

С. П. БІСІК¹, А. Ф. САНІН², В. П. ПОШИВАЛОВ³, О. М. АРІСТАРХОВ⁴
М. В. ПРИХОДЬКО², А. І. КУЗЬМИЦЬКА³, А. Ф. ЛЕДНЯНСЬКИЙ²

КОМБІНОВАНИЙ ПРОТИУДАРНИЙ ТА ПРОТИМІННИЙ ЗАХИСТ НА ОСНОВІ ДЕТАЛЕЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

¹Центральний науково-дослідний інститут

озброєння та військової техніки Збройних сил України,

пр. Повітрофлотський, 28, 03049, Київ, Україна; e-mail: sergey-new@ukr.net

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна;

³Інститут технічної механіки

Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,

вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: vproshivalov@gmail.com

⁴Національний університет оборони України,

пр. Повітрофлотський, 28, 03049, Київ, Україна; e-mail: aristarkhovamargarita@gmail.com

Розглянуто використання деталей з алюмінієвих сплавів для комбінованого протимінного захисту бойових броньованих машин. Досліджувалися захисні протимінні екрани, що встановлювалися на макет корпусу бойової броньованої машини. Макет був виготовлений із броньової сталі товщиною 16 мм. Загальна маса макета (без захисного протимінного екрана) складає 31,1 кг. Захисний протимінний екран кріпився за рахунок болтового з'єднання із затисненням його між двома рамками. Для усунення впливу ґрунту на результати підризу заряди вибухової речовини встановлювалися на металеву плиту товщиною 70 мм. Ініціювання зарядів вибухової речовини здійснювалось електродетонаторами ЕД-8Ж. Для випробувань використано вибухову речовину марки ТГ-50/50. В центрі макета встановлювався датчик прискорення DYTRAN 3200B. Реєстрування сигналу з датчика прискорення проводилось на експериментальному комплексі. Проведена оцінка прискорення макета корпусу із захисним протимінним екраном, що не деформується (пластина броньової сталі товщиною 10 мм, масою 10,7 кг), для оцінки прискорення макета без втрати енергії на пружні та пластичні деформації. Для проведення числового моделювання побудована скінченно-елементна модель макета корпусу бойової броньованої машини. Проведені дослідження впливу параметрів вибухового навантаження на прискорення корпусу макета. Порівняння прогинів, отриманих при числовому моделюванні та при натурному експерименті, проведене з використанням 3D сканера EinScan Pro 2X Plus. Отримані значення швидкості та прискорення макета бойової броньованої машини із жорстким і пластичним захисним протимінним екраном при числовому моделюванні та при натурному експерименті. Результати вибухотехнічних випробувань показали, що кращі показники поглинання енергії вибуху забезпечує відпалювання деталей зі сплавів системи Al-Mg, зокрема, AMg6. При цьому використання будь-якого з розглянутих захисних протимінних екранів з алюмінієвого сплаву AMg6 забезпечує зменшення значень прискорень у центрі пластини та, відповідно, і навантажень на корпус бойової броньованої машини у 20...25 разів у порівнянні із захисними протимінними екранами з броньової сталі. Показано, що для забезпечення необхідних фізико-механічних характеристик несучих деталей захисних протимінних екранів з алюмінієвих сплавів системи Al-Mg найкраще підходить відпалювання; для формоутворення і структуроутворення пористих енергопоглинаючих елементів доцільно використовувати пресування з тиском до 33 МПа; для з'єднання пористих енергопоглинаючих елементів з несучими деталями захисних протимінних екранів найбільш доцільно використовувати склеювання; після окремих випробувань зразків матеріалів для несучих деталей і пористих енергопоглинаючих елементів доцільно переходити до відпрацювання комбінованих конструкцій захисних протимінних екранів для бойових броньованих машин різного призначення.

Ключові слова: алюмінієві сплави, енергопоглинаючі елементи, протимінні екрани, протимінний захист, бойові броньовані машини, пластичність, ударна в'язкість.

This paper considers the use of aluminum alloy parts for combined mine protection of armored combat vehicles. The study was concerned with anti-mine shields mounted on an armored combat vehicle body model. The model was made of 16 mm armor steel. The total mass of the model (without an anti-mine shield) was 31.1 kg. An anti-mine shield was gripped between two frames and secured with bolts. To eliminate the effect of the soil on the test results, the explosive charges were installed on a 70 mm metal plate. The charges were initiated with an ED-8Zh electrodetonator. TG-50/50 explosive was used. A DYTRAN 3200B acceleration sensor was mounted at the center of the model, and the sensor signal was measured using an experimental system. To assess the model acceleration without any energy loss by elastic or plastic deformations, the acceleration of the model with a rigid anti-mine shield (a rigid armor steel plate of thickness 10 mm and mass 10.7 kg) was assessed. A finite-element simulation of the model was conducted. The effect of explosion load parameters on the model acceleration was studied. The simulated and the actual deflections were compared using an EinScan Pro 2X Plus 3D scanner. The speed and the acceleration of the model with a rigid and a plastic anti-mine shield were simulated and measured. The results showed that annealed parts made of Al-Mg alloys, in particular AMg6 alloy, absorb the explosion

© С. П. Бісик, А. Ф. Санін, В. П. Пошивалов, О. М. Арістархов,
М. В. Приходько, А. І. Кузьмицька, А. Ф. Леднянський, 2023

energy better. Any of the anti-mine shields made of AMg6 alloy reduces the acceleration at the center of the plate and thus the load on the armored vehicle body by a factor of 20...25 in comparison with the anti-mine shields made of armor steel. It was shown that annealing best provides the required physical and mechanical characteristics of the load-bearing parts of anti-mine shields, it is advisable to shape and structurize their porous energy-absorbing elements by pressing up to 33 MPa, it is most advisable to paste the porous energy-absorbing elements to the load-bearing parts, and after separate tests of load-bearing part and porous energy-absorbing element material specimens it is advisable to try out combined constructions of anti-mine shields for armored combat vehicles of different purposes.

