

УДК 623.438:539.3

І.М. Карапейчик<sup>1</sup>, С.Т. Бруль<sup>2</sup>, М.А. Ткачук<sup>3</sup>, Є.В. Пелешко<sup>4</sup>, О.В. Кохановська<sup>3</sup><sup>1</sup> ПАТ «Азовмаш», Маріуполь<sup>2</sup> Міністерство оборони України, Київ<sup>3</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків<sup>4</sup> Індустріальна група «УПЕК», Харків

## ПІДВИЩЕННЯ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН ШЛЯХОМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ БРОНЕКОРПУСІВ

*У статті описано новий підхід до підвищення тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин шляхом забезпечення міцності бронекорпусів. Для визначення реакції бронекорпусів на дію реактивних зусиль віддачі застосовано метод скінченних елементів. Синтез конструктивних рішень здійснюється на основі методу узагальненого параметричного підходу. Результати досліджень проілюстровані на прикладі бронекорпусів бронетранспортерів та інших бойових машин.*

**Ключові слова:** військові гусеничні і колісні машини, бронекорпус, напружено-деформований стан, тактико-технічні характеристики, режим бойового застосування

### Вступ

Потреби Збройних Сил України у нових легкоброньованих військових гусеничних і колісних машинах (ВГКМ) з високими тактико-технічними характеристиками (ТТХ) можуть бути задоволені на етапі проектно-технологічних робіт шляхом обґрунтування раціональних параметрів їхніх бронекорпусів. У свою чергу це спонукає проводити багатоваріантні розрахунки напружено-деформованого стану (НДС) бронекорпусів, які є основним інтегруючим елементом легкоброньованих машин (ЛБМ), що замикає на собі основні силові потоки при дії різноманітних зусиль у процесі бойового застосування. Одним із найбільш вагомих є дія реактивних зусиль віддачі при здійсненні пострілів із бойових модулів (БМ), оснащених швидкострільними артилерійськими системами. Ці зусилля досягають десятків кН, а частота залежить від темпу стрільби, досягаючи десятків Гц. При цьому однією із тенденцій є використання артилерійських систем зі змінним темпом стрільби. У зв'язку із цим бронекорпус, який підпадає під дію серії ударно-імпульсних зусиль різної частоти та є тонкостінною зварною конструкцією із досить густим спектром частот власних коливань, може вступати у резонансні режими. Важливо, що характер цих зусиль (серія імпульсів сили без переміни знака), крім класичного резонансу, зумовлює у системі також ударні резонанси [1]. Таким чином, проблема резонансу стає у цьому випадку ще більш складною. Тому параметри бронекорпусів слід обирати із умови відлаштування від резонансу, у т.ч. ударного. Крім того слід визначати НДС бронекорпусів і виходити із умови міцності їх елементів, враховуючи

міцність бронепанелей, елементів внутрішньої силової структури і зварних швів.

Така складна задача потребує для свого розв'язання розвитку як аналітичних і числових, так і експериментальних методів досліджень. Часткове розв'язання цієї комплексної проблеми міститься у роботах: Васильєва А.Ю., Пелешка Є.В., Гриценка Г.Д., Ткачука М.А., Шаталова О.Є. [2-9]. Проте в цих роботах не враховані суттєві чинники (зокрема, не враховуються повною мірою технологічні особливості зварювальних робіт, можливість ударних резонансів, не завершено створення методології експериментального обґрунтування параметрів скінченноелементних моделей, які забезпечують адекватне і точне моделювання динамічного НДС в бронекорпусах тощо). У зв'язку з цим виникає актуальна і важлива задача удосконалення методів моделювання реакції бронекорпусів на дію ударно-імпульсних навантажень з метою обґрунтування проектно-технологічних рішень, що забезпечують задані ТТХ нових легкоброньованих машин. Постановка та розв'язання цієї задачі описані у роботі.

### Постановка задачі

Метою роботи є розробка методів забезпечення на етапі проектування і технологічної підготовки заданих ТТХ рухомості, точності стрільби, захищеності легкоброньованих машин шляхом обґрунтування масових, міцнісних і жорсткісних характеристик їх корпусів при підвищених навантаженнях від зусиль віддачі в процесі стрільби за рахунок науково обґрунтованого вибору конструктивних параметрів із застосуванням створюваного спеціалізованого

програмно-модельного комплексу, інтегрованого в сучасні САД/САМ/САЕ-системи. При цьому основним досліджуваним явищем є динамічні процеси напружено-деформованого стану корпусів ЛБМ при здійсненні пострілів із скорострільних артилерійських установок, якими оснащуються бойові модулі цих машин, а об'єктом удосконалення – методи та моделі для синтезу конструктивних параметрів бронекорпусів, що забезпечують задані складові ТТХ захищеності, рухливості, точності стрільби проєктованих і модернізованих ЛБМ.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати наступні задачі:

1) удосконалити математичні моделі та числові алгоритми для моделювання НДС бронекорпусів при дії зусиль віддачі при стрільбі, а також підходи до синтезу проєктно-технологічних параметрів корпусів цих машин;

2) розробити спеціалізований програмно-модельний комплекс (СМПК) для розв'язання сформульованих задач аналізу і синтезу;

3) удосконалити методологію розрахунково-експериментальної ідентифікації параметрів числових моделей бронекорпусів;

4) провести комплекс числових та експериментальних досліджень напружено-деформованого стану бронекорпусів ЛБМ, їх макетів і фрагментів.

### Методика досліджень

У цілому для розв'язання комплексу поставлених задач дослідження напружено-деформованого стану корпусних елементів ЛБМ залучається постановка на основі просторової задачі теорії пружності у поєднанні з узагальненим параметричним підходом до опису досліджуваних конструкцій; залучається числовий метод скінченних елементів (МСЕ) для аналізу НДС корпусів колісних і гусеничних ЛБМ на основі розробленого спеціалізованого програмно-модельного комплексу і спеціалізованих інтегрованих параметричних скінченно-елементних моделей (СЕМ) їхніх корпусів; використовуються теорія, методи і алгоритми побудови параметризованих просторових моделей досліджуваних бронекорпусів; використовуються методи вимірювань віброприскорень інерційними датчиками для експериментального визначення власних форм, частот і характеру перехідних процесів при імпульсному навантаженні бронекорпусу.

Залучення перелічених методів досліджень здійснено на основі аналізу стану питання моделювання фізико-механічних процесів у бронекорпусах з метою обґрунтування конструктивних параметрів, що забезпечують задані ТТХ легкоброньованих машин.

Також установлено, що при розробці варіантів модернізації легких за масою бойових машин (БТР-60, БТР-70, БТР-80, МТ-ЛБ, БМП-2), а також при проєктуванні, наприклад, БТР-3Е, БТР-70УМ, БТР-80УМ, БТР-4, БТР-94 і оснащенні їх при цьому новими БМ

виникає важлива задача забезпечення міцності і жорсткості легкоброньованих корпусів. Оскільки корпусні елементи даних машин в процесі бойового використання піддаються дії комплексу динамічних і імпульсних дій, то початкова задача призводить до необхідності дослідження НДС просторових пластинчасто-стержневих конструкцій при різних варіантах конструктивного посилення, з різними варіантами озброєння і силового агрегату, а також при варіюванні режимів бойового застосування. При цьому слід вирішувати проблему створення нової технології вирішення проєктних задач з великою кількістю різних типів конструкцій.

