

Круковський-Сіневич К.Б., д-р техн. наук; Чепков І.Б., д-р техн. наук;
Волгін Л.О., канд. техн. наук; Бісик С.П., Голуб В.А., канд. техн. наук;
Ларін О.Ю., канд. техн. наук¹

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ВИБУХОМ МАКЕТІВ ДНИЩ БОЙОВИХ МАШИН

Актуальність теми та постановка завдання. Захист бойових машин (БМ) від усіх засобів ураження, в тому числі від протитанкових мін (ПТМ) та саморобних вибухових пристроїв фугасної дії в останні десятиліття, займає одне з основних місць як при дослідженні головних напрямів розвитку БМ, так і під час розробки нових і модернізації існуючих зразків [1]. Підвищена динаміка ведення сучасних бойових дій, широке застосування БМ в елементах бойових порядків військ, необхідність виконання ними нових завдань, досвід бойового застосування в збройних конфліктах, з одного боку, та високі показники втрат БМ і загибелі їх екіпажів внаслідок підривів на ПТМ, з іншого, свідчать про необхідність підвищення захисту БМ при підривах на ПТМ. Підвищення захисту, в свою чергу, потребує застосування перевірених та достатньо точних методик з визначення рівня захисту БМ [2,3].

Проведений аналіз наявного науково-методичного апарату дослідження протимінної стійкості БМ за даними періодичних видань показує, що основним способом визначення протимінної стійкості БМ є експериментальні дослідження. Але не зважаючи на свої переваги цей спосіб має ряд суттєвих недоліків, основні з яких – високі фінансові витрати та значна трудомісткість виконання. Застосування аналітичних методів можливе лише для відносно простих конструкцій або для наближеної експрес оцінки альтернативних конструктивних рішень. Зважаючи на сучасний розвиток електронно-обчислювальних машин використання методів числового моделювання, а саме методу скінченних елементів стало ефективним інструментом для вирішення завдань моделювання динамічного навантаження, що безпосередньо і вирішується у ході підвищення захищеності БМ та їх екіпажів при підривах на ПТМ, однак для даної області досліджень його використання є обмеженим у вітчизняній практиці.

Застосування методів числового моделювання можливе лише за умови наявності перевірених та достатньо точних математичних моделей даного процесу. Тому *метою роботи* є проведення експериментальної перевірки адекватності та точності розробленої математичної моделі вибухового навантаження конструкції БМ з урахуванням нестационарного відбиття ударної хвилі (УХ).

Основна частина.

Математична модель.

Сформульована математична модель числового рішення задачі вибухового навантаження днища БМ враховує динамічне пружно-пластичне деформування кожного елемента системи та їх ударно-контактну взаємодію. Для реалізації числового рішення цієї задачі було обрано пакет прикладних програм скінченно-елементного аналізу LS-DYNA [4, 5].

Математична модель числового рішення задачі вибухового навантаження конструкції включає закони збереження маси, кількості руху й енергії (1) [4].

¹ Автори висловлюють вдячність Грабару Євгену Валентиновичу за надану допомогу при організації та проведенні експериментів.

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{dv_i}{dt} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}; \quad \frac{de}{dt} = -\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} s_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (1)$$

де $i, j = 1, 2, 3$; ρ – густина матеріалу; σ_{ij} , s_{ij} , $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненти тензора напружень Коші, діватора напружень і тензора швидкості деформацій відповідно; x – переміщення; f_i – щільність об'ємних зусиль; e – енергія; p – тиск; t – час; v – швидкість.

Для дослідження поведінки макету днища при вибуховому навантаженні використовувалася модель матеріалу Купера-Саймондса (англ. Cowper-Symonds) (2) [4].

$$\sigma_T = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p); \quad E_p = E_{tg} E / (E - E_{tg}); \quad \varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt, \quad (2)$$

де p і C – параметри швидкості деформацій; $\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформацій; σ_0 , σ_T – статична та динамічна границя плинності; E – модуль пружності; E_{tg} – модуль зміцнення.

Швидкість пластичних деформацій визначається як різниця між швидкостями повних і пружних деформацій $\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij}^p - \dot{\varepsilon}_{ij}^e$.

Для оцінки вибухового навантаження на макет днища БМ у роботі застосовувалися два підходи, при яких дія УХ моделюється як функція тиску від часу (3) та з використанням рівняння стану Джонсона-Уілкінса-Лі (англ. Jones-Wilkins-Lee) (4) [4].

Опис руху суцільного середовища при використанні (3) проведений в координатах Лагранжа, при використанні (4) – в координатах Лагранжа та Ейлера із застосуванням довільного методу зв'язування координат (англ. Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)).

$$P(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t - t_a}{t_d} \right) \exp \left(-A \frac{t - t_a}{t_d} \right), \quad (3)$$

де $P(t)$ – тиск УХ на момент часу t ; P_{so} – максимальний тиск падаючої ударної хвилі; t_a – час досягнення ударною хвилею об'єкта; t_d – час дії позитивної фази ударної хвилі; A – коефіцієнт затухання.