Keywords: *aluminum alloys, energy-absorbing elements, anti-mine shields, mine protection, armored combat vehicles, plasticity, impact strength.*

Сучасні бойові броньовані машини (ББМ) в ході воєнних дій піддаються впливу різноманітних засобів ураження, з яких одним з найбільш небезпечних є підриз на мінно-вибухових пристроях (МВП) фугасної дії, що мають різну конструкцію і потужність. Підриз МВП під днищем впливає на корпус ББМ, її озброєння, внутрішнє і зовнішнє обладнання та може приводити до травмування екіпажу і десанту [1, 2]. Для збереження боєздатності екіпажу (десанту), а також власне ББМ, застосовується комплекс активних і пасивних засобів захисту [3], серед яких одним з найбільш дієвих вважається використання захисного протимінного екрана (ЗПМЕ) [4, 5].

В роботах [5, 6] сформульовані вимоги до матеріалів, з яких може бути виготовлений ЗПМЕ, а саме висока пластичність і ударна в'язкість, відносно знижена границя плинності при збереженні максимально можливої границі міцності. Такий комплекс властивостей доволі складно одночасно забезпечити в одному матеріалі, тим більше, що до матеріалу, який використовується у ЗПМЕ, висуваються й інші вимоги: вогнестійкість, здатність витримувати вібраційні та інші силові навантаження в ході штатної експлуатації, корозійна стійкість, не дефіцитність тощо. Тому для виготовлення ЗПМЕ доцільно використовувати комбіновані конструкції з декількох матеріалів.

Алюмінієві сплави, особливо системи Al-Mg (5083, 5456, AMg6) значною мірою задовольняють більшості вимог до ЗПМЕ, але навіть їх пластичності та ударної в'язкості недостатньо, щоб ефективно поглинати енергію вибуху. Для цього необхідно використовувати матеріали із ще більшою пластичністю, зокрема, пористі, у вигляді пористих енергопоглинаючих елементів (ПЕПЕ), вимоги до яких наведені у роботі [7].

Одним з можливих варіантів, що задовольняють цим вимогам, є виготовлення ПЕПЕ з диспергованих водою порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів [7]. Слід враховувати, що міцність пористих елементів не дозволяє використовувати їх самостійно, тому доцільним є поєднання у конструкції ЗПМЕ несучих деталей зі сплавів системи Al-Mg з ПЕПЕ з порошків алюмінію або алюмінієвих сплавів.

Таким чином, для проєктування і виготовлення комбінованих ЗПМЕ необхідно вирішити наступні технічні задачі: формоутворення і структуроутворення несучих деталей ЗПМЕ з алюмінієвих сплавів; формоутворення і структуроутворення ПЕПЕ з порошків алюмінію або алюмінієвих сплавів; з'єднання ПЕПЕ з несучими деталями ЗПМЕ.

Формоутворення несучих деталей ЗПМЕ з алюмінієвих сплавів здійснюється звичайними засобами заготівельного виробництва (розкрій за допомогою пил, гільйотинних ножиць, плазмових пальників (різаків)), механічної обробки (фрезерування кромки, свердління отворів під кріпильні деталі), обробки тиском (штампування, гнуття обичайок), зварювання. Структуроутворення несучих деталей ЗПМЕ з алюмінієвих сплавів здійснюється за допомо-

гою термічної обробки. За даними робіт [4, 5] для виготовлення несучих деталей ЗПМЕ найбільш придатні алюмінієві сплави системи Al-Mg (5083, 5456, АМг6). Найбільш ефективними способами термічної обробки деталей ЗПМЕ зі сплавів системи Al-Mg є відпускання та прискорене охолодження [8]. Відпускання здійснюється за відомими режимами [9], тобто нагрівання до 330 °С, часова витримка і охолодження разом з піччю. Прискорене охолодження може бути здійснене у холодній воді (кімнатна температура), у гарячій воді або соляному розчині та у кріогенних сумішах на основі вуглекислоти та етилового спирту або ацетону [8]. Найбільш ефективним з точки зору збільшення ударної в'язкості та пластичності є прискорене охолодження від температури 450 °С. Кріогенні суміші доволі дорогі, пожежонебезпечні та токсичні. Результати випробування фізико-механічних властивостей катаних плит зі сплаву АМг6 наведені у роботі [10]. Ці результати свідчать про те, що поліпшені характеристики, які сприяють кращому поглинанню енергії удару, мають зразки, прискорено охолоджені у холодній воді. Цього цілком достатньо для використання даного способу термічної обробки деталей протиударного захисту залізничних транспортних засобів [11–15].

Для перевірки придатності різних способів і режимів термічної обробки для виготовлення несучих деталей ЗПМЕ необхідно провести вибухотехнічні випробування.

Проведення експериментальних досліджень різноманітних конструкцій вибуховим навантаженням є складною науково-технічною задачею. Дослідження реальних зразків потребує значних фінансових витрат. У зв'язку з цим набуває актуальності масштабування цього процесу за рахунок створення макетів (зменшених копій реального об'єкта випробувань). Результати експериментальних досліджень на макетах можуть бути використані для вивчення явищ в натурі, якщо дотримані умови, що витікають з теорії подібності та розмірності.

