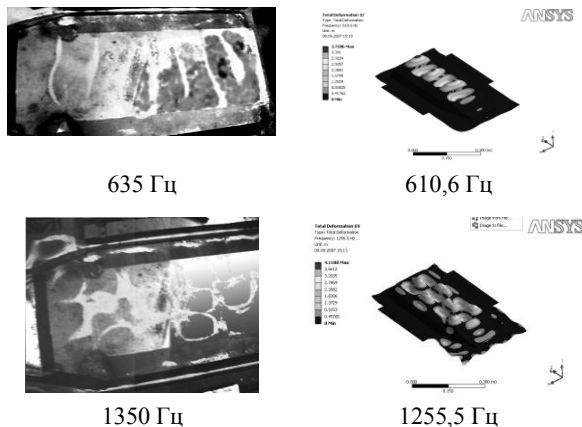


Рис. 12. Порівняння частот і форм власних коливань макета фрагмента бронекорпусу МТ-ЛБ (зліва – експеримент, справа - розрахунок)

На цьому етапі також спостерігається задовільна відповідність результатів числових і експериментальних досліджень. Тут потрібно відзначити два аспекти. По-перше, для малого тиску і лінійна, і нелінійна моделі фізико-механічних процесів дають результати, що ненабагато відрізняються один від одного і від даних експериментальних досліджень. Починаючи з деякого «порогового» (див. вище) тиску, спостерігається різка відмінність результатів, що отримуються на лінійних і нелінійних моделях, але зберігається відповідність результатів, отриманих на нелінійних моделях, з даними експериментів. Разом з тим більш ретельний аналіз цих

результатів потребує подальших досліджень, які будуть описані у наступних роботах.

Таким чином, продемонстрована повна якісна і задовільна кількісна відповідність результатів, одержаних із використанням запропонованого підходу. Це свідчить про адекватність розроблених підходів і моделей. Вони можуть бути використані як основа при проектному забезпеченні захищеності бронекорпусів ЛБМ від дії ударної хвилі, а також на етапі технологічної підготовки виробництва.

## Висновки

У роботі розв'язана актуальна і важлива науково-практична задача удосконалення методів і засобів забезпечення захищеності легкоброньованих військових гусеничних і колісних машин при їх проектуванні і модернізації шляхом вибору раціональних конструктивних параметрів і схем посилення корпусів на основі аналізу динамічного напружено-деформованого стану бронекорпусів ВГКМ у нелінійній постановці при дії ударної хвилі. Аналіз результатів досліджень дає підстави зробити наступні висновки.

1. Аналіз стану питання проектування і дослідження реакції бронекорпусів бойових машин легкої категорії за масою на дію ударної хвилі продемонстрував, що при використанні лінійних моделей допускаються значні похибки у визначенні напружено-деформованого стану. У зв'язку з цим розроблені нові підходи до розв'язання задачі моделювання реакції бронекорпусів на дію рухомого навантаження на основі нелінійних моделей для обґрунтування їх конструктивних параметрів, які забезпечують заданий рівень захищеності від ударної хвилі.

2. У роботі розроблені нові підходи і удосконалена комплексна математична модель процесу обтікання ударною хвилею бронекорпусів легкоброньованих машин і пружно-пластичного їх деформування під цим навантаженням. Така постановка принципово відрізняється від традиційних, у яких розподіл надлишкового тиску в ударній хвилі є апріорно заданим у різних проекціях машини без урахування геометричної форми бронекорпусів, що обтікаються. Крім того, урахування пластичної складової деформацій дає змогу установити, на відміну від традиційних однорівневих, різні рівні критеріальних вимог до захищеності бронекорпусу проектованої машини. Перший рівень відповідає вимозі роботи матеріалів бронекорпусу у пружній області. Другий рівень забезпечує збереження герметичності корпусу з урахуванням пружно-пластичних деформацій. Третій рівень визначає умови початку руйнування бронекорпусу.

