### Є.Є. Лашко, О.О. Ченчева, С.В. Сукач, С.В. Шлик, В.В. Дяченко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна

# МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ВИБУХОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ КУЗОВА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО БРОНЬОВАНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті розглядається моделювання динамічного вибухового навантаження кузову спеціалізованого броньованого транспорту в системі Ansys AUTODYN. Установлено відповідність протимінної стійкості кузова вимогам STANAG 4569 — рівень ІІ, рівні 3b, 4b (повністю), рівні 3a, 4a (частково). Підтверджено стійкість кузова до підриву заряду масою 6 кг при розташуванні заряду під переднім колесом і центром автомобіля.

Ключові слова: моделювання, вибухове навантаження, імпульсний вплив, спеціалізований броньований транспорт, протимінна стійкість.

## Постановка проблеми

Наразі в умовах триваючої російської військової агресії розмінування територій є пріоритетним питанням у деокупованих областях. За попередніми оцінками [1] близько 160 тисяч квадратних кілометрів територій України потребує розмінування. російська федерація використовує як застарілі боєприпаси, так і нові засоби вражень. На деокупованих територіях виявляють велику кількість саморобних боєприпасів і встановлення мінних пасток, зокрема у населених пунктах, що становить дуже велику небезпеку для місцевих мешканців.

заходів з розмінування Дo небезпечних територій залучаються піротехнічні підрозділи ДСНС, вибухотехнічні групи Національної поліції, Національної гвардії, Збройних Сил України та Державної спеціалізованої служби транспорту. Допомога також надходить і від міжнародних партнерів України, зокрема, у вигляді спеціальної техніки, засобів бронезахисту, металодетекторів, інструментів для розмінування та знешкодження боєприпасів.

Запропонований у роботі апарат інженерного моделювання розрахунку параметрів імпульсної ударної хвилі та її взаємодії з навантажуваною поверхнею є дієвим та ефективним у міцнісних розрахунках балістичної стійкості елементів бронетехніки та легкого бронезахисту.

Ефективність та достовірність запропонованої методики перевірялась при оцінюванні стійкості конструкції броньованого корпусу спеціального транспорту до вибухового навантаження, викликаного підривом вибухової речовини фугасної дії. На основі виконаних досліджень параметрів формозміни матеріалу кузова під дією вибухового навантаження у роботі проведено з'ясування механізмів руйнування кузова для встановлення відповідності протимінної стійкості транспорту угоді зі стандартизації NATO AEP-55 STANAG 4569 [2].

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [3] розглянуто основні напрямки підвищення рівня захищеності легкоброньованої техніки використанням сучасних систем 3 бронезахисту. Зокрема, актуальним на сьогодні є можливість створення м'якої броні, яка характеризується простотою конструкції, не вимагає спеціальних сплавів і їх термообробки та є високоефективною. Створення м'якої броні передбачає наявність бронепакета та бронеелементів спеціальної сферичної форми із заданим діаметром сфери. Це дає змогу розподілити енергію кулі внаслідок поширення ударної хвилі по всьому об'єму бронепакета.

В іншій роботі [4] визначено основу створення надійного бронезахисту легкоброньованих машин це розробка нових перспективних конструкцій комбінованого захисту із застосуванням нових броньових матеріалів і їх різних варіантів. Автори наводять варіанти систем додаткового бронезахисту як закордонних виробників, так і вітчизняні розробки. Нові системи мають у своєму складі кілька спеціальних матеріалів, які відрізняються між собою широким набором фізико-механічних властивостей. Використання такого захисту разом з основним бронюванням може забезпечити зниження масових показників машини. Отже, створення нових конструкцій бронеелементів iз використанням найсучасніших технологій призведе до суттєвого підвищення захисних характеристик бронезахисту легкоброньованої техніки.

Підвищенню техніко-економічних показників технологічних процесів імпульсної обробки металів і

діагностики на основі засобів ïχ розвитку теоретичних основ формозміни під дією імпульсного впливу та розрахунку енергосилових параметрів присвячені роботи [5-8]. Саме процеси імпульсного вибухового навантаження у явній постановці були покладені в основу розробки математичної моделі імпульсного навантаження матеріалів ударною хвилею, утвореною внаслідок детонації заряду речовини, математичного вибухової розробки апарату розрахунку параметрів ударної хвилі, створення аналітичних залежностей взаємодії ударної хвилі з навантажуваною поверхнею.