Рівняння стану продуктів детонації вибухової речовини (ВР) [4]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp \{ -R_1 V \} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp \{ -R_2 V \} + \frac{\omega}{V} \bar{E}, \quad (4)$$

де $V = \rho_0 / \rho = v / v_0$ – відносний питомий об'єм; A , B , C , R_1 , R_2 , ω – емпіричні константи; $\bar{E}$ – внутрішня енергія на одиницю об'єму. В стані Жуге:

$$\bar{E}_H = \bar{E}_0 + \frac{P_H}{2} (1 - V_H),$$

де $\bar{E}_0$ – нормалізована величина, що включає енергію хімічних зв'язків і визначається з термохімічного експерименту або за даними термодинамічного розрахунку.

Рівняння стану повітря при використанні методу ALE [4]:

$$p = e \cdot (\gamma - 1) \rho / \rho_0, \quad (5)$$

де $\gamma = 1,4$ – показник адіабати повітря.

При числовому рішенні задачі вибухового навантаження крок інтегрування прийнятий з умови Куранта, виконання якої є необхідною та достатньою умовою забезпечення стійкості та збіжності рішення.

Експериментальна установка. Дослідженню підлягали макети днищ БМ плоскої та V-подібної форми (рис. 1). Макети днищ БМ закріплювалися на нерухомій підставці за допомогою елементів кріплення (рис. 2). Вибухове навантаження задавалося підривом заряду ВР ТГ 50/50 ($Q=4,8$ МДж/кг). Ініціювання ВР здійснювалося електродетонатором. Загальний вигляд макету заряду ВР спорядженого електродетонатором, наведений на рис. 3. Для забезпечення необхідної відстані між моделлю та зарядом ВР останній встановлювався на підставку з картону 4 (рис. 2 а).

Для виготовлення макетів днищ БМ використана сталь 08 кп (вуглецева, якісна) характеристики якої наведено в табл.

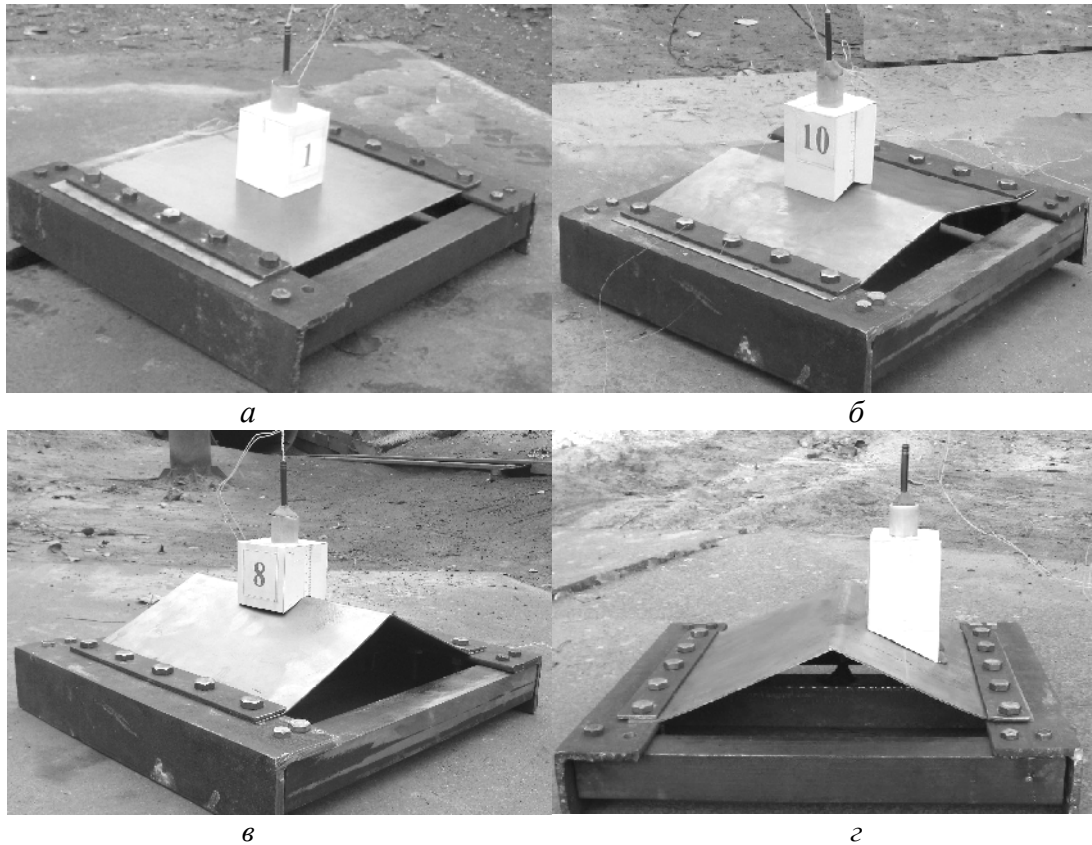


Рис. 1. Експериментальні макети днищ БМ зі встановленим зарядом ВР: а – макет плоского днища; б, в – V-подібного з $\alpha=85^\circ$ та $\alpha=65^\circ$ відповідно; г – $\alpha=85^\circ$ зі зміщеним зарядом ВР