На основі цього аналізу запропонована загальна постановка задачі, параметрична математична модель НДС досліджуваного класу конструкцій і основні підходи до розв'язання задач, що виникають. Слідуючи роботі [10], розглянемо напружено-деформований стан корпусу колісної або гусеничної бойової машини, що описується системою рівнянь

$$L(u, p, r, t) = f(r, t), \quad (r \in \Omega, t \in [t_n, t_k]), \quad (1)$$

де  $L$  – оператор початково-крайової задачі,  $u = u(r, t)$  – вектор переміщень точок конструкції, віднесений до просторових координат  $r$  і часової координати  $t$ ,  $f(r, t)$  – масив навантажень на досліджувану конструкцію з параметрами  $p$ .

Специфіка досліджуваної задачі полягає в тому, що масив  $p$  є, по-перше, варіюваним (як за складом, так і за значеннями); по-друге, він частково є шуканим на основі деяких критеріїв; по-третє, як параметри тут розглядаються узагальнені параметри. Таким чином, для деякої точки параметричного простору  $p \in V$  внаслідок розв'язання задачі (1) отримуємо

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

Тоді можна визначити деякі характеристики досліджуваного процесу:

$$g_i = g_i(u), i = 1, \dots, N_g, \quad (3)$$

де  $N_g$  – кількість досліджуваних характеристик.

Такими характеристиками можуть бути максимальне напруження, переміщення, прискорення, кути повороту в конструкції в цілому або в її частині протягом заданого часу, маса, об'єм або інші інтегральні характеристики. Оскільки відповідно до (2, 3) характеристики  $g_i$  є функціями параметрів  $p$ , то формально можна поставити наступні задачі:

– визначення залежностей

$$g_i = g_i(p), p_s \in [p_s^n, p_s^k], s = 1, \dots, N_p, \quad (4)$$

де  $[p_s^n, p_s^k]$  – інтервал варіювання компонентів  $N_p$  параметрів  $p_s$ ;

– визначення чутливості досліджуваних характеристик  $g_i$  до зміни варійованих параметрів

$$\lambda_{jq} = \partial g_j / \partial p_q; \quad (5)$$

– визначення оптимальної в деякому розумінні конструкції:

$$p^* = \arg \min G(p), p \in S, \quad (6)$$

$$S = \{p : S_k(p) \geq 0, k = 1, \dots, N_s\}, \quad (7)$$

де  $G$  – деяка цільова функція (один з параметрів  $g_i$  або їх комбінація),  $S_k$  – обмеження, що накладається на  $N_s$  варійованих параметрів.

Для розв'язання поставленого комплексу задач необхідно вичленити два принципові моменти. Перший момент стосується задачі (1): її розв'язання для досліджуваної конструкції (корпус бронетранспортера, бойової машини, тягача і так далі) саме по собі є достатньо складною процедурою, оскільки потрібне залучення числових методів для аналізу просторово-часових розподілів переміщень, деформацій і напружень точок корпусів. Другий принциповий момент: як показує практика *реального* проектування, розв'язок задач (5, 6) втрачає свою цінність через мінливість конструктивних схем, варіантів модернізації, економічних вимог, технологічних і часових обмежень і так далі уже в ході проектування. Формально це призводить при розв'язанні задачі оптимального проектування до зміни цільової функції  $G(p)$ , обмежень  $S(p)$ , самого складу параметричного простору  $V$ . Природно, що оптимальний розв'язок  $p^*$  в даному випадку змінюється, причому всі обчислювальні і часові витрати на його отримання просто зникають. Таким чином, в ситуації, що створилася, традиційні підходи до розв'язання поставленої задачі неефективні. У зв'язку з цим потрібна розробка нових підходів, використання потужних сучасних методів числового моделювання і потужного програмного забезпечення.

Розглянемо методи розв'язання задач з урахуванням відмічених вище особливостей. Для числового визначення НДС корпусів ЛБМ найбільш доцільне застосування методу скінченних елементів (МСЕ). При цьому початково-крайова задача після скінченно-елементної дискретизації набирає вигляду:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = \varphi, \quad (8)$$

де  $M, C, K, q, \varphi$  – матриці мас, демпфування і жорсткості досліджуваної конструкції, масив шуканих вузлових параметрів і вузлових навантажень.

Для розв'язання рівняння (8) пропонується використовувати покроковий метод Ньюмарка. В результаті числового розв'язування визначається шуканий

розподіл  $u = u(t)$ . Враховуючи, що матриці  $M, C, K$  є явними або неявними функціями параметрів  $p$ , то отримуваний числовим методом розв'язок є неявною функцією даних параметрів:  $u = u(p)$ . Відповідно параметричні залежності можуть у даному випадку визначатися за принципом «чорного ящика»: на вході – набір параметрів  $p$ , на виході – параметри стану  $u$  (після процесу інтерполяції –  $u(r, t)$ ). Принципова схема організації досліджень може бути реорганізована у вигляді комплексу, побудованого за модульним принципом (рис. 1).

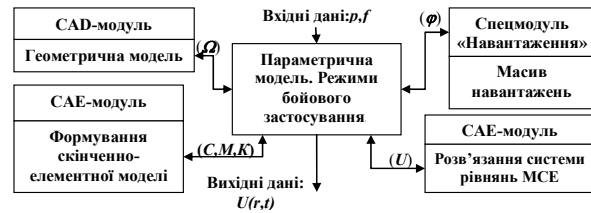


Рис. 1. Етапи дослідження НДС корпусів ЛБМ із застосуванням спеціалізованого інтегрованого програмно-модельного комплексу

Запропонований метод дослідження дає можливість на основі параметричного підходу *автоматизувати* процес розв'язання задач аналізу, що в свою чергу створює передумови для організації в автоматизованому режимі процедур спрямованого пошуку раціональних розв'язків.

*Методи розв'язання задач синтезу у розширеній постановці.* Суть запропонованого у даній роботі та у роботі [10] підходу полягає в тому, що в просторі  $V$  визначається покриваюча множина  $\bar{S} \supset S$ , і для її дискретного розбиття

$$D_{\bar{S}} = \{p_{ij} = p_{in} + (p_{ik} - p_{in}) / (\bar{N}_i - 1), i = 1, \dots, N_p, j = 1, \dots, \bar{N}_i\},$$

де  $\bar{N}_i$  – кількість точок дискретизації інтервалу зміни параметра  $p_i$ , розв'язується задача визначення

$$u_{ij} = u_{ij}(p_{ij}), g_{sij} = g_{sij}(p_{ij}). \quad (9)$$

Оскільки при зміні  $G, V, S, p$  завжди є можливість за наявною базою даних (9) визначити з наперед заданою точністю  $\Delta p_i = (p_{ik} - p_{in}) / (\bar{N}_i - 1)$  оптимальний розв'язок  $p^{**} \approx p^*$ , то або цей розв'язок можна прийняти як шуканий, або вибрати його як початкове наближення для визначення  $p^*$ . Основною відмінністю від постановки [10] є те, що у складі параметрів  $p_i$  є «технологічний» пласт, тобто ті  $p_i$ , що включають технологію виготовлення бронекорпусу.