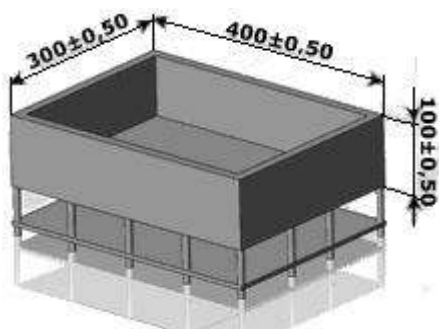
Дослідженням підлягали ЗПМЕ ББМ, що встановлювались на макет корпусу ББМ (рис. 1).



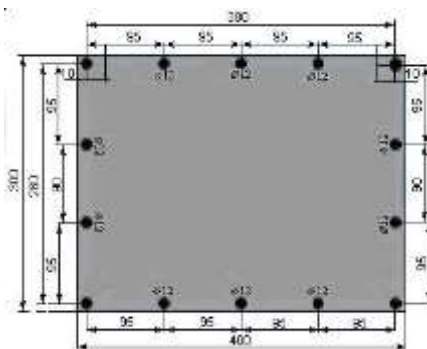
1 – макет корпусу ББМ; 2 – ЗПМЕ; 3 – заряд ВР із детонатором; 4 – металева плита товщиною 70 мм; 5 – датчики прискорення

Рис. 1 – Макет корпусу ББМ із встановленим на нього ЗПМЕ

Макет ББМ виготовлений із броньової сталі товщиною 16 мм. Загальна маса макета ББМ (без ЗПМЕ) складає 31,1 кг. ЗПМЕ кріпився за рахунок болтового з'єднання із затисненням ЗПМЕ між двома рамками. Геометричні розміри макета корпусу ББМ та ЗПМЕ наведені на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2 – Габаритні розміри макета корпусу ББМ (а) та ЗПМЕ (б)

Для усунення впливу ґрунту на результати підриву заряди вибухової речовини (ВР) встановлювалися на металеву плиту товщиною 70 мм.



Рис. 3 – Загальний вигляд зарядів ВР (ТГ-50/50)

Ініціювання зарядів ВР здійснене електродетонаторами ЕД-8Ж. Для випробувань використано ВР марки ТГ-50/50. Загальний вигляд зарядів показаний на рис. 3, а їхні основні характеристики у таблиці 1.

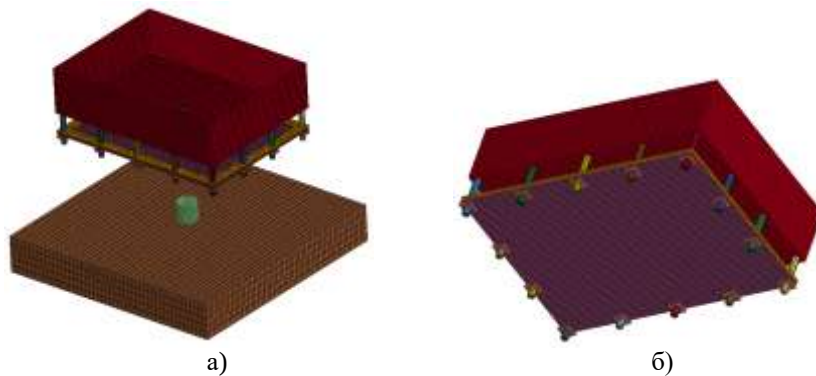
В центрі макета встановлений датчик прискорення DYTRAN 3200В. Реєстрування сигналу з датчика прискорення проводилось на експериментальному комплексі.

Таблиця 1 – Основні характеристики зарядів ВР

Маса ВР, кг	Діаметр заряду ВР, мм	Висота заряду ВР, мм
0,100±0,001	43	43
0,150±0,001	49	49
0,200±0,002	54	55

На першому етапі проведена оцінка прискорення макета корпусу зі ЗПМЕ, що не деформується (пластина броньової сталі товщиною 10 мм, масою 10,7 кг), для оцінки прискорення макета без втрати енергії на пружні та пластичні деформації. По суті така конструкція є еталонною, та співвідношення прискорення в ній та в конструкції, що має ЗПМЕ та зазнає пружно-пластичних деформацій, дає можливість оцінити внесок ЗПМЕ в зменшення прискорення при збереженні достатньої жорсткості.

Для проведення числового моделювання створена скінченно-елементна модель (СЕ-модель) макета корпусу ББМ, яка наведена на рис. 4. З її використанням проведені дослідження впливу параметрів вибухового навантаження на прискорення корпусу макета.



а) – СЕ-модель корпусу ББМ з ЗПМЕ із зарядом ВР та плитою основи;
 б) – СЕ-модель корпусу ББМ з ЗПМЕ – вид знизу
 Рис. 4 – СЕ-модель макета корпусу ББМ

Кадри результатів моделювання підриву та зміни напружень по Мізесу наведенні на рис. 5 та рис. 6 відповідно, та є типовими для результатів моделювання з різними параметрами.