При проведенні експериментальних досліджень варіювалися значення таких параметрів: кута α (90° , 85° , 65° , 55°), відстані R (78 мм, 88 мм, 98 мм), маси ВР ($m_{ВР}$) (26 г, 35 г, 44 г), місця підриву (зміщення заряду ВР відносно вісі симетрії макету днища в рис. 1 г). Інші параметри макету були сталими: товщина пластини $h=2$ мм, довжина зразка $l=300$ мм, (рис. 2). Варіювання маси ВР при проведенні експерименту проводилось шляхом зміни висоти (h_1) та діаметру (d) макету заряду ВР. З метою зменшення

впливу форми заряду на параметри УХ значення h_1 та d обиралися рівними між собою та знаходилися в діапазоні 30 мм у залежності від потрібної маси ВР.

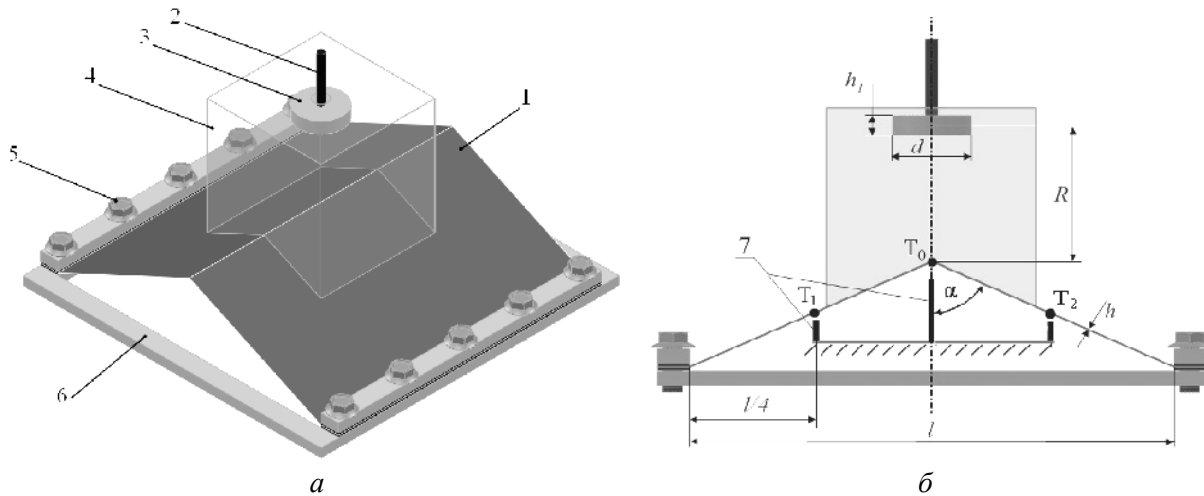


Рис. 2. Геометрична поверхнева модель днища БМ: *а* – ізометричний вигляд; *б* – вигляд спереду; 1 – макет днища БМ; 2 – електродетонатор; 3 – вибухова речовина; 4 – картонна підставка; 5 – елементи кріплення (болт, гайка); 6 – фіксуюча рамка; 7 – крешери; решта позначень у тексті

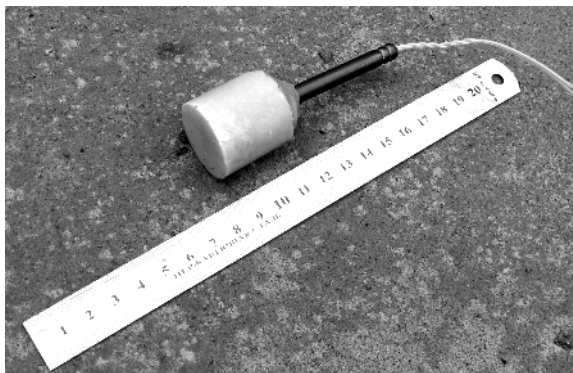


Рис. 3. Макет заряду ВР, споряджений електродетонатором

При використанні рівняння (3) перерахунок маси ВР проводився за виразом (6) [6]. При використанні рівняння (3) вплив форми заряду до уваги не приймався, оскільки параметри вибуху компактних зарядів ВР довільної форми на відстанях, що перевищують їх характерні розміри, практично ідентичні параметрам вибуху сферичного заряду еквівалентної маси [6].

$$m_{\text{екв}} = m_{\text{ВР}} \cdot \frac{Q_{\text{ВР}}}{Q_{\text{ТНТ}}}, \quad (6)$$

де $m_{\text{екв}}$ – еквівалентна маса ТНТ; $m_{\text{ВР}}$ – маса ВР, що використовується; $Q_{\text{ВР}}$ – теплота вибуху ВР, що використовується; $Q_{\text{ТНТ}}$ – теплота вибуху ТНТ (4,2 МДж/кг).