Безперечною перевагою запропонованого підходу є величезне заощадження часу на розв'язання задач оптимального проектування при варійованих критеріях. Очевидним його недоліком є необхідність

«великих початкових капітальних вкладень» у вигляді багатоваріантних розв'язань задач аналізу при створенні бази даних (9). Запропонована стратегія переміщає основні витрати обчислювальних зусиль на початкові етапи проектних робіт. Саме на цих етапах розробникам особливо необхідні дані результати.

Для визначення *інтегральних характеристик* НДС корпусів транспортних засобів спеціального призначення пропонується використовувати узагальнений параметричний підхід. Його суть в тому, що як узагальнені параметри приймаються не лише геометричні параметри, величини сил, фізико-механічні характеристики (тобто параметри в традиційному розумінні), але і види конструкторських рішень, характерні особливості розрахункових схем, використовуваний способи дискретизації задач аналізу. Для побудови параметричних інтегрованих моделей і розрахунків НДС пропонується використовувати універсальну систему високого рівня Pro/ENGINEER/ Pro/Mechanica. Для взаємодії між різними системами, варіювання параметрів і задавання навантажень пропонується використовувати спеціалізовану параметричну інтегровану модель (СПІМ), що є основою для організації досліджень в універсальних системах (рис. 2).



Рис. 2. Схема спеціалізованої інтегрованої системи автоматизованого аналізу і синтезу

Як силову дію при розрахунку НДС корпусів пропонується використовувати екстремальні режими експлуатації транспортних засобів спеціального призначення при веденні стрільби чергою із гармат в різних напрямках.

Для оцінки НДС корпусу як характерні жорсткісні параметри на основі досвіду пропонується взяти переміщення, кути повороту і напруження в характерних точках, наприклад, розташованих на підбаштовому листі в області погонного кільця бронетранспортера БТР-80 (або іншої машини).

Після отримання значень жорсткісних та міцнісних параметрів знаходяться відносні піддатливості конструкції (інтегральні характеристики)

$$\begin{aligned} (w = c_w \cdot P, \varphi_x = c_{\varphi_x} \cdot P, \varphi_y = c_{\varphi_y} \cdot P) &\Rightarrow \\ \Rightarrow (c_w = w/P, c_{\varphi_x} = \varphi_x/P, c_{\varphi_y} = \varphi_y/P) &\quad (10) \end{aligned}$$

де  $w, \varphi_x, \varphi_y$  – кінематичні параметри, що визначають відхилення осі цапф гармати від заданого напрямку при стрільбі;  $P$  – навантаження;  $c_w, c_{\varphi_x}, c_{\varphi_y}$  – податливості конструкції, що утворюють деякий масив (поповнюваний і змінний).

Оскільки бронекорпус розглядається в процесі здійснення пострілів з БМ, оснащеного скорострільними артилерійськими системами, то зі всього комплексу ТТХ бойової машини можна виділити ті, які визначаються параметрами корпусу і ТТХ бойового модуля. Відповідно до всієї різноманітності параметрів виділяється певна підмножина (рис 3). Зокрема, на рис. 4 схематично зображений взаємозв'язок НДС корпусів ЛБМ при здійсненні пострілів з БМ з їх ТТХ. Природно, що реальна картина взаємозв'язків складніша і за складом характеристик, і за структурою їх відношень. Проте загалом запропоновану схему можна в першому наближенні прийняти як початкову.

Таким чином, із всього комплексу параметрів узагальненого параметричного простору  $V$ , що ідентифікує досліджуваний об'єкт, виходячи із запропонованої загальної схеми і зважаючи на специфіку конкретної проектованої ЛБМ, можна встановити вузький клас критерійних, варійованих, обмежувальних параметрів. Найбільший вплив на цей вибір здійснюють специфіка конструкції корпусу і ТТХ комплексу озброєння бойового модуля.



Рис. 3. Тактико-технічні характеристики бойової машини в системі формування оціночних критеріїв конструкції корпусу легкоброньованої машини і характеристик бойового модуля

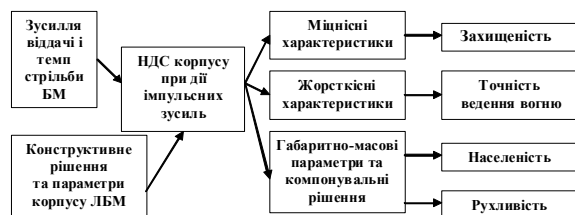


Рис. 4. Взаємозв'язок характеристик напружено-деформованого стану корпусів ЛБМ при здійсненні пострілів з БМ з їх тактико-технічними характеристиками

Розглянемо як приклад корпус БТР-80. При здійсненні пострілів до найбільших деформацій і напружень схильна верхня його частина, зокрема підбаштовий лист. Відповідно до цього як вихідну множину *контрольованих (керованих)* параметрів можна запропонувати (множина  $L$ ): максимальне напруження в підбаштовому листі  $\sigma_{max}$ ; максимальні прогини підбаштового листа  $w_{max}$ ; максимальні кути відхилення осі цапф скорострільної гармати від

номінального напрямку  $\varphi_{\max}$  і так далі. Як варійовані режими бойового застосування можна виділити (множина  $Var$ ): кути наведення гармати; зусилля віддачі при стрільбі; темп стрільби і так далі. Як узагальнені *конструктивні* параметри можна вибрати (множина  $Constr$ ): схему посилювання підбаштового листа; товщину і кути нахилу бронелістів корпусу; масово-інерційні і габаритні розміри БМ. Як *технологічні* можна визначити схему розкрою бронепанелей, типи зварних швів, режими зварювання тощо. *Обмежувальними* чинниками можна призначити (множина  $K$ ): допустимі напруження для матеріалу корпусу (бронепанелі, внутрішня силова структура, зварні шви); граничний кут допустимого відхилення осі ствола від номінала виходячи з критерію точності стрільби; допустимі максимальні прогини підбаштового листа і так далі (рис. 5).

У процесі досліджень запропонований як інструмент програмно-модельний комплекс дає можливість оперувати не лише із статично заданою («замороженою») множиною  $I, K, Constr, Var$ , але і з динамічно змінною («плинною»). Цим самим забезпечується відхід від традиційної, жорстко регламентованої і лінійної за схемою виконання процедури проектування та технологічної підготовки виробництва, і перехід до гнучкої схеми з урахуванням результатів числового моделювання НДС корпусів безпосередньо в режимі реального часу.