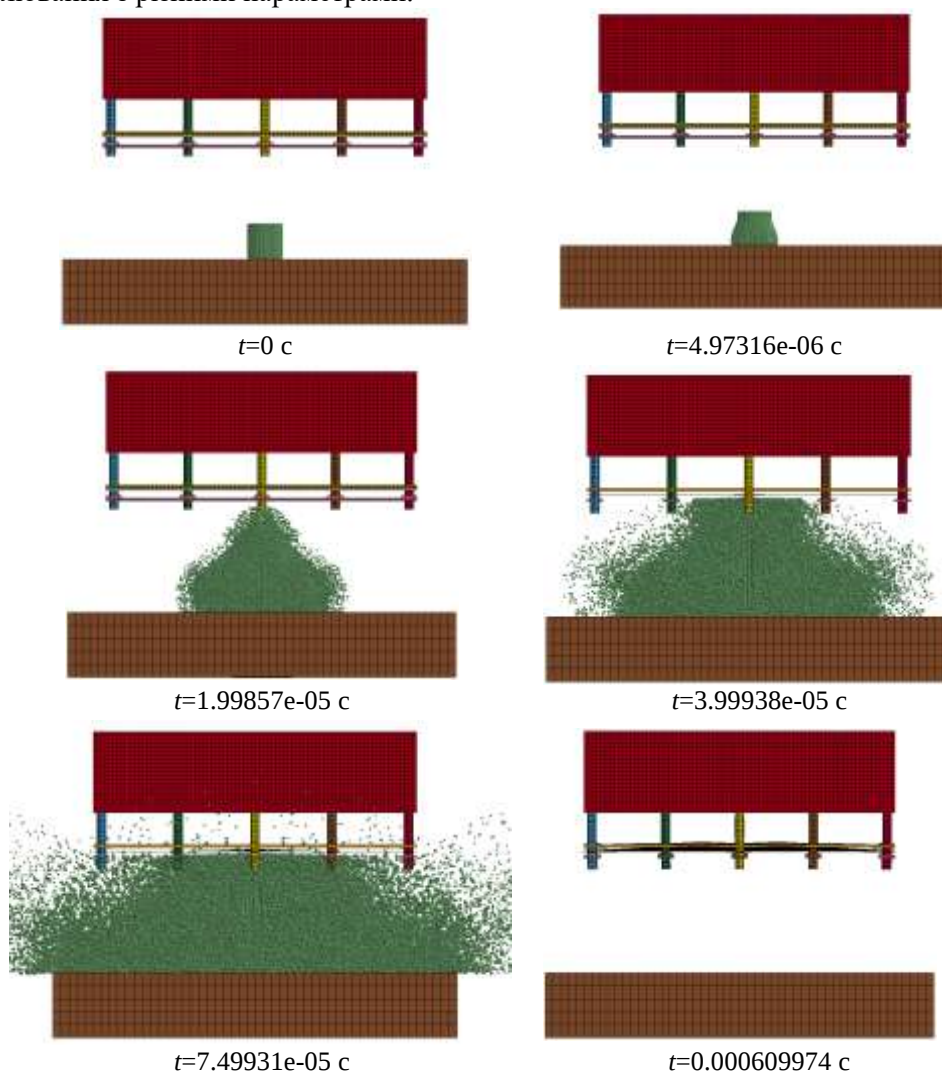


Рис. 5 – Кадри результатів моделювання підриву макета корпусу ББМ

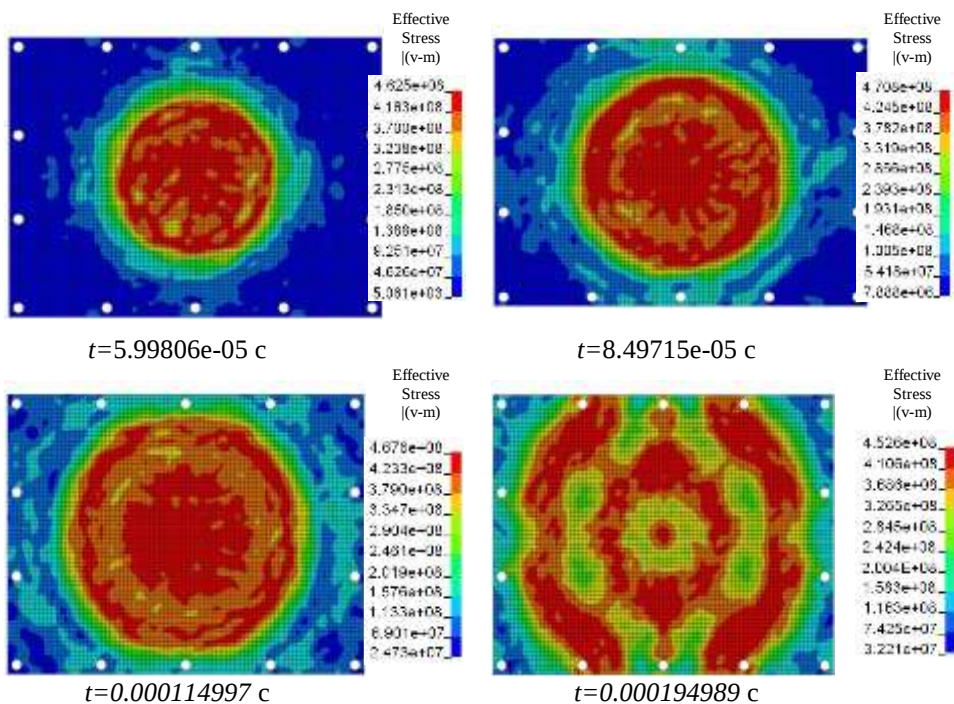


Рис. 6 – Зміна напружень по Мізесу макета ЗПМЕ при підриві заряду ВР масою 100 г на відстані 150 мм

Фото макета корпусу ББМ із жорстким та пластичним ЗПМЕ до випробувань та після представлені на рис. 7. Випробування є типовими для всіх натурних підривів за винятком значення максимального прогину.

Порівняння прогинів, отриманих при числовому моделюванні та при натурному експерименті, проведене з використанням 3D сканера EinScanPro2XPlus в науково-випробувальній лабораторії зброї та спеціальних захисних матеріалів Національного університету оборони України. Зразки ЗПМЕ після натурних випробувань були відскановані та було визначено значення прогинів у контрольних точках. Результати наведені на рис. 8.

Отримані значення швидкості та прискорення макета ББМ із жорстким ЗПМЕ наведені на рис. 9. Отримані значення прискорень при числовому моделюванні та при натурному експерименті мають відносну похибку від 1,9 % до 5 % (середнє значення похибки складає 3,4 %).