#### Мета статті

Метою даної роботи є моделювання динамічного вибухового навантаження кузову спеціалізованогоного броньованого транспорту в системі Ansys AUTODYN.

#### Виклад основного матеріалу

Наразі фактичним стандартом для броньованих транспортних засобів військового чи спеціального призначення є відповідність класу MRAP (Mine Resistant Ambush Protected – захищений від підриву й атак із засідок) [9]. Протимінний захист транспортних засобів цього класу забезпечується V-подібною (клиноподібною) формою нижньої частини корпусу, підвищеною міцністю днища та застосуванням енергопоглинаючих сидінь. Цільовим призначенням бронекорпусу з V-подібним днищем є збільшення протимінної стійкості та підвищення виживання екіпажу на полі бою за рахунок відхилення в бічному напрямку фугасної дії (імпульсу тиску продуктів вибуху) при підриві під корпусом машини мін різного призначення, або саморобних вибухових пристроїв (за термінологією НАТО – IED, Improvised Explosive Device) [10]. Таке рішення, крім перерозподілу вивільненої енергії вибуху, забезпечує збільшення дорожнього просвіту та висоти днища.

Договір по стандартизації NATO AEP-55 STANAG 4569 визначає необхідним для транспортних засобів класу MRAP захист екіпажу при підриві протитанкової міни фугасної дії (маса заряду – 6 кг у тротиловому еквіваленті) під будьяким з коліс або гусеницею та під центром днища.

У цьому дослідженні проводиться теоретична оцінка шляхом моделювання протимінного захисту кузова броньованих автомобілів при підриві вибухової речовини (ВР) масою 6 кг у тротиловому еквіваленті. Розглядаються три випадки: підрив заряду під переднім колесом, заднім колесом і під центром автомобіля. Оцінка протимінної стійкості проводилася відповідно погодження зі стандартизації NATO AEP-55 STANAG 4569. У розрахункову систему входять: атмосферне повітря, спрощена модель кузова транспортного засобу (рис. 1), заряд ВР та масив грунту (рис. 2, а). Місця розміщення заряду відносно кузова у моделі показані на рис. 2, б.



Рис. 1. Спрощена геометрична модель корпусу та її будова у контурному відображенні

Корпус зразка являє собою кузов цільного типу несучої конструкції, зібраний із 8-мм сталевих бронелистів Quardian 500. Конструкція кузова та застосований матеріал забезпечує протимінний захист у вигляді стійкості до вибуху двох мін ТМ-57 під будь-яким колесом, що відповідає вибухам, еквівалентним 14 кг тротилу, та однієї міни ТМ-57 під днищем (7 кг тротилу). Балістичний захист екіпажу забезпечується бронею, що відповідає B6+/STANAG 4569 рівень 2. Quardian 500 застосовується у громадській галузі (захист посольств, урядових, громадських будівель і банківських установ), галузі спеціального захисту та військовому застосуванні (бронювання гелікоптерів, човнів, машин розмінування та бронетранспортерів).

Маса заряду вибухової речовини у моделі задавалася шляхом зміни розмірів та об'єму моделі заряду (табл. 1). Параметри моделі вибухової речовини наведені у табл. 2.



Рис. 2. Загальний вигляд розрахункової СЕ-моделі (заряд ВР розташований під лівим переднім колесом автомобіля) (а), місця розташування заряду ВР відносно кузова при моделюванні: №1 – під лівим переднім колесом; №2 – під лівим заднім колесом; №3 – під центром автомобіля (б)

Таблиця 1

Параметри скінченно-елементної моделі вибухової речовини

	Рівень загрози NATO AEP-55 STANAG 4569 (маса заряду)							
	2 (6 кг)	3 (8 кг)	4 (10 кг)	14 кг	20 кг			
Тип вирішувача	Ейлерів							
Габаритні розміри								
1	2	3	4	5	6			
Розмір по осі Х, мм	122	164	204	286	409			
1	2	3	4	5	6			
Розмір по осі Ү, мм	300	300	300	300	300			
Розмір по осі Z, мм	100	100	100	100	100			
Масо-габаритні властивості								
Об'єм, мм <sup>3</sup>	$3,66 \cdot 10^{6}$	$4,92 \cdot 10^{6}$	$6,12 \cdot 10^{6}$	$8,58 \cdot 10^{6}$	$1,227 \cdot 10^7$			
Маса, кг	5,9658	8,0196	9,9756	13,985	20			
Момент інерції Ір1, кг·мм <sup>2</sup>	49715	66830	83130	$1,1655 \cdot 10^5$	$1,6667 \cdot 10^5$			
Момент інерції Ір2, кг·мм <sup>2</sup>	12371	24658	42908	$1,0698 \cdot 10^5$	$2,9547 \cdot 10^5$			
Момент інерції Ір3, кг·мм <sup>2</sup>	52143	78122	$1,0941 \cdot 10^5$	$2,0022 \cdot 10^5$	$4,288 \cdot 10^5$			
СЕ-сітка								
Вузлів	672	810	840	780	770			
Елементів	450	560	585	528	520			