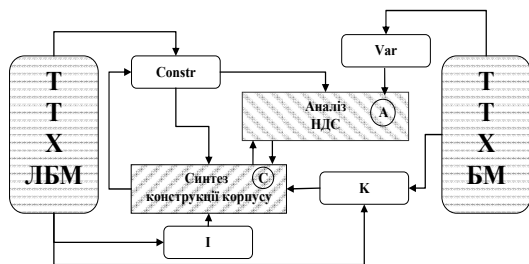


Рис. 5. Загальна схема розв'язання задачі вибору конструктивних параметрів корпусу ЛБМ при аналізі НДС від дії зусиль віддачі при стрільбі із скорострільних гармат

### Числова реалізація підходів і моделей

У роботі запропоновано структуру та розроблено спеціалізований інтегрований програмно-модельний комплекс для моделювання реакції корпусу на дію зусиль стрільби. На рис. 6 пропонується нова, альтернативна запропонованій раніше, технологія досліджень, орієнтована перш за все на комплексне дослідження *сімейств* об'єктів. Її принципова відмінність від традиційної схеми полягає в тому, що основний упор робиться на створення достатньо адаптованих для використання в універсальних CAD/CAM/CAE-системах *інтегрованих* в ці системи параметричних моделей.

При побудові бази даних про геометрію застосовується структурний підхід. В основі «класифікації»

корпусів лежить тип. Так, для вітчизняних машин як базові можна вибрати існуючі типи машин, такі як: МТ-ЛБ, БМП-1, БМП-3, БТР-80, БРДМ та інші. Подальший поділ геометричних моделей здійснюється за структурними рішеннями, оскільки існує багато структурних виконань модифікації тієї або іншої ЛБМ.

### Числові дослідження НДС бронекорпусів ЛБМ

У роботі ставиться задача створення бази даних моделей корпусів ЛБМ і проведення комплексу їх досліджень. На сьогоднішній день не існує скільки-небудь універсального алгоритму формалізації опису проєктованих конструкцій. У процесі проєктування і бойової машини в цілому, і бойового модуля, і бронекорпусу враховується складна множина критеріїв, обмежень, вимог, а також використовується досвід проєктування аналогічних конструкцій. У той же час можна виділити деякі узагальнені ознаки, що дозволяють проводити ідентифікацію або вже створеного об'єкта, або проєктованого. Нехай, наприклад,  $\vec{\alpha} = \{\alpha_1 \dots \alpha_N\}$  – деякий вектор таких узагальнених класифікуючих ознак. Ввівши у розгляд узагальнений класифікаційний простір  $A$ , побудований на компонентах  $\alpha_i$ , що приймаються за узагальнені осі, можна трактувати об'єкт (ЛБМ), що ідентифікується, як точку даного простору  $M = M(\alpha_1 \dots \alpha_N)$ . Тоді можна встановити наступну формалізовану відповідність:

$$M(\alpha_1 \dots \alpha_N) \longrightarrow P(M, \gamma_1 \dots \gamma_N), \quad (11)$$

де  $P$  – узагальнений вектор-функція, що задає деякий опис конструкції бойової машини через узагальнені параметри  $\gamma_1 \dots \gamma_M$ , а також технологічні особливості виготовлення бронекорпусів.

У свою чергу ТТХ цього об'єкта можуть бути представлені у вигляді

$$T = T(M, P, H), \quad (12)$$

де  $T$  – узагальнений вектор тактико-технічних характеристик;  $H$  – характеристики фізико-механічних процесів в корпусі.

Задача (12) є задачею зв'язку ТТХ з параметрами  $H$ , які в свою чергу визначаються в ході розв'язання різного типу задач аналізу (1).

Природно, що всі розглянуті параметри, характеристики є багатовимірними, а отримувані результати досліджень фізико-механічних процесів утворюють розгалужену структуру даних. При проведенні досліджень «в ручному режимі» одного або декількох об'єктів в принципі можливо відстежувати залежності  $P$  і  $T$  як в «прямому» напрямі  $P \rightarrow u \rightarrow H \rightarrow T$ , так і в «зворотному»  $T \rightarrow H \rightarrow u \rightarrow P$ . Першу задачу можна визначити як задачу узагальненого параметричного аналізу, другу – узагальненого параметричного синтезу.

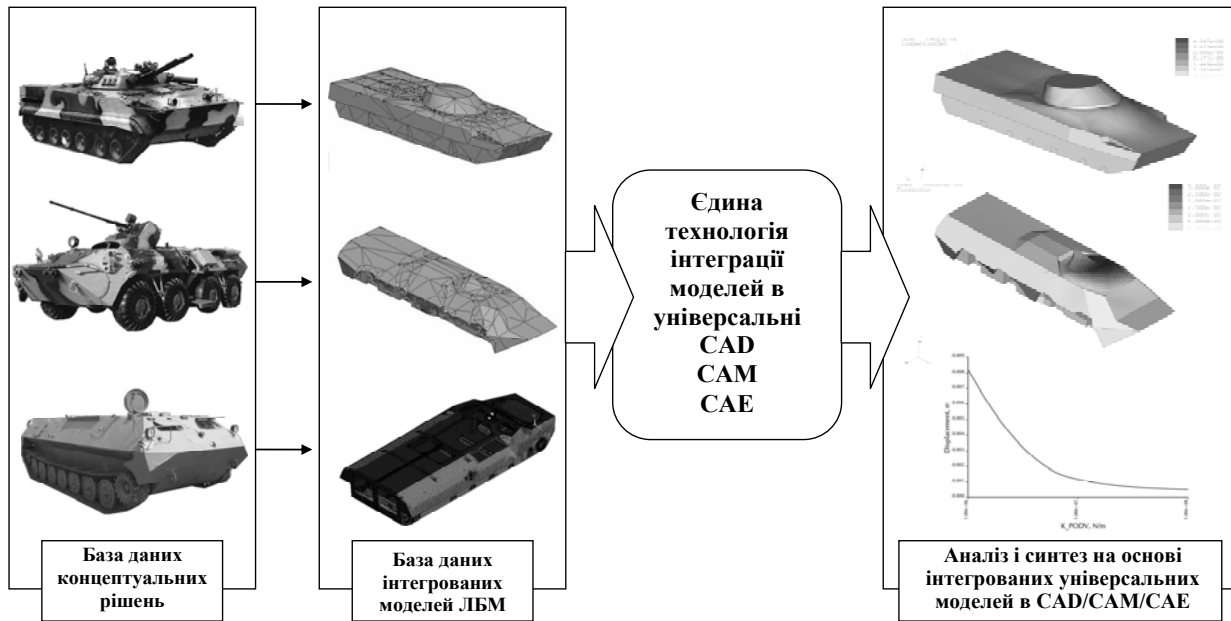


Рис. 6. Запропонована технологія досліджень з розробкою параметричних моделей, інтегрованих в універсальні CAD/CAM/CAE

Зокрема, розроблене в системі Pro/ENGINEER, SolidWorks сімейство моделей ЛБМ: БТР-70, БТР-80, БТР-94, БТР-3Е, БМП-1, БМП-3, БРДМ, МТ-ЛБ тощо.

Так, для геометричної та скінченно-елементної моделей корпусу БТР-80 в системі Pro/Mechanica був проведений розрахунок НДС (результати – на рис. 7).

У системі автоматизованого моделювання Pro/Mechanica для моделі корпусу БТР-80 були отримані також власні частоти. Також для моделі корпусу був проведений розрахунок НДС корпусу при дії динамічного навантаження. Була промодельована серія пострілів по курсу з артилерійської системи.