Значення прискорення та прогини в центрі пластини, отримані при застосуванні пластичного ЗПМЕ на макеті корпусу ББМ, наведені на рис. 10. Відносна похибка між результатами числового моделювання та натурального експерименту мають відносну похибку:

- для прогинів в центрі пластини 2,9 % – 12,1 % (середнє значення похибки складає 7,0 %);
- для прискорень макета ББМ 2,1 % – 7,5 % (середнє значення похибки складає 4,2 %), 0 % (середнє значення похибки складає 3,4 %).

Зведені дані щодо значень прискорень у центрі макета корпусу ББМ наведені у таблиці 2.

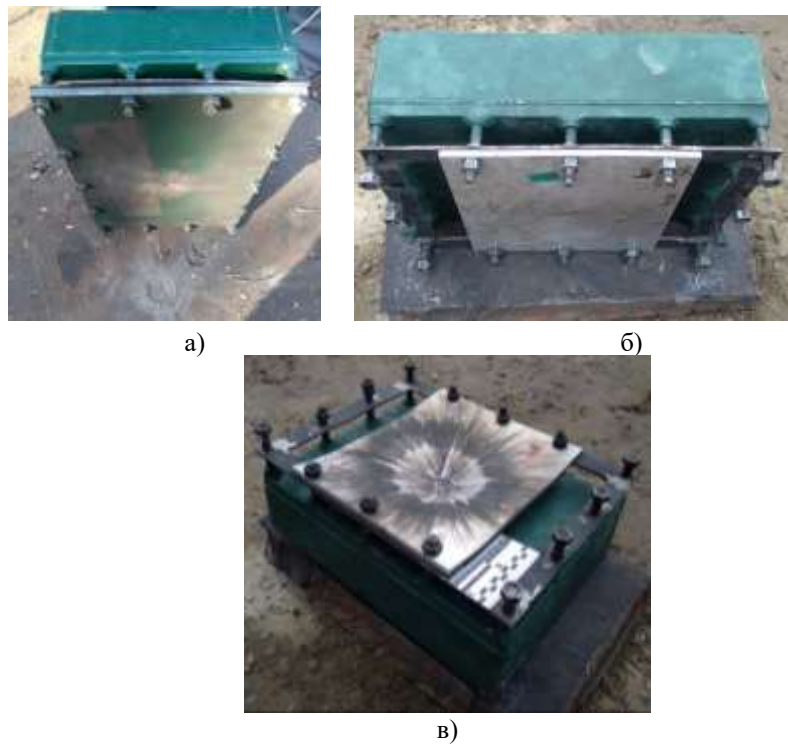


Рис. 7 – Макет корпусу ББМ з жорстким (недеформівним) ЗПМЕ (а), пластичним ЗПМЕ до підриву (б) та після (в)

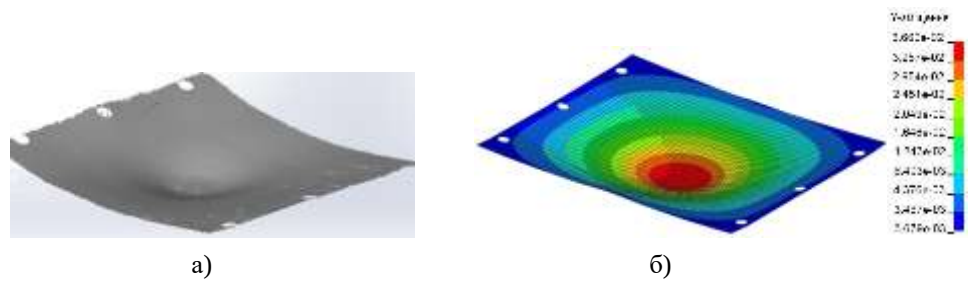
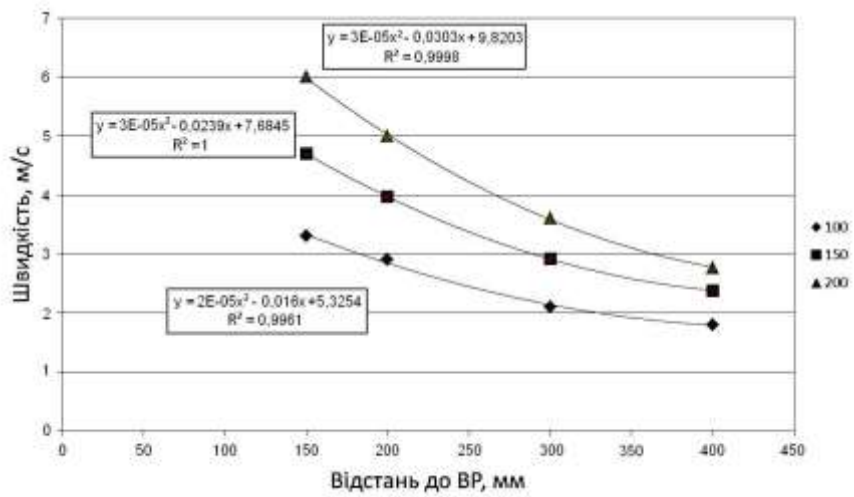
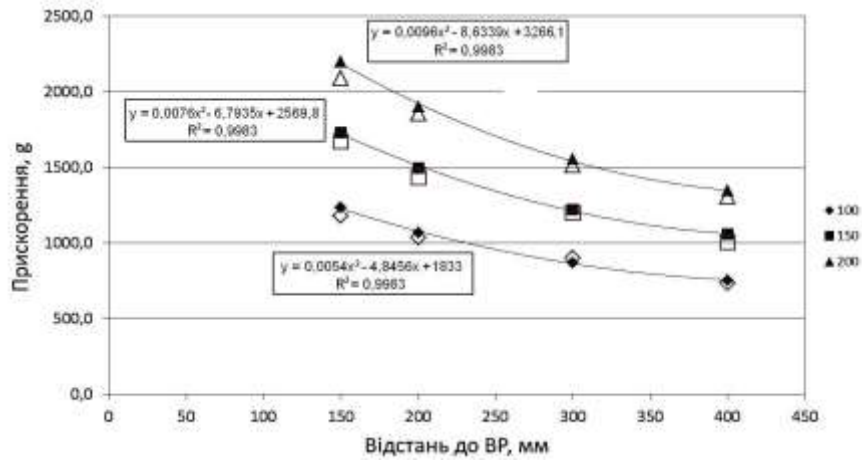