3. Запропонована математична модель реалізована у вигляді алгоритмів і числових моделей, об'єднаних у спеціалізований програмно-модельний

комплекс. На відміну від існуючих способів досліджень одиничних варіантів задач аналізу створювані СПМК дають змогу для множини легкоброньованих машин в автоматизованому режимі розв'язувати задачі аналізу і синтезу структури і параметрів бронекорпусів ВГКМ за критеріями захищеності від дії ударно-хвильового навантаження, причому на основі уточнених нелінійних нестационарних моделей фізико-механічних процесів. Структурно СПМК об'єднує спеціалізовані модулі, які варіюють параметричні моделі бронекорпусів, а сам процес розрахунків відбувається у середовищі потужних універсальних програмних комплексів Ansys, Pro/ENGINEER, SolidWorks. Таким чином, розроблено числовий інструмент, придатний для використання безпосередньо в умовах проектних досліджень.

4. Із використанням розроблених спеціалізованих програмно-модельних комплексів здійснено числові дослідження фізико-механічних процесів при дії ударної хвилі на бронекорпуси різних легкоброньованих машин. Установлено, що порівняно із традиційними методиками газодинамічне моделювання дає суттєво нерівномірну картину розподілу надлишкового тиску при обтіканні бронекорпусів ударною хвилею. Ця нерівномірність досягає 10 і більше разів залежно від форми бронекорпусу і від розміщення того чи іншого його бронеліста. Визначено також характерні особливості деформування бронекорпусів. Так, для машин серії МТ-ЛБ можна визначити рівень низького надлишкового тиску, у межах якого бронекорпус не набуває залишкових напружень. Більш високий тиск супроводжується різким ростом залишкових деформацій, причому за рахунок внутрішнього силового каркаса із конструкційної сталі. Критичний тиск призводить до початку переходу в зону пластичності бронелістів, а також до швидкого руйнування конструкції при збільшенні тиску. У зв'язку з цими особливостями рекомендації із забезпечення захищеності бронекорпусів при дії ударної хвилі потрібно починати із заходів з підсилення їх внутрішньої силової структури.

5. Порівняльний аналіз результатів числових і експериментальних (в лабораторних та полігонних умовах) досліджень реакції бронекорпусів на дію ударної хвилі свідчить про задовільну (похибка - на рівні 15-20 %) їх відповідність. При цьому досягнуто похибку числового моделювання власних коливань макета фрагмента бронекорпусу до 10 %. Таким чином, на відміну від традиційних, запропонований у роботі двохетапний підхід дає змогу на етапі макетного моделювання одержувати параметри якісних скінченно-елементних моделей, а на етапі досліджень реальних конструкцій із використанням цих моделей одержувати більшу точність моделювання нелінійних нестационарних процесів у бронекорпусах.

Розроблені спеціалізовані програмно-модельні комплекси на основі нелінійних моделей можуть бути використані у подальшому при проектно-технологічному забезпеченні захищеності бронекорпусів проєктованих машин від дії ударних хвиль різноманітного походження.

## Список літератури

1. 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.
2. Бруль С.Т. Моделирование реакции корпуса боевой машины на действие подвижной нагрузки: теория, методы и модели / С.Т. Бруль // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2007. – №3. – С. 24-43.
3. Васильев А.Ю. Построение параметрических моделей корпусов многоцелевых транспортеров для расчета их прочностных и жесткостных характеристик / А.Ю. Васильев, Е.В. Пелешко // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Колесные и гусеничные машины специального назначения. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – № 28. – С. 102-112.
4. Васильев А.Ю. К вопросу о деформировании корпусов транспортных средств под действием ударных нагрузок характеристик / А.Ю. Васильев // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск „Динамика и прочность машин” – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – № 47. – С. 42-50.
5. Васильев А.Ю. К вопросу интегрированных систем анализа динамических процессов в корпусах транспортных средств специального назначения / А.Ю. Васильев, А.Н. Малакей, Е.В. Пелешко, О.Е. Шаталов // Механіка та машинобудування. – 2004. – №1. – С. 51-60.
6. Пономарев Е.П. К вопросу о проведении многовариантного анализа динамики поведения корпуса МТ-ЛБ при одиночном выстреле / Е.П. Пономарев, А.Ю. Васильев // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2005. – №53. – С. 111-116.
7. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С. 57-79.
8. 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 // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2011. – №51. – С. 59-65.
9. Васильев А.Ю. Дослідження процесу обтікання корпусу МТ-ЛБ ударною хвилею / А.Ю. Васильев // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2009. – №28. – С.3-10.
10. Васильев А.Ю. Исследование процесса обтекания корпусов легкобронированных машин ударной волной / А.Ю. Васильев // Механіка та машинобудування. – 2009. – №1. – С. 96-107.