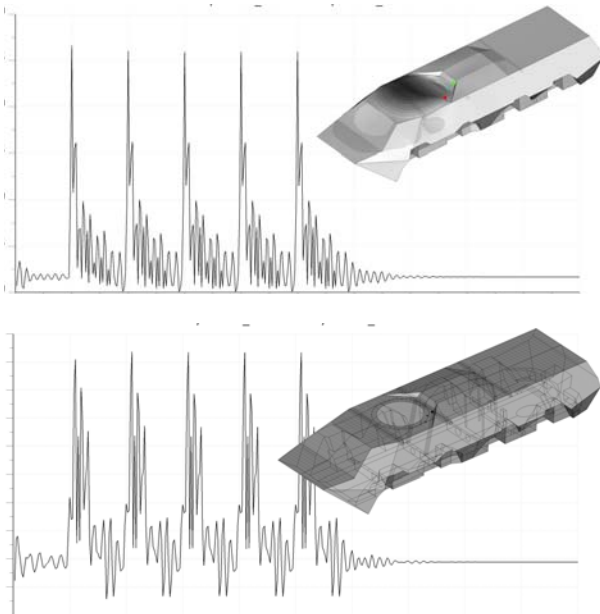


Рис. 7. Тенденції часового розподілу повних переміщень і напружень по фон Мізесу у бронекорпусі БТР-80 при пострілах (зусилля віддачі і темп стрільби відповідають ТТХ БМ [www.morozov.com.ua])

Максимальне напруження у верхньому листі корпусу відповідає проведеним раніше експериментам і розрахункам. Таким чином, розроблений програмно-моделний комплекс розрахунку НДС бронекорпусу довів свою працездатність. Комплекс зручний у використанні та простий в освоєнні.

За аналогією були побудовані моделі корпусів броньованої машини БМП-3, БРДМ, здійснено розрахунок їх НДС при здійсненні серії пострілів (рис. 8, 9).

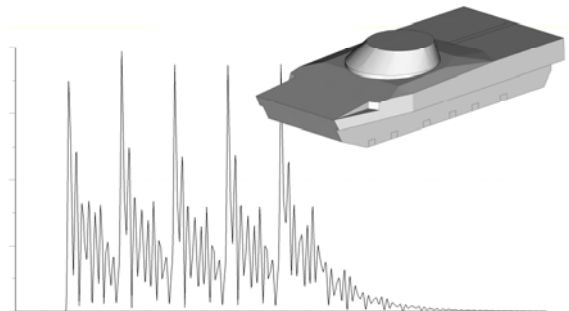


Рис. 8. Повні переміщення в точках підбаштового листа БМП-3 при динамічному навантаженні (серія пострілів)

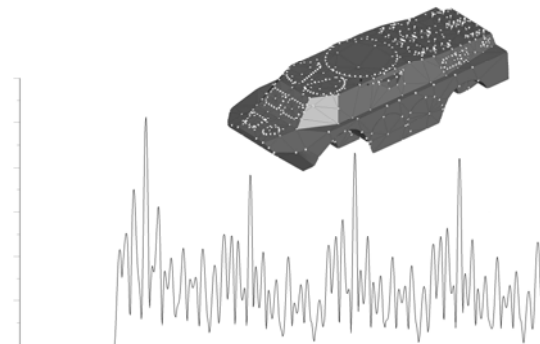


Рис. 9. Напруження по фон Мізесу в точках підбаштового листа БРДМ при динамічному навантаженні (серія пострілів)

Проведений також розрахунок НДС корпусу БТР-80 при варіюванні параметрів: товщина пропонованого «поясу» підсилення в районі БМ, товщина підбаштового листа, жорсткість підвіски, напрямок стрільби. Графік залежності максимальних переміщень від товщини «поясу» підсилення показаний на рис. 10 (вірніше, тенденція їх зміни).

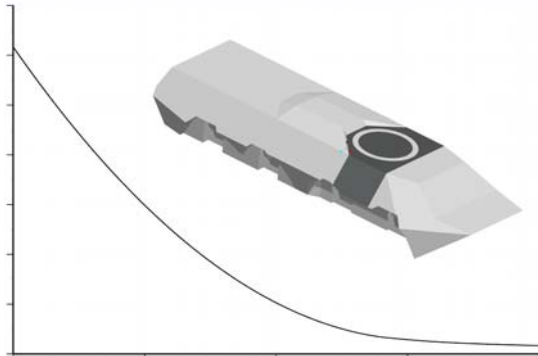


Рис. 10. Залежності максимальних переміщень корпусу БТР-80 від товщини «поясу» – кругового посилення в районі башти

Також були проведені розрахунки з варіюванням напрямку стрільби у всьому діапазоні бойового застосування гармати 2А72.

Проведений комплекс досліджень є масивом даних, які можуть бути покладені в основу при розробці рекомендацій з проектування і модернізації нових та існуючих конструкцій ЛБМ. На цій основі отримані характерні риси розв'язку задачі про визначення конструктивних параметрів корпусів, що забезпечують заданий рівень ТТХ бойових машин.

### Експериментальні дослідження бронекорпусів ЛБМ

Проведено описані експериментальні дослідження бронекорпусів ЛБМ. Запропонована комбінована схема забезпечення точності розрахункових моделей, що поєднує розрахунково-розрахункове і розрахунково-експериментальне обґрунтування їх параметрів. На рис. 11 представлена загальна схема цього процесу. Одержані власні частоти, отримані в різних розрахункових системах. Слід відзначити, що на відміну від досліджень, описаних у статті [10], у даному випадку комплекс досліджень розповсюджується також і на натурні зразки бронекорпусу ЛБМ, а не тільки на макетні моделі.

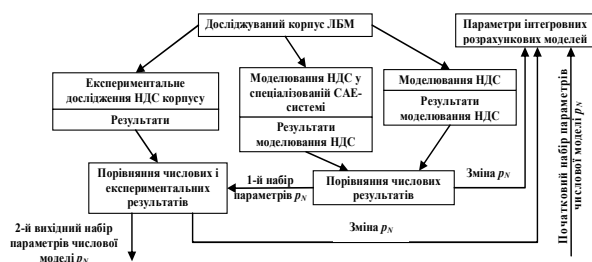


Рис. 11. Процес комбінованого уточнення параметрів числової моделі, що забезпечують необхідну точність моделювання НДС корпусу легкоброньованої машини

Комплексний аналіз результатів показує, що отримане максимальне напруження в системах ANSYS і Pro/Mechanica відрізняється не більше ніж на 2 %, переміщення – 1 %, власні частоти – 3 %. Характер часових і просторових розподілів переміщень і напруження в корпусі, отриманий у різних системах, ідентичний. Початкова неоптимізована СЕМ давала грубіше наближення: за напруженням – 8-10 %, за переміщеннями – 5-6 %, за власними частотами – 10 %.

При цьому також встановлено, що властивості матеріалу зварних швів та зон їх розташування змінюють спектри власних частот коливань незначною мірою – до 2-3%. Отже, у межах пружної поведінки матеріалу бронекорпус можна моделювати практично гомогенним матеріалом із фізико-механічними характеристиками матеріалу бронепанелей. Проте при оцінці небезпечності того чи іншого НДС відмінність механічних властивостей обов'язково слід приймати до уваги.