Для зарядів ВР невеликої маси існує необхідність врахування маси ВР, що не прореагувала при вибуху. ТГ 50/50 має малий критичний діаметр і, відповідно, малу частку хімічних втрат при вибуху [7], тому при використанні виразу (3) значення хімічних втрат до уваги не приймалися.

Таблиця 1

Характеристики макету днища БМ

Характеристика	Значення
модуль пружності, ГПа	203
коефіцієнт Пуассона	0,3
межа плинності, МПа	175
модуль зміцнення, МПа	270
густина, кг/м ³	7871

Оцінка отриманих експериментальних результатів та результатів числового моделювання. Вигляд макетів днищ після вибухового навантаження представлений на рис. 4. Оцінка адекватності математичної моделі проводилась за якісними та кількісними показниками [8]. Розповсюдження УХ при застосуванні методу ALE представлено на рис. 5 (густина повітря $\rho_{\text{пов}}=1,29 \text{ кг/м}^3$). Якісне порівняння експериментальних зразків та комп'ютерного аналога показано на рис. 7 та дозволяє зробити висновок про їх ідентичність.

Кількісними показниками оцінки адекватності математичної моделі обрано значення максимальних динамічних прогинів в контрольних точках T_0 та T_1 (рис. 2), що фіксувалися за допомогою свинцевих крешерів (рис. 6).

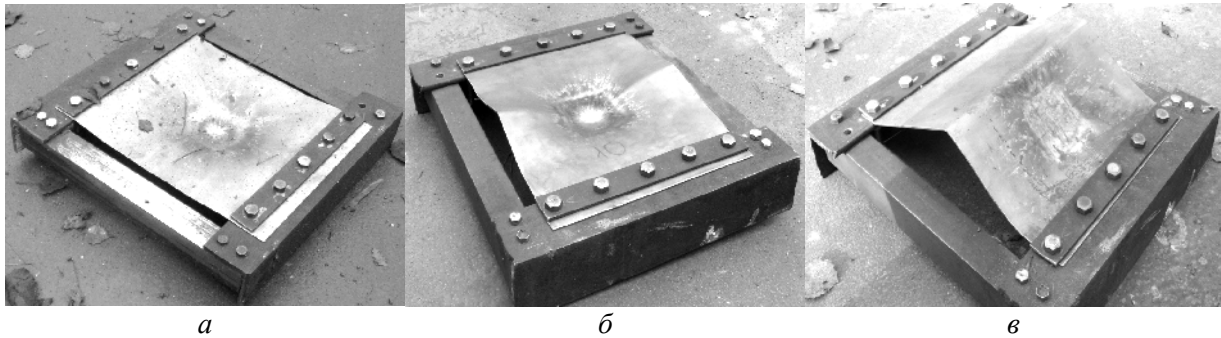


Рис. 4. Експериментальні макети днищ БМ після вибухового навантаження: *а* – плоске днище; *б* – V-подібне днище з $\alpha=85^\circ$; *в* – V-подібне днище з $\alpha=65^\circ$ при зміщеному розташуванні заряду ВР

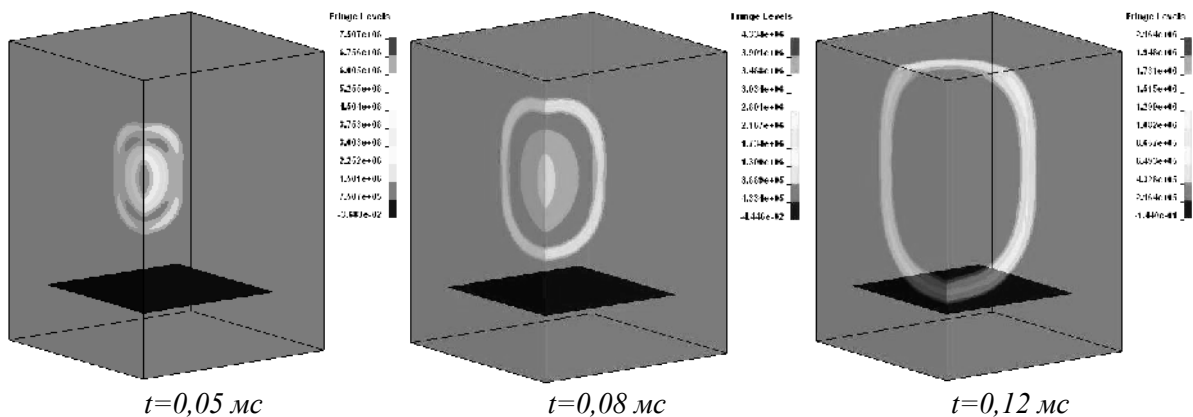


Рис. 5. Результати моделювання вибухового навантаження пластини з використанням методу ALE