Таблиця 2

Параметри розрахункової СЕ-моделі вибухового навантаження кузова броньованого транспорту

	Матеріал						
	Quardian 500	Ґрунт	Повітря (атм.)				
Тип вирішувача	Лагранжів		Ейлерів				
Габаритні розміри							
Розмір по осі Х, мм	2126	2304	2304				
Розмір по осі Ү, мм	5876	7876	7876				
Розмір по осі Z, мм	1607	1000	3011				
Масо-габаритні властивості							
Об'єм, мм <sup>3</sup>	5,1861·10 <sup>8</sup>	$1,8134 \cdot 10^{10}$	$5,4639 \cdot 10^{10}$				
Маса, кг	4060,7	44247	66,932				
Центроїда по осі Х, мм	5,9953·10 <sup>-8</sup>	-88,371	-89				
Центроїда по осі Ү, мм	-3123,6	-2952,4	-2950				

			Продовження таблиці 2				
Центроїда по осі Z, мм	935,28	-668,3	337,5				
Момент інерції Ір1, кг мм <sup>2</sup>	$1,4598 \cdot 10^{10}$	2,3219.1011	3,9656·10 <sup>8</sup>				
Момент інерції Ір2, кг мм <sup>2</sup>	3,659·10 <sup>9</sup>	$2,3244 \cdot 10^{10}$	$8,0177 \cdot 10^7$				
Момент інерції Ір3, кг мм <sup>2</sup>	$1,5317 \cdot 10^{10}$	2,4806.1011	3,756·10 <sup>8</sup>				
СЕ-сітка							
Вузлів	19329	1881	6840				
Елементів	58852	7848	5698				

Розглянемо результати, отримані при розміщенні заряду масою 6 кг у точці №1.

Як видно з рис. 3, а, при досягненні розрахункового часу моделювання 2 мс, внутрішня енергія детонації вибухової речовини повністю вичерпується.

Графік показує кореляцію на рис. 2, б енергії вибухової внутрішньої речовини та внутрішньої загальної накопиченої i енергії розрахункової системи. Як видно з наведених кривих, вказані показники знаходяться між собою у прямій залежності.

Наявність накопиченої загальної енергії зумовлюється кінетичною енергією кузова (рис. 2, в), що, втім, зменшується по досягненню межі розрахункового часу. Накопичена кінетична енергія зумовлена наявністю моменту сил, діючого на кузов (рис. 2, г). Як видно з рисунків рис. 2, г та 4 рис. 2, д, момент сил і швидкості переміщень кузова відносно осей координат на певному відрізку часу перестають змінюватися та набувають усталеного характеру.

Як видно з рисунку рис. 2, е, у той же момент часу перестає змінюватись робота пластичної деформації кузова зразка. Найбільших швидкостей переміщень кузов зазнає відносно осей X і Z – це означає, що приблизно після 1,6 мс з моменту ініціації вибуху деформація кузова припиняється, а кузов внаслідок дії вибухової хвилі намагається перекинутися на правий бік.





Рис. 3. Графік зміни внутрішньої енергії вибухової речовини (а), графік кореляції внутрішньої енергії вибухової речовини (чорна суцільна лінія), загальної внутрішньої (блакитний пунктир) і повної накопиченої енергії розрахункової системи (зелені крапки) (б), графік зміни кінетичної енергії кузова зразка (в), момент, що діє на кузов зразка, розкладений за осями координат (г), швидкості кузова зразка відносно осей координат (д), графік зміни роботи пластичної деформації кузова зразка (е)

Наведені епюри тиску вибухової хвилі (рис. 4) показують зміну тиску, що зазнає кузов зразка. Як видно з епюр, до кінця розрахункового часу здійснюваний тиск нормалізується багато в чому завдяки затіканню ударної хвилі всередину кузова, а найбільш навантаженою частиною кузова (рис. 5–8)  $\epsilon$  ліва стійка лобового скла та передній край даху автомобіля. Найбільший прогин кузова становить 4,166 мм.