Таким чином, отримані порогові значення параметрів інтегрованої моделі корпусу БТР-80 (максимальна ступінь інтерполюючого полінома  $P - 9$ , розмір елемента  $\Delta - 2,5 \cdot 10^{-3}$  м). В процесі проведення числових досліджень використовувалися набагато жорсткіші умови для цих параметрів. Це дозволяє стверджувати, що результуюча похибка – на рівні 5%.

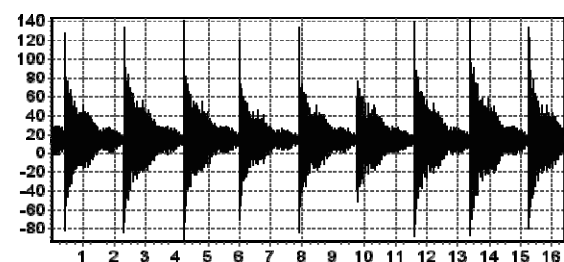
На додаток до проведених розрахунково-розрахункових досліджень корпусу БТР-80 (БТР-94) був проведений додатковий комплекс досліджень корпусів БМП-3 і МТ-ЛБ за запропонованою схемою. Порівняльна відмінність не перевищує 10%, що є прийнятним результатом для розроблених експрес-моделей.

Для підтвердження достовірності числових моделей був проведений комплекс розрахунково-експериментальних досліджень за допомогою створеного програмно-модельного комплексу. Об'єктом досліджень виступив макет корпусу БТР-94. Був проведений експеримент із знаходження власних частот моделі корпусу БТР, в ході якого отримані таблиці переміщень, швидкостей і прискорень в часі. Графічні результати експерименту проілюстровані на рис. 12. Були також проведені розрахунки власних частот конструкції і реакції конструкції на імпульсні дії. Порівнювані частоти, отримані числовим шляхом і при проведенні експерименту, наведені в таблиці.

Таблиця

#### Власні частоти досліджуваної конструкції, Гц

Експериментально отримані частоти	18-20	–	190-210	–	420-440
Чисельно отримані частоти	–	79	237	266	418



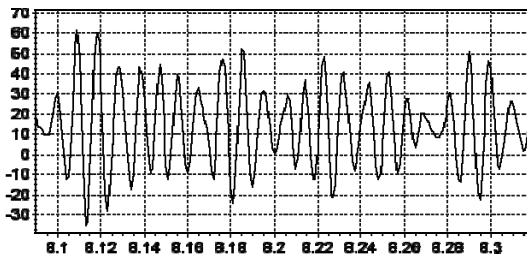


Рис. 12. Графіки розподілу в часі прискорень в точці підбаштового листа (експеримент)

Отримані результати служать базою для встановлення точності результатів і достовірності параметрів інтегрованих СЕМ досліджених в роботі корпусів. Аналіз показав, що і за характером, і за величинами отримувані розподіли відповідають один одному, причому похибка знаходиться в межах 6%.

Як додаткове дослідження верифікації було проведено розрахунково-експериментальне визначення власних частот макета фрагмента корпусу БТР-94 на спеціальному лабораторному стенді, з одного боку, і чисельно – з іншого. На рис. 13-14 показані зафіксовані експериментально і отримані чисельно власні форми і спектри власних коливань моделей верхніх частин корпусів (МВЧК) БТР-80.

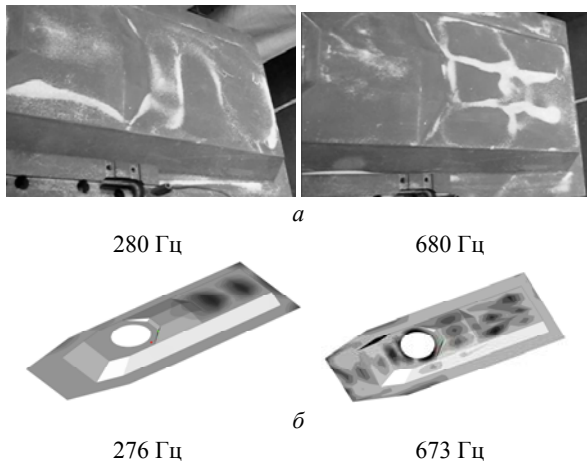


Рис. 13. Деякі форми коливань моделі верхньої частини корпусу БТР-80:

а – експеримент; б – розрахунок

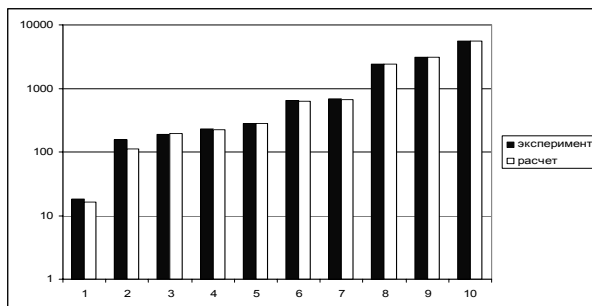


Рис. 14. Частоти МВЧК БТР-80, отримані експериментальним і числовим шляхом

Проведений комплекс розрахунково-розрахункових і розрахунково-експериментальних досліджень корпусів ЛБМ підтвердив: адекватність опису

розробленими фізичними, геометричними, математичними і чисельними моделями корпусів легкоброньованих машин досліджуваних фізико-механічних процесів при здійсненні пострілів; задовільну якісну і кількісну відповідність числових і експериментальних результатів моделювання НДС корпусів легкоброньованих машин; прийнятність використання інтегрованих моделей для моделювання реакції корпусу на бойове застосування скорострільних артилерійських систем з похибкою, що припускається при цьому, не вище 8-10%.

Виконані розробки і дослідження дали змогу створити в результаті спеціалізований інтегрований програмно-модельний комплекс, який з успіхом застосовувався для обґрунтування проектно-технологічних рішень різних ЛБМ, зокрема БТР-94, БТР-70УМ, БТР-80УМ, БТР-3Е. Так, невідосконалені корпуси бронетранспортерів не забезпечували необхідного рівня захищеності, оскільки вже від багатоциклової дії зусиль віддачі можливе руйнування конструкції, зокрема підбаштового листа. У зв'язку з цим запропонований варіант підсилення горизонтальних швелерів. У результаті напруження знижені до рівня допустимих в бронелистах, у зварних швах і в швелерах посилення. Це забезпечило бронезахищеність корпусів бронетранспортерів зі встановленими новими бойовими модулями БАУ-23х2, «Шторм», «Гром» і подібних до них з точки зору цілісності і довговічності корпусу як основного захисного елемента конструкції.

Крім того при оснащенні модернізованих та нових бронетранспортерів БТР-70УМ, БТР-80УМ, БТР-3Е новими бойовими модулями з гарматним озброєнням виникає проблема забезпечення точності стрільби, оскільки визначальним чинником при проведенні темпової стрільби є кутові переміщення гармати відносно осі цапф. Наприклад, при проведенні одиночного пострілу має місце закид гармати відносно осі цапф на допустимий кут. Тривалість процесу складає кілька мілісекунд з подальшими затухаючими коливаннями. Під час стрільби чергами відбувається розгойдування гармати, і на деякому пострілі величина закиду складає вже недопустимий кут, тобто на момент проведення чергового пострілу гармата не знаходиться у початковому положенні, що і визначає розсіювання при проведенні темпової стрільби. Для забезпечення ведення темпової стрільби при проведенні ударів із сучасних артилерійських систем необхідно проводити конструктивну доробку, спрямовану на демпфування кутових коливань гармати після проведення пострілу, або знизити темп стрільби (або застосовувати системи стабілізації озброєння).