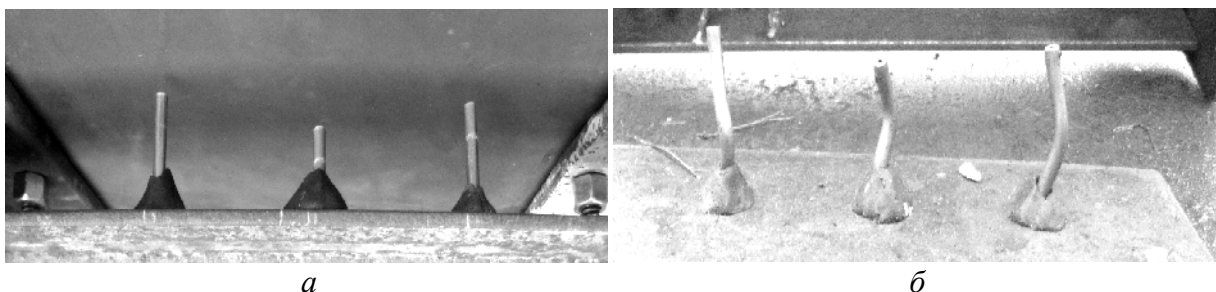


Рис. 6. Установка крешерів для фіксації динамічного прогину в контрольних точках макету днища: *а* – до вибухового навантаження макета днища; *б* – після вибухового навантаження макета днища

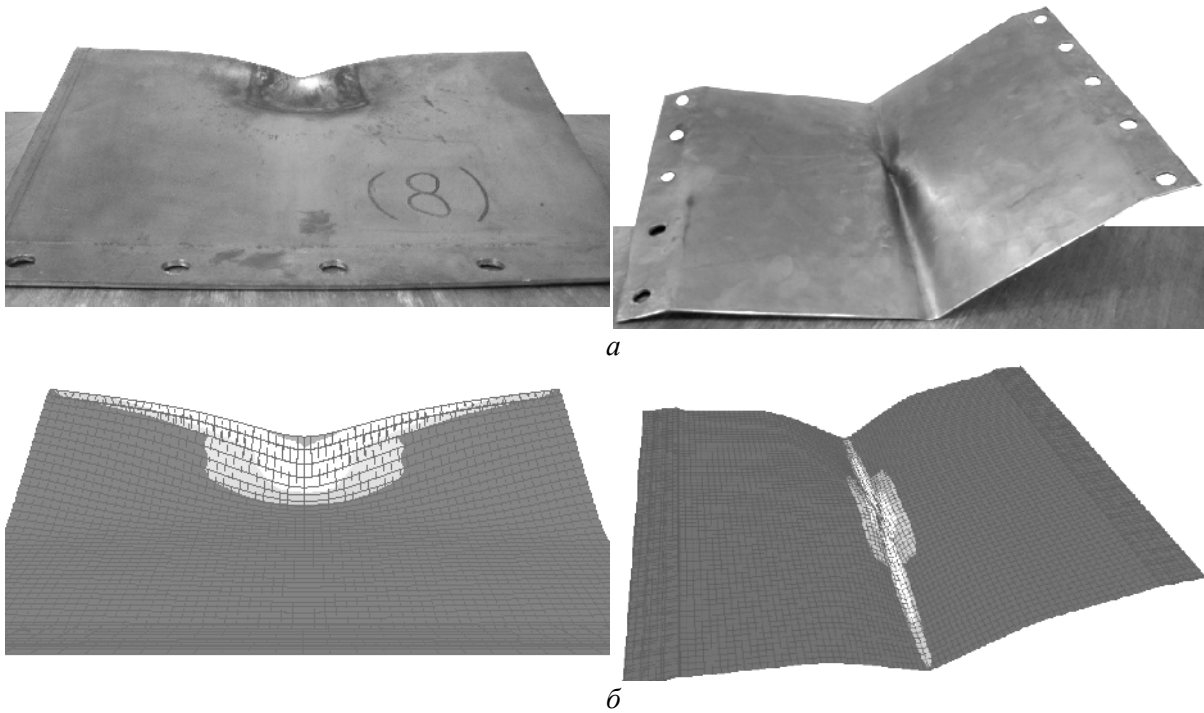


Рис. 7. Порівняння результатів експерименту та числового моделювання, щодо залишкових деформацій макету днища ББМ ($\alpha=65^\circ$, $R=78$ мм, $m_{BP}=35$ г): а – дослідний зразок; б – комп'ютерна модель з полями пластичних деформацій

При проведенні натурного експерименту для невісесиметричного підриву ВР (рис. 4 в) максимальні динамічні прогини в точках T_0 і T_1 дорівнюють 13,2 мм та 34 мм відповідно. За даними математичного моделювання в програмному комплексі LS-DYNA числове рішення з використанням рівняння (3) склали відповідно 12,4 мм та 31,1 мм. При тих самих вхідних даних з використанням методу ALE значення прогинів 11,8 мм та 31,3 мм.