Рис. 4. Епюри розподілу тиску вибухової хвилі на кузов зразка (вибухова хвиля показана) у момент часу: a - 0,8 мс; 6 - 0,8083 мс; B - 1,6 мс;  $\Gamma - 2$  мс

Комунальне господарство міст, 2022, том 6, випуск 173 ISSN 2522-1809 (Print); ISSN 2522-1817 (Online)





Рис. 5. Епюри розподілу еквівалентних (за Мізесом) напружень у кузові зразка у момент часу: а – 0,8 мс; б – 1,2 мс; в – 1,6 мс; г – 2 мс



Рис. 6. Епюри осьових деформацій кузова зразка відносно осі X у момент часу: а-0,8мс; б-1,2мс; в-1,6мс; г-2мс



Рис. 7. Епюри осьових деформацій кузова зразка відносно осі Z у момент часу: а- 0,8 мс; б- 1,2 мс; в- 1,6 мс; г- 2 мс



Рис. 8. Епюри розподілу абсолютних деформацій кузова зразка у момент часу: а- 0,8 мс; б- 1,2 мс; в- 1,6 мс; г- 2 мс

Розглянемо результати, отримані при розміщенні заряду масою 6 кг у точці №2.

Як видно з рисунку рис. 9, а, при досягненні розрахункового часу моделювання у 2 мс, внутрішня енергія детонації вибухової речовини майже повністю вичерпується.

Графік на рисунку рис. 3, б показує кореляцію енергії вибухової внутрішньої речовини та внутрішньої і загальної накопиченої енергії розрахункової системи. Як видно з наведених кривих, вказані показники знаходяться між собою у прямій залежності. Загальна накопичена енергія короткочасно збільшується у зв'язку з детонацією вибухової речовини, а потім стрімко зменшується. Загальна внутрішня енергія падає разом зі внутрішньою енергією вибухової речовини.

Як видно з рис. 3, в–д, момент і швидкість переміщень кузова вздовж осей координат знижуються одночасно з кінетичною енергією кузова. До часу приблизно 1,3 мс з моменту детонації вибухової речовини на кузов діють значні перекидаючі зусилля, які прагнуть перекинути кузов на правий бік. Після цього момент і швидкості стрімко знижуються. У той же час швидкість кузова вздовж осі Y залишається весь час нульовою та незмінною, що говорить про те, що протягом дії вибухової хвилі кузов у повздовжньому напрямку не переміщується.

Як видно з рисунку рис. 3, е, графік роботи пластичної деформації досягає свого піку приблизно через 0,5 мс з моменту детонації вибухової речовини, після чого стрімко знижується у вигляді трьох «сходинок». Остання «сходинка» наступає при досягненні 1,3 мс з моменту детонації та графік досягає свого мінімуму. Отримані результати свідчать про те, що з моменту 1,3 мс після детонації деформації кузова зразка припиняються, а кузов зміщується у правий бік під дією вибухової хвилі зі швидкістю, що знижується.





Рис. 9. Графік зміни внутрішньої енергії вибухової речовини (а), графік кореляції внутрішньої енергії вибухової речовини (чорна суцільна лінія), загальної внутрішньої (блакитний пунктир) і повної накопиченої енергії розрахункової системи (зелені крапки) (б), графік зміни кінетичної енергії кузова зразка (в), момент, що діє на кузов зразка, розкладений за осями координат (г), швидкості кузова зразка відносно осей координат (д), графік зміни роботи пластичної деформації кузова зразка (е)

Наведені на рис. 10–14 епюри показують вплив вибухової хвилі, що зазнає кузов. Як видно з епюр, до кінця розрахункового часу здійснюваний тиск хвилі нормалізується багато в чому завдяки затіканню ударної хвилі всередину кузова через двері десантного відсіку та бійниці лівого борту, а також подальшого її вивільнення через отвори у даху кузова та бійниці правого борту. Це спричиняє те, що протягом певного часу з моменту детонації найбільш навантаженою частиною кузова є правий борт кузова, протилежний розташуванню заряду. Найбільших деформацій зазнає задня частина лівого борту, яка вгинається всередину на 2,379 мм, та задня частина даху, який вигинається назовні (дах набуває опуклої форми) на 10,27 мм.