Рис. 8 – Порівняння прогинів відсканованого на 3D сканері макета ЗПМЕ (а) та отриманих результатів, при числовому моделюванні (б)

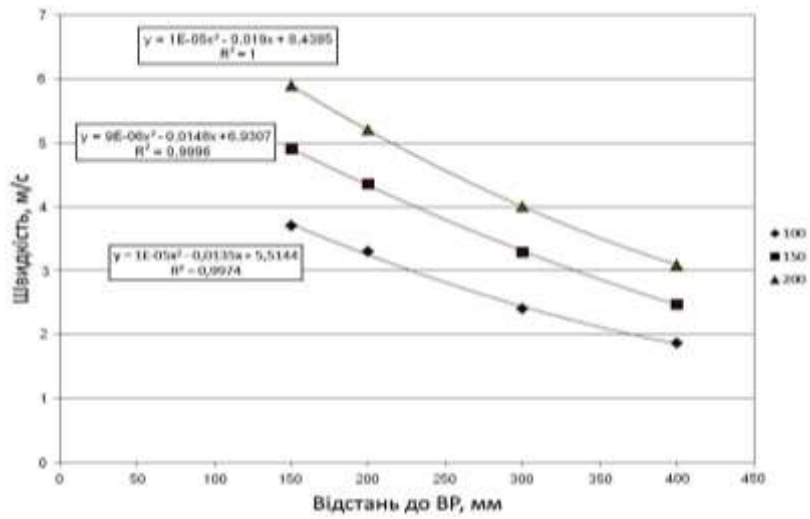


а)

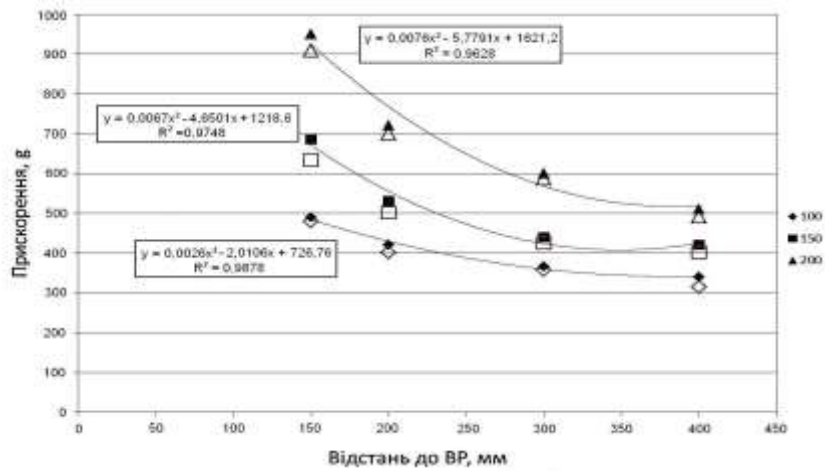


б)

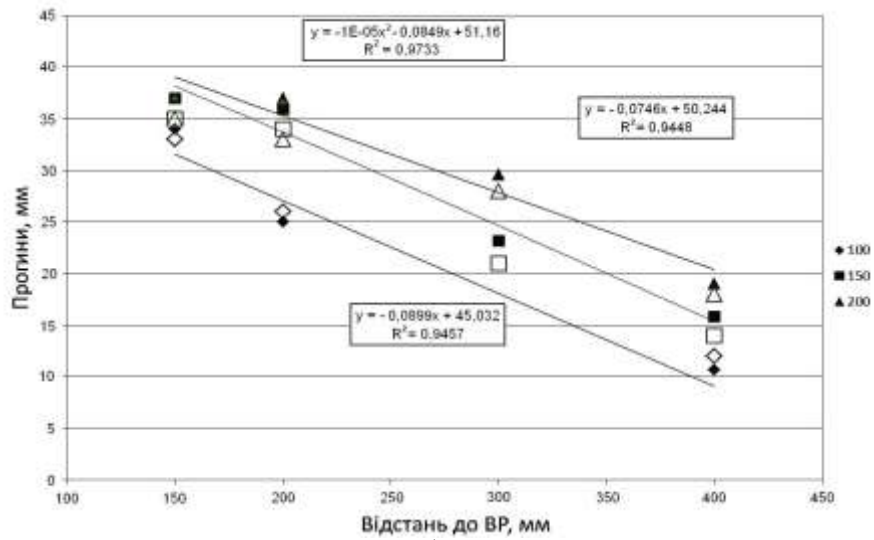
Рис. 9 – Зміна швидкості (а) та прискорення (б) макета корпусу ББМ з жорстким ЗПМЕ залежно від відстані встановлення ВР та її маси (залиті маркери – числове моделювання, маркери без заливки – натурний експеримент)



а)



б)



в)