При стрільбі із гармат калібру 23, 30 мм виходить багаторазове перевищення відхилення осі цапф від допустимого саме за рахунок деформування елементів бронекорпусу. У зв'язку з цим запропоновано поєднати заходи щодо зміцнення корпусу із



заходами щодо його посилювання. При цьому посилення горизонтальних швелерів дає значно більший ефект щодо підвищення точності стрільби, ніж, наприклад, дворазове потовщення підбаштового листа. Внаслідок цього коливання осі цапф від деформації корпусу зменшилися до прийнятного рівня за найнесприятливіших умов стрільби (удари на борт), а отриманий час процесу затухання коливань дає можливість вести прицільну стрільбу чергою.

Окрім конструктивних важливими є й технологічні рішення. Вони також приймаються із умов сприяння підвищенню ТТХ нових бойових машин. Так, визначення розподілу напружень у бронекорпусі спонукало визначити таку схему розкрою бронепанелей, щоб зварні з'єднання потрапили у зону низьких напружень. Те саме стосується і досліджень власних коливань. Із міркувань зниження динамічного навантаження зварні з'єднання переміщуються із пучностей у вузлові зони власних форм коливань бронекорпусу. Також із міркувань забезпечення міцності та жорсткості обирається тип зварного шва (з підготовкою кромок та повним проплавленням).

На додаток до одержаних раніше результатів також встановлено наступну особливість впливу технологічних параметрів на характеристики бронекорпусів: незначна їх зміна (тобто, наприклад, схеми розташування зварних швів) несуттєво впливає на прогини і напруження у бронепанелях та у силовій структурі, проте різко впливає на НДС самих зварних з'єднань. Отже, у процесі досліджень можна влаштувати «малий» цикл синтезу, уточнюючи технологічні параметри на проміжних етапах ізольовано від інших. Разом з тим на кожному етапі «великого» циклу синтезу урахування цього взаємовпливу потрібно відновлювати.

Таким чином, проведений комплекс заходів дав можливість в процесі проектування та технологічної підготовки виробництва забезпечити необхідні ТТХ досліджуваних бронетранспортерів та інших легкоброньованих машин.

### Випробування натурних зразків бронекорпусів

Розроблені на основі досліджень НДС при динамічному ударно-імпульсному навантаженні рекомендації з проектно-технологічних рішень були реалізовані, зокрема, при проектуванні, технологічній підготовці та виробництві бронекорпусів БТР-3Е. Природно, що при цьому виникає необхідність визначення ступеня достовірності та коректності даних рекомендацій. Найкращим чином це можна здійснити шляхом випробувань натурних зразків бронекорпусів. Ці дослідження і були проведені в ПАО «Азовмаш» [www.azovmash.com].

На рис. 15 представлено схему розташування датчиків-акселерометрів на бронекорпусі БТР-3Е, а

на рис. 16 – сам бронекорпус, підготовлений до випробувань. Для фіксації прискорень, швидкостей, переміщень та частот коливань елементів досліджуваного бронекорпусу застосовано спеціальний вібровимірвальний комплекс апаратури з реєстрацією процесу на електронний носій інформації. Детальний аналіз результатів цих досліджень буде описано у подальших публікаціях, проте уже із тестових розподілів (рис. 17) можна зробити висновки про високий ступінь обґрунтованості здійснених проектно-технологічних заходів щодо забезпечення ТТХ БТР-3Е в частині, яка напряму залежить від властивостей бронекорпусу. По-перше, прогнозовані (розрахунковим шляхом) спектри власних частот коливань бронекорпусу з високою точністю (похибка – не вище 8-10%) відповідають експериментально зафіксованим значенням. По-друге, характер затухання коливального процесу, зафіксованого в експерименті, збігається з даними комп'ютерного моделювання. По-третє, як встановлено при розрахунках на тих же скінченно-елементних моделях, що і для дослідження власних коливань, напруження та переміщення точок бронекорпусу також відповідають величинам, визначеним експериментально.

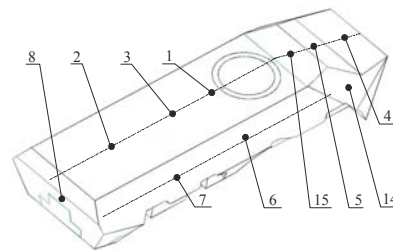


Рис. 15. Схема розташування датчиків-акселерометрів на бронекорпусі БТР-3Е



Рис. 16. Натурний бронекорпус БТР-3Е

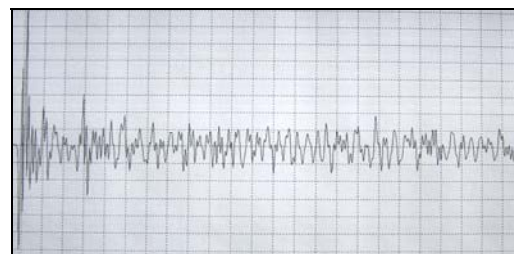


Рис. 17. Приклад віброграми прискорень, отриманих на бронекорпусі БТР-3Е

Таким чином, можна вважати запропоновані проектно-технологічні рішення досить обґрунтованими з точки зору забезпечення захищеності, точності стрільби та міцності, а також інших складових ТТХ ЛБМ.

## Висновки

Проведений комплекс досліджень дає підстави для наступних висновків.

1. У роботі міститься розв'язання актуальної і важливої науково-практичної задачі розробки методів і засобів забезпечення в процесі проектування заданих ТТХ легкоброньованих бойових машин на основі аналізу НДС їх корпусів при дії зусиль віддачі в процесі стрільби із скорострільних гармат. На основі розроблених підходів, методів і створеного програмно-модельного комплексу проведений багатоваріантний аналіз напружено-деформованого стану корпусів ЛБМ при дії імпульсних навантажень, результати якого покладені в основу розробки рекомендацій з проектування та технології виготовлення корпусів бронемашин, зокрема, БТР-94 як варіанта модернізації БТР-80, БТР-70УМ та БТР-3Е, що забезпечує досягнення заданого рівня ТТХ рухливості, захищеності і вогневої потужності проектованих ЛБМ.

2. У роботі вперше запропонована комплексна модель, що об'єднує фізичну, математичну, геометричну і числову моделі, яка на відміну від раніше використовуваних створюється на основі єдиного наскрізного параметричного опису, а також доповнена не тільки режимами бойового застосування ЛБМ, конструктивними параметрами їх бронекорпусів, але й параметрами і режимами технологічних операцій з виготовлення цих бронекорпусів.

3. Створена нова математична модель для опису динамічних процесів в корпусах ЛБМ при здійсненні пострілів, що відрізняються комплексним підходом до забезпечення заданого рівня ТТХ і орієнтацією на впровадження моделей, що розробляються, в універсальні системи автоматизованого проектування.