Отже, розбіжність між результатами натурного експерименту та математичного моделювання для невісесиметричного підриву ВР складає:

для рівняння (3) в точці T_0 – 12,4%, в точці T_1 – 8%;

для методу ALE в точці T_0 – 10 %, в точці T_1 – 8 %.

Аналіз отриманої залежності (рис. 8) впливу кута α V-подібного макету днища на значення динамічних прогинів дозволяє зробити висновок, що при значеннях кута α в діапазоні $75^\circ < \alpha < 90^\circ$ максимальні динамічні прогини в точках V-подібного днища більші у порівнянні з плоским днищем ($\alpha=90^\circ$), що вказує на зниження захисної здатності днища в приведеному діапазоні кутів α .

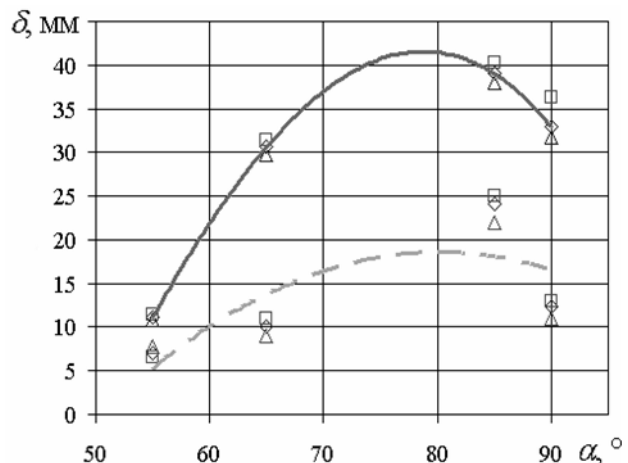


Рис. 8. Порівняння значень прогинів в точках T_0 «—» та T_1 «— —» при зміні кута α ($R=78$ мм, $m_{BP}=35$ г): $\diamond$ – натурний експеримент; $\square$ – вибухове навантаження задане рівнянням (3); Δ – вибухове навантаження задане з використанням методу ALE

Отримані залежності динамічних прогинів в контрольних точках днища при зміні вибраних параметрів дозволяють провести оцінку збіжності експериментальних даних і результатів числового моделювання з використанням різних методів. Максимальна розбіжність між експериментальними даними та числовими результатами не перевищує 12,4 % (рис. 8-10) для точок T_0 і T_1 , що є прийнятним для задач цього класу.

Числова модель вибухового навантаження є адекватною натурному експерименту. Результати, що отримано із застосуванням рівняння (3) та методу ALE, приблизно однакові, але час обчислення аналогічного завдання при використанні першого методу на декілька порядків менший в порівнянні з методом ALE. Тому, за умови відсутності необхідності точного врахування характеристик зарядів ВР більш доцільне застосування рівняння (3).

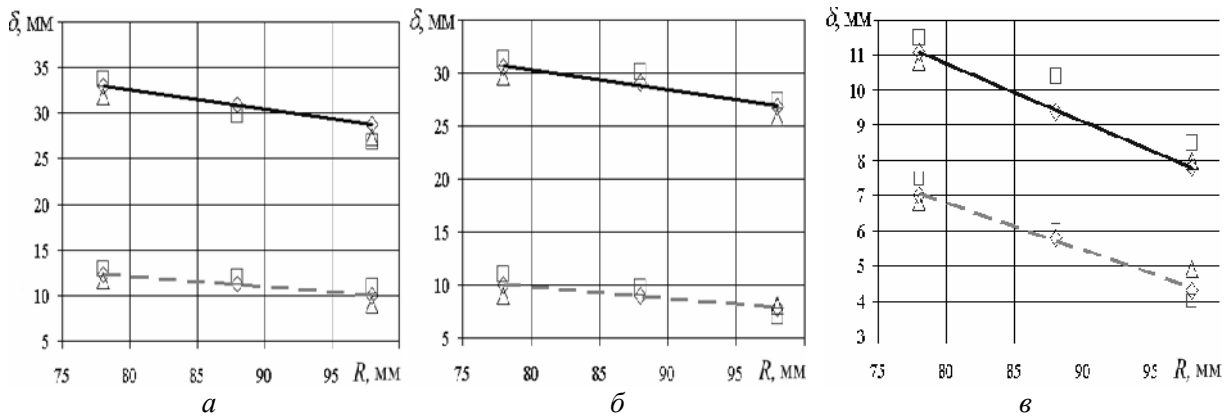


Рис. 9. Порівняння значень прогинів в точках T_0 «—» та T_1 «— —» при зміні відстані до ВР ($m_{BP}=35$ г): а – $\alpha=90^\circ$; б – $\alpha=65^\circ$; в – $\alpha=55^\circ$; $\diamond$ – натурний експеримент; $\square$ – вибухове навантаження задане рівнянням (3); Δ – вибухове навантаження задане з використанням методу ALE