Рис. 10 – Зміна швидкості (а) та прискорення (б) макета корпусу ББМ та прогинів пластичного ЗПМЕ залежно від відстані встановлення ВР та її маси (залиті маркери – числове моделювання, маркери без заливки – натурний експеримент)

Таблиця 2 – Значення прискорення в центрі макета корпусу ББМ

№	Матеріал	Маса ВР, кг	Н, мм	Товщина ЗПМЕ, мм,	Прискорення в центрі макета корпусу ББМ, g	Відбиваюча поверхня під сталеву плитою
1	Броньова сталь	0,050	150	10	2970,7	Бетон
2	Броньова сталь	0,200	400	10	4644,7	Бетон
3	Броньова сталь	0,100	150	10	5120,9	Бетон
4	Броньова сталь	0,100	150	10	3598,9	Бетон
5	Броньова сталь	0,100	150	10	3759,4	Бетон
6	АМг6, відпалений	0,100	150	7	156,3	Бетон
7	АМг6, прискорено охолоджений	0,100	150	7	214,8	Бетон
8	АМг6НПП (нагартований по поверхні)	0,100	150	7	205,6	Бетон

Кадри підриву макета корпусу наведені на рис. 11.

Таким чином, результати вибухотехнічних випробувань показали, що кращі показники поглинання енергії вибуху забезпечує відпалювання деталей зі сплавів системи Al-Mg, зокрема, АМг6. При цьому використання будь-якого з розглянутих ЗПМЕ з алюмінієвого сплаву АМг6 забезпечило у 20 – 25 разів кращі показники у порівнянні із ЗПМЕ з броньової сталі.

Задача формоутворення ПЕПЕ з порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів може бути вирішена способом пресування з наступним спіканням чи без такого. Модельні зразки ПЕПЕ наведені на рис. 12.

З урахуванням даних роботи [6], в якій показано, що розміри комірки сотових конструкцій ЗПМЕ і, відповідно ПЕПЕ, не повинні перевищувати в плані 500 мм×500 мм. За даними копрових випробувань модельних зразків ПЕПЕ, які наведені у роботі [7], максимальний тиск пресування може скласти до 33 МПа, що становить 0,825 МН (825 тс) для максимальних розмірів ПЕПЕ у плані. Пресування бажано здійснювати на гідравлічних пресах, які забезпечують квазістатичне навантаження. Преси з таким і більшим зусиллям наявні на багатьох машинобудівних заводах. З урахуванням того, що розміри у плані повинні бути більші за висоту, щоб уникнути появи значних напружень зсуву і передчасного руйнування ПЕПЕ при підриві на МВП, товщина елемента буде меншою, ніж 500 мм. З урахуванням того, що при пресуванні порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів, диспергованих струменем води, фізико-механічні властивості пресованого виробу мало залежать від напрямку пресування, існує можливість пресування в напрямі, перпендикулярному бічній поверхні. Це дозволить зменшити зусилля пресування до значень від 0,4 МН (400 тс) до 0,63 МН (630 тс) і застосовувати для виготовлення ПЕПЕ ще більшу кількість обладнання. В разі необхідності після пресування може бути здійснене спікання у повітряній або захисній атмосфері, а також у вакуумі.

Таким чином, основною операцією з формоутворення ПЕПЕ є пресування. Розміри ПЕПЕ та встановлені експериментально значення тиску пресування дозволяють використовувати для їх виготовлення широко розповсюджене технологічне обладнання.



Рис. 11 – Кадри підриву макета корпусу ББМ



Рис. 12 – Модельні зразки ПЕПЕ з порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів [7]

З'єднання ПЕПЕ з несучими елементами ЗПМЕ може бути здійснене кількома способами. Перший з них – спікання. ПЕПЕ розташовується у комірці стільникової конструкції ЗПМЕ і вся конструкція піддається нагріванню у печі до температури спікання порошків алюмінію або алюмінієвих сплавів. Такий спосіб вимагає високої точності виготовлення як ПЕПЕ, так і несучих деталей, термічних печей з великими розмірами робочого простору і відпрацювання режимів спікання. Головним же недоліком є потужний термічний вплив на несучі деталі ЗПМЕ, який позбавляє їх забезпечених попередньою обробкою фізико-механічних властивостей. Другий спосіб – з розміщенням ПЕПЕ в еластичній матриці з еластомерного матеріалу і розташуванням цієї матриці між пластинами з алюмінієвого сплаву. Цей спосіб також вимагає високої точності виготовлення ПЕПЕ і отворів в еластичній матриці. Третій спосіб – приклеювання. ПЕПЕ і несучі деталі з'єднуються за допомогою клею, бажано холодного твердіння, щоб уникнути термічного впливу на металеві деталі. Клей може бути на основі каучуку, поліуретану, мінеральний. Бажано використовувати клеї, які мають високі пружні властивості і теплостійкість, через можливість термічного впливу в процесі експлуатації. Цей спосіб є найбільш технологічним і дозволяє забезпечити міцне з'єднання ПЕПЕ з несучими елементами ЗПМЕ.

Можуть бути використані комбіновані ЗПМЕ закритого та відкритого типу. Вибір конкретної конструкції ЗПМЕ та його елементів залежить від призначення ББМ та її конструкції в цілому. Для приєднання ЗПМЕ будь-якого типу до корпусу ББМ можуть бути застосовані болтові з'єднання.

ЗПМЕ закритого типу складається з двох металевих пластин, наприклад, з алюмінієвого сплаву системи Al-Mg, які нероз'ємно з'єднані з ПЕПЕ. Модельний зразок комбінованого ЗПМЕ закритого типу наведений на рис. 13.