4. У роботі описано сімейство інтегрованих параметризованих моделей корпусів БТР-80, БМП-2, БМП-3, БТР-3, БРДМ, МТ-ЛБ, які вирізняються єдиним підходом до їх створення, єдиною технологією їх дослідження в середовищі сучасних комп'ютерних систем. Застосування цих моделей дає можливість різко (у 3-4 рази і більше) скоротити на ранніх етапах проектування та технологічної підготовки виробництва терміни дослідження фізико-механічних процесів у корпусах легкоброньованих машин при стрільбі.

5. Створений спеціалізований програмно-модельний комплекс відрізняється властивостями гнучкості, переналаджованості, доповнюваності інтегрованих моделей і має характер достатньо універсального інструменту для обґрунтування проектно-технологічних рішень і забезпечення заданих ТТХ.

6. Розроблені із застосуванням методів, алгоритмів і програмно-модельного комплексу практичні рекомендації дозволили, зокрема, при проектуванні і технологічній підготовці виробництва бронетранспортерів БТР-94, БТР-3Е забезпечити складові

ТТХ за точністю стрільби відхилення осі ствола від цілі за рахунок пружної деформації корпусу – в установлених межах; за напруженнями – неперевищення допустимих напружень у бронепанелях, у внутрішній силовій структурі та у зварних з'єднаннях; за захищеністю - на рівні БТР-80; за довговічністю – на рівні аналогічних машин.

7. Достовірність отриманих результатів досліджень і точність розрахункових моделей Pro/ENGINEER забезпечуються в роботі на основі оригінального варіанта розрахунково-експериментального методу досліджень корпусів: порівняно з експериментальними даними похибка не перевищує 10 %; порівняно з результатами числових досліджень із застосуванням еталонних моделей і системи ANSYS – 5% за максимальними переміщеннями і 10% – за максимальним напруженням. При цьому якісна відповідність результатів – повна. Крім того одержана відповідність не тільки на макетних, але й на натурних зразках бронекорпусів, зокрема БТР-3Е.

Результати роботи у вигляді фізичних, геометричних і скінченно-елементних інтегрованих моделей можуть бути рекомендовані для впровадження на підприємствах бронетанкобудування, в НДІ, КБ на етапі проектування та технологічної підготовки виробництва легкоброньованих машин з метою проведення необхідних досліджень для забезпечення заданих ТТХ шляхом науково обґрунтованого вибору конструктивних схем і параметрів корпусів, забезпечуючи міцність і жорсткість в процесі навантажень зусиль віддачі при здійсненні пострілів із скорострільних гармат.

У підсумку можна зазначити, що у даній роботі, на відміну від попередніх, у т.ч. й [10], розглядається поповнений параметричний простір, що містить і технологічні параметри. Це принципово відрізняє можливості цього підходу, оскільки рішення, що приймаються у неповному просторі, можуть вступати у конфлікт з неврахованою частиною чинників, а даний підхід це виключає.

У ході подальших досліджень планується провести комплексне дослідження напружено-деформованого стану бронекорпусів різних бойових машин при дії на них різних зусиль у процесі бойового застосування.

## Список літератури

1. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний / Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1971. – 240 с.
2. Гриценко Г.Д. Специализированная система автоматизированного анализа прочности и жесткости корпусов легкобронированных машин для выбора их рациональных конструктивных параметров при импульсном воздействии от усилия стрельбы / Г.Д.Гриценко, С.Т.Бруль, А.В.Ткачук // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2006. – №3. – С. 10-20.

3. Васильев А.Ю. Исследование динамики поведения корпуса МТ-ЛБ при стрельбе / А.Ю. Васильев, Е.П. Пономарев, С.Т. Бруль // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2006. – №33. – С. 3-8.

4. Гриценко Г.Д. Экспериментальное исследование элементов корпусов БТР-80 / Г.Д. Гриценко, А.Н. Малакей, Н.А. Ткачук // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2006. – №33. – С. 23-27.

5. Пелешко Е.В. Расчетно-экспериментальная идентификация параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств / Е.В. Пелешко, А.Ю. Васильев, Г.Д. Гриценко, С.Т. Бруль, Е.П. Пономарев // Механіка та машинобудування. – 2007. – №1. – С. 95-100.

6. Ткачук Н.А. Основы обобщенного параметрического описания сложных механических систем / Н.А. Ткачук, А.Д. Чепурной, Г.Д. Гриценко, Е.А. Орлов, С.Т. Бруль // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – Луганськ, 2007. – №9(115). Част. 1. – С. 196-205.

7. Пелешко Е.В. К вопросу о расчетно-экспериментальном определении параметров численных моделей корпусов транспортных средств / Е.В. Пелешко, А.Ю. Васильев, Г.Д. Гриценко, С.Т. Бруль, Е.П. Пономарев // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Транспортное машиностроение. – 2007. – №33. – С. 140-144.

8. Бруль С.Т. Моделирование реакции корпусов легкобронированных машин на действие ударно-импульсных нагрузок / С.Т. Бруль, И.Н. Карапейчик, В.М. Мазин, Н.А. Ткачук // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2011. – № 22 – С. 12–19.

9. Бруль С.Т. Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты / С.Т. Бруль, Н.А. Ткачук, А.Ю. Васильев, И.Н. Карапейчик // Механіка та машинобудування. – 2011. – №1. – С. 66-73.

10. Пелешко Е.В. Комплексне дослідження міцності та жорсткості корпусів транспортних засобів спеціального призначення / Е.В. Пелешко, М.А. Ткачук, С.Т. Бруль, О.В. Литвиненко, І.М. Карапейчик // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Транспортное машиностроение. – 2010. – №39. – С. 116-131.

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

#### **Повышение тактико-технических характеристик легкобронированных машин путем обеспечения прочности бронекорпусов**

И.Н. Карапейчик, С.Т. Бруль, Н.А. Ткачук, Е.В. Пелешко, О.В. Кохановская

*В статье описан новый подход к повышению тактико-технических характеристик легкобронированных машин путем обеспечения прочности бронекорпусов. Для определения реакции бронекорпусов на действие реактивных усилий отдачи применен метод конечных элементов. Синтез конструктивных решений осуществляется на основе метода обобщенного параметрического подхода. Результаты исследований проиллюстрированы на примере бронекорпусов бронетранспортеров и других боевых машин.*

**Ключевые слова:** военные гусеничные и колесные машины, бронекорпус, напряженно-деформированное состояние, тактико-технические характеристики, режим боевого применения

#### **Improvement of performance characteristics of lightly armored vehicles by providing of armored hulls strength**

I. Karapeychyk, S. Brul, N. Tkachuk, E. Peleshko, O. Kokhanovska

*In the paper new approach to the improvement of performance characteristics of lightly armored vehicles by providing of armored hulls strength is described. The finite element method is applied for determination of reaction of armored hulls on reactive recoil efforts action. The synthesis of structural solutions is performed on the basis of generalized parametrical approach method. The results of researches are illustrated on the example of armored troop-carriers and other fighting vehicles armored hulls. armored hull, deflected condition, performance characteristics, mode of combat use.*

**Keywords:** military tracked and wheeled vehicles, deflected condition, performance characteristics, mode of combat use