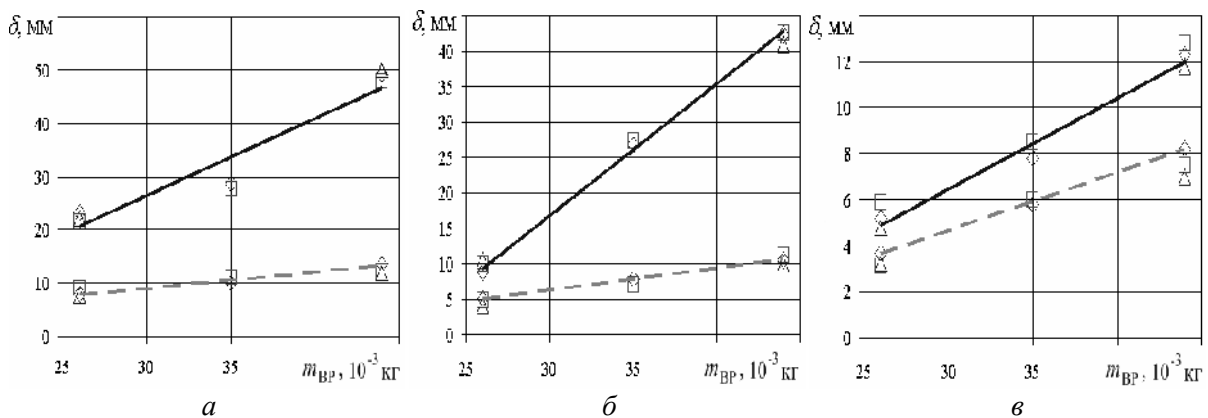


Рис. 10. Порівняння значень прогинів в точках T_0 «—» та T_1 «— —» при зміні маси ВР ($R=98$ мм): а – $\alpha=90^\circ$; б – $\alpha=65^\circ$; в – $\alpha=55^\circ$; $\diamond$ – натурний експеримент; $\square$ – вибухове навантаження задане рівнянням (3); Δ – вибухове навантаження, задане з використанням методу ALE

Висновки. Розроблено методику експериментального дослідження навантаження вибухом макетів днищ БМ, та проведенні з її використанням експериментальні дослідження підтвердили адекватність реальним фізичним процесам розробленої математичної моделі, що реалізована в програмному комплексі LS-DYNA. Відносна похибка між теоретичними та експериментальними результатами вибухового навантаження макетів днищ БМ не перевищує 12,4 %, що дозволяє використовувати розроблену математичну модель для числового рішення задач вибухового навантаження конструкцій БМ

при прямому падінні ударної хвилі на перешкоду, а також врахувати процеси обтікання ударною хвилею перешкоди. Відповідність теоретичних результатів з даними поставленого у роботі натурного експерименту підтверджує як правомірність основних поси-
лань, закладених у розрахункову схему, так і достовірність отриманих числових ре-
зультатів.

Отримані результати, розроблена методика та апробовані числові моделі можуть бути використанні на вітчизняних підприємствах при розробці, виробництві та модернізації бойових машин, а також при обґрунтуванні та визначенні рівня їх протимінної стійкості та підвищення рівня захисту при підриві на мінах шляхом науково-обґрунтованого вибору параметрів корпусу за результатами дослідження його напружено-деформованого стану.

Література: 1. Гребеник А. Н. Состояние и перспективы повышения защищенности армейских автомобилей многоцелевого назначения / А. Н. Гребеник, С. А. Стукота // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный науч.-техн. сб. – Вып. № 2. – К.: НТЦ АСВ. – 2005. – С. 37–43. 2. Васильев А.Ю. Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты. / А.Ю.Васильев, С.Т. Бруль, Н.А. Ткачук, И.Н. Карапейчик // Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – № 1. – С. 66 - 73. 3. Бісик С.П. Числове вирішення задачі ударно-хвильового навантаження пластини / С.П. Бісик, В.А.Голуб, В.Г.Корбач // Військово-технічний збірник / Академія сухопутних військ. №2(5). – Львів: АСВ, 2011. – С. 3-6. 4. LS-DYNA Theory Manual. – Livermore: LSTC, 2006. – 680 с. 5. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.lstc.com. 6. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. - 2-е изд., перераб. и доп. / Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 376 с. 7. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1977. – 440 с. 8. Прикладная механика сплошных сред. В 3 т. Т. 3. Численные методы в задачах физики быстротекущих процессов / Под ред. В.В. Селиванова. – Изд. 2-е, испр. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. – 520 с.