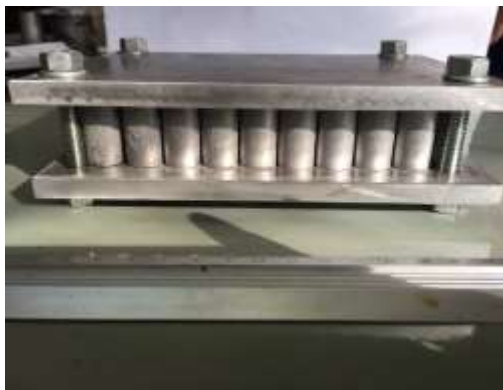


Рис. 13 – Модельний зразок комбінованого ЗПМЕ закритого типу

ЗПМЕ відкритого типу це металева пластина, до якої нероз'ємно при'єднані ПЕПЕ. Модельний зразок комбінованого ЗПМЕ відкритого типу наведений на рис. 14.



Рис. 14 – Модельний зразок комбінованого ЗПМЕ відкритого типу

Висновки. Для забезпечення необхідних фізико-механічних характеристик несучих деталей ЗПМЕ з алюмінієвих сплавів системи Al-Mg найкраще підходить відпалювання.

Для формоутворення і структуроутворення пористих енергопоглинаючих елементів доцільно використовувати пресування з тиском до 33 МПа. Для виконання цієї операції може бути використане широко розповсюджене на машинобудівних підприємствах обладнання.

Для з'єднання пористих енергопоглинаючих елементів з несучими деталями захисних протимінних екранів найбільш доцільно використовувати склеювання.

Після окремих випробувань зразків матеріалів для несучих деталей і пористих енергопоглинаючих елементів доцільно переходити до відпрацювання комбінованих конструкцій захисних протимінних екранів для бойових броньованих машин різного призначення.

Дослідження виконані за рахунок фінансування за бюджетною програмою «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень (КПКВК 6541230) на 2023 – 2024 роки».

1. Давидовський Л. С., Бісик С. П. Аналіз механогенезу травмування екіпажу бойових броньованих машин при підриві на мінно-вибухових пристроях. Військово-технічний збірник. Академія Сухопутних військ Збройних Сил України. Львів. 2015. № 13. С. 34–40. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.13.2015.34-40>
2. Бісик С. П., Давидовський Л. С., Хабицький В. Р. Критерії травмування організму людини при ударному та вибуховому навантаженні. Системи озброєння і військова техніка. Харків. 2015. № 1 (41). С. 153–159. <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2511>

3. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хоменко В. П. Дослідження конструктивних особливостей та тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин типу MRAP. Системи озброєння і військова техніка. Харків. 2018. № 1(53). С. 7–19.
4. Bisuk S. P. Дослідження конструкції захисного протимінного екрана. Військово-технічний збірник. 2015. № 12. С. 110–117. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.12.2015.110-117>
5. Бісик С. П., Чепков І. Б., Голуб В. А., Корбач В. Г. Оцінка впливу способу кріплення протимінного екрана на протимінну стійкість бойових броньованих машин. Системи озброєння і військова техніка. Харків. 2013. № 1(33). С. 8–12.
6. Бісик С. П., Голуб В. А., Ларін О. Ю., Чеченкова О. Л. Числове моделювання вибухового навантаження модульних сотових конструкцій бойових броньованих машин. Вісник НТУ «ХПІ». Харків. 2013. № 23 (996). С. 26–33.
7. Лебнянський О. Ф., Бісик С. П., Санін А. Ф., Пошивалов В. П. Визначення придатності пористих пресовок з алюмінію та алюмінієвих сплавів для використання в якості ударопоглинаючих елементів. Технічна механіка. 2020. № 4. С. 109–116. <https://doi.org/10.15407/itm2020.04.109>
8. Кузьмицкая А. И., Жданов В. С., Пошивалов В. П. Влияние мгновенного охлаждения на физико-механические свойства алюминиевого сплава АМг6 после высокотемпературной выдержки. Техническая механика. 2016. № 2. С. 128–136.
9. Алюминий: свойства и физическое металловедение. Справочник. Под ред. Хэтча Дж. Е. М.: Металлургия, 1989. 422 с.
10. Пошивалов В. П., Кузьмицкая А. И., Телегіна І. І. Підвищення фізико-механічних характеристик сплавів системи Al-Mg для конструктивного захисту транспортних засобів. Технічна механіка. 2019. № 4. С. 119–126. <https://doi.org/10.15407/itm2019.04.119>
11. Соболевская М. Б., Сирота С. А. Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2015. № 1. С. 84–96.
12. Соболевская М. Б., Горобец Д. В., Сирота С. А. Определение характеристик препятствий для нормативных сценариев столкновений пассажирских поездов. Технічна механіка. 2018. № 2. С. 90–102. <https://doi.org/10.15407/itm2018.02.090>
13. Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Горобец Д. В., Маркова О. М., Ковтун Е. Н., Малый В. В., Хижа И. Ю. Разработка решений по повышению безопасности железнодорожных перевозок и пассивной защите пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Технічна механіка. 2018. № 3. С. 98–111. <https://doi.org/10.15407/itm2018.03.098>
14. Соболевская М. Б., Горобец Д. В. Анализ взаимодействия пассажирского поезда с системой пассивной безопасности и большого дорожного транспортного средства при столкновении. Технічна механіка. 2019. № 1. С. 94–106. <https://doi.org/10.15407/itm2019.01.094>
15. Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Горобец Д. В., Богомаз Е. Г. Разработка элементов пассивной защиты скоростных пассажирских локомотивов нового поколения при аварийных столкновениях на железных дорогах колеи 1520 мм. Технічна механіка. 2017. № 1. С. 72–82. <https://doi.org/10.15407/itm2017.01.072>

Отримано 23.01.2023,
в остаточному варіанті 30.03.2023