**Рецензент:** д.т.н., проф. Д.О. Волонцевич, завідувач кафедри «Колісні та гусеничні машини ім. О.О.Морозова» НТУ «ХПИ», м. Харків.



## ЗАЩИЩЕННОСТЬ БРОНЕКОРПУСОВ ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН ОТ ДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ: ПОДХОДЫ, МЕТОДЫ, МОДЕЛИ, РЕЗУЛЬТАТЫ

А.Ю. Васильев, С.Т. Бруль, И.Н. Карапейчик, Н.А. Ткачук

*Бронекорпуса современных легкобронированных машин являются достаточно уязвимыми к действию разных факторов, поскольку попытка сделать корпус легким вступает в противоречие с требованиями защищенности. В статье речь идет о той компоненте защищенности, которая соответствует действию ударной волны. Для моделирования реакции бронекорпуса на прохождение такой волны необходимо разработать новые подходы, методы и модели. Это и предложено в работе. В отличие от традиционных подходов предусматривается определение распределения избыточного давления и напряженно-деформированного состояния бронекорпуса с учетом пластических деформаций.*

**Ключовые слова:** бронекорпус, военные легкобронированные машины, ударная волна, напряженно-деформированное состояние, тактико-технические характеристики

## PROTECTION OF LIGHTLY ARMORED VEHICLES ARMORED HULLS FROM THE SHOCK WAVE AFFECT: APPROACHES, METHODS, MODELS, RESULTS

A. Vasiliev, S. Brul, I. Karapeichyk, N. Tkachuk

*Armored hulls of modern lightly armored vehicles are quite vulnerable to the action of different factors, because an attempt to make light hull contradicts the requirements of protection. In the paper the question is about the component of protection that corresponds of shock wave effect. For modeling of armored hull reaction on passage of such wave it is necessary to develop new approaches, methods, and models. They are presented in this paper. Unlike traditional approaches determination of surplus pressure distribution and stressed-deformed state of armored hull is envisaged taking into account flowages.*

**Key words:** hull, light armored military vehicles, shock wave, the stress-strain state, performance characteristics.

---

УДК 629.072.19 (075.8)

В.І. Грабчак

Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

## ВПЛИВ ПОЧАТКОВИХ УМОВ ЗБУРЕНОГО РУХУ СНАРЯДА НА ВЕЛИЧИНУ ЙОГО КУТА НУТАЦІЇ

*В статті досліджується вплив початкових умов вильоту снаряда з каналу ствола гармати за умови, що канал ствола і снаряд мають абсолютну осьову симетрію, а прецесійний рух снаряда відбувається тільки за рахунок дії сили тяжіння та за умови значної виробки і розігріву каналу ствола гармати під час стрільби. Наведені залежності, які дозволяють оцінити вплив початкових умов вильоту снаряда з каналу ствола, за різних умов стану снаряда та каналу ствола гармати.*

**Ключові слова:** нутаційні коливання та прецесійний рух снаряда, кут та кутова швидкість нутації, статична та динамічна нерівноваженість снаряда.

### Вступ

**Постановка проблеми в загальному вигляді та аналіз літератури.** На сьогоднішній день точність визначення установок для стрільби артилерійськими боеприпасами різного класу на основі повної підготовки з ряду причин, і особливо через недосконалість існуючих методів і засобів балістичної

підготовки стрільби, не повною мірою відповідає сучасним вимогам [1, 2]. Так, стрільба з гармат з середньою або зі значною виробкою (зносом) каналу ствола та стрільба під час розігріву ствола гармати буде супроводжуватися значними початковими збуреннями, які не враховуються (враховуються частково) при проведенні балістичної підготовки стрільби, що приведуть до збільшення кутів