Bibliography (transliterated): 1. Grebenik A.N. Sostoyanie i perspektivy povysheniya zashchishchennosti armyeyskikh avtomobileyi mnogotselovogo naznacheniya / A.N. Grebenik, S.A. Stukota // Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie: Mezhdunarodny nauch.-tekhn. sb. - Vyp. № 2. - K: NTC ASV. - 2005. - S. 37-43. 2. Vasilyev A.Y. Modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh protsessov v korpusakh legkobronirovannykh mashin: podkhody, modeli, efektu. / A.Y.Vasilyev, S.T. Brul., N.A. Tkachuk, I.N. Karapeychik // Mekhanika ta mashinobuduvannya // Naukovo-tekhnichniy zhurnal. - 2011. - № 1. - S. 66-73. 3. Bisuk S.P. Chislove vurisheniya zadachi ydarno-xvulovogo navantagenniy plastinu / S.P. Bisuk, V.A. Golub, V.G.Korbach // Viyskovo texnichniy zbirnik / Akademiya sukhoputnykh viysk. № 2 (5). - L.: ASV, 2011. - S. 3-6. 4. LS-DYNA Theory Manual. – Livermore: LSTC, 2006. – 680 с. 5. [Elektronnyy resurs]. - Rezhim dostupa: www.lstc.com. 6. Udarnye i detonatsionnye volny. Metody issledovaniya. - 2-ye izd., Pererab. i dop. / Kobylkin I.F., Selivanov V.V., Solovev V.S., Sysoev N.N. - M.: Fizmatlit, 2004. - 376 s. 7. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike / L.I. Sedov. - M.: Nauka, 1977. - 440 s. 8. Prikladnaya mekhanika sploshnykh sred. V 3 t. T.3. Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroptekayushchikh protsesov / Pod red. V.V. Selivanova. - Izd. 2-ye, ispr. - M.: Izd-vo MGTU im. Baumana, 2006. - 520 s.

Круковський-Сіневич К.Б., Чепков І.Б., Волгін Л.О., Бісик С.П., Голуб В.А., Ларін О.Ю.
ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ВИБУХОМ МАКЕТІВ ДНИЩ
БОЙОВИХ МАШИН

Наведено результати експериментальних досліджень макетів днищ бойових машин. Розроблено математичну модель для чисельного вирішення вибухового навантаження конструкцій плоскої й V-образної форми. Проведено оцінку адекватності розробленої математичної моделі з використанням отриманих експериментальних даних. Дані результати актуальні при оцінці й розробці способів підвищення протимінної стійкості бойових машин.

Круковский-Синеви́ч К.Б., Чепков И.Б., Волгин Л.А., Бисык С.П.,
Голуб В.А., Ларин А.Ю.

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ ВЗРЫВОМ МАКЕТОВ ДНИЩ
БОЕВЫХ МАШИН**

Приведены результаты экспериментальных исследований макетов днищ боевых машин. Разработана математическая модель для численного решения взрывного нагружения конструкций плоской и V-образной формы. Проведена оценка адекватности разработанной математической модели с использованием полученных экспериментальных данных. Данные результаты актуальны при оценке и разработке способов повышения противоминной стойкости боевых машин.

Krukovsky-Sinevich K.B., Chepkov I.B., Volgin L.A., Bisyk S.P., Golyb V.A., Larin A. Y.

**THE MODEL BOTTOM STUDY OF MILITARY VEHICLES EXPLOSIVE
LOADING**

The results of experimental studies of models bottoms combat vehicles. The developed mathematical model for the numerical solution of the explosive loading of structures of flat and V-shaped. The evaluation of the adequacy of the developed mathematical model using experimental data. These results are relevant in assessing and developing ways to improve mine stability combat vehicles.

УДК 623.54

Мельник Б.А.

**К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ПОПЕРЕЧНО-УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА
ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН НА ТОЧНОСТЬ
СТРЕЛБЫ**

Введение. Применение стабилизированных боевых модулей со скорострельными малокалиберными пушками на современных легкобронированных колесных машинах (ЛБKM), безусловно, стало огромным шагом вперед в усилении огневой мощи бронетранспортеров (БТР) и колесных боевых машин пехоты (БМП). Однако большие скорости движения, характерные для колесных машин, большая геометрическая удаленность боевого модуля от центра тяжести машины, в отличие от классических танков и гусеничных БМП, большие углы возвышения вооружения и большая разнесенность опор движителя (колес), в отличие от гусеничной ленты, охватывающей все опорные катки по борту, существенно снижают точность стрельбы при ведении огня сходу и компенсируются только скорострельностью и увеличением количества боеприпасов, необходимых для поражения цели.

Цель и постановка задачи. Целью данной публикации является оценка влияния поперечно-угловых колебаний корпуса ЛБKM на точность стрельбы сходу при движении по пересеченной местности, которая для тяжелых гусеничных машин, как правило, вообще не рассматривается.

Методика оценки влияния. Рассмотрим прямолинейное движение ЛБKM с боевым модулем, имеющим в общем случае смещение относительно центра тяжести ЛБKM точки C (пересечения оси цапф и оси канала ствола) X_M, Y_M, Z_M (рис. 1). Для выделения влияния поперечно-угловых колебаний на точность стрельбы будем считать,