Рис. 10. Епюри розподілу тиску вибухової хвилі на кузов зразка (вибухова хвиля показана) у момент часу: а – 0,8 мс; б – 0,8083 мс; в – 1,6 мс; г – 2 мс





Рис. 11. Епюри розподілу еквівалентних (за Мізесом) напружень у кузові зразка у момент часу: а – 0,8 мс; б – 1,2 мс; в – 1,6 мс; г – 2 мс



Рис. 12 Епюри осьових деформацій кузова зразка відносно осі X у момент часу: а-0,8 мс; б-1,2 мс; в-1,6 мс; г-2 мс





Рис. 13. Епюри осьових деформацій кузова зразка відносно осі Z у момент часу: а- 0,8 мс; б- 1,2 мс; в- 1,6 мс; г- 2 мс



Рис. 14. Епюри розподілу абсолютних деформацій кузова зразка у момент часу: а-0,8 мс; б-1,2 мс; в-1,6 мс; г-2 мс

Розглянемо результати, отримані при розміщенні заряду масою 6 кг у точці №3.

Як видно з рисунку рис. 15, а, при досягненні розрахункового часу моделювання у 2 мс, внутрішня

енергія детонації вибухової речовини майже повністю вичерпується.

З рисунків рис. 15, б–д видно, що внутрішня та повна накопичена енергія розрахункової системи знижується разом зі внутрішньою енергією вибухової речовини. Момент і швидкість переміщень кузова вздовж осей координат X і Y впродовж усього розрахункового часу є нульовими та незмінними. В той же час швидкість кузова вздовж осі Z стрімко зростає приблизно до 0,7 мс після детонації, після чого зростає з меншою інтенсивністю – кузов під дією вибухової хвилі рухається вгору. Кінетична енергія кузова також досягає свого піку у цей момент часу, після чого, незважаючи на деякі стрибки, постійно падає.

Як видно з рисунку рис. 15, е, графік роботи пластичної деформації досягає свого піку приблизно через 0,7 мс з моменту детонації вибухової речовини, після чого знижується у вигляді майже горизонтальних майданчиків.

Це означає, що з цього моменту часу пластична деформація кузова припиняється, а кузов без подальших деформацій рухається вгору під дією вибухової хвилі.



Рис. 15. Графік зміни внутрішньої енергії вибухової речовини (а), графік кореляції внутрішньої енергії вибухової речовини (чорна суцільна лінія), загальної внутрішньої (блакитний пунктир) і повної накопиченої енергії розрахункової системи (зелені крапки) (б), графік зміни кінетичної енергії кузова зразка (в), момент, що діє на кузов зразка, розкладений за осями координат (г), швидкості кузова зразка відносно осей координат (д), графік зміни роботи пластичної деформації кузова зразка (е)



На рис. 16-20 показані епюри розподілу тиску,

навантаження та деформацій.

Рис. 16. Епюри розподілу тиску вибухової хвилі на кузов зразка (вибухова хвиля показана) у момент часу: a - 0,8 мс; 6 - 0,8083 мс; B - 1,6 мс;  $\Gamma - 2$  мс



Рис. 17. Епюри розподілу еквівалентних (за Мізесом) напружень у кузові зразка у момент часу: а -0,8 мс; б-1,2 мс; в-1,6 мс; г-2 мс





6

Рис. 18 Епюри осьових деформацій кузова зразка відносно осі X у момент часу: а – 0,8 мс; б – 1,2 мс; в – 1,6 мс; г – 2 мс



Рис. 19. Епюри осьових деформацій кузова зразка відносно осі Z у момент часу: а - 0,8 мс; б- 1,2 мс; в- 1,6 мс; г- 2 мс





Рис. 20. Епюри розподілу абсолютних деформацій кузова зразка у момент часу: а – 0,8 мс; б – 1,2 мс; в – 1,6 мс; г – 2 мс

Отже, встановлена шляхом числового моделювання відповідність протимінної стійкості кузова спеціалізованого броньованого транспорту вимогам STANAG 4569 – рівень ІІ, рівні 3b, 4b (повністю), рівні 3a, 4a (частково). Установлена стійкість кузова до підриву заряду масою 6 кг при розташуванні заряду під переднім колесом і центром автомобіля.

Варто зазначити, що у цій роботі розглядається механізм і умови утворення та поширення руйнувань досліджуваної моделі кузова. Як зазначалося раніше. числове моделювання динамічного вибухового навантаження кузова проводилося використанням спрощеної 3 геометричної моделі кузова без урахування приєднаної маси та конструкцій автомобіля (наприклад, шасі, моторного відсіку тощо). Отримані значні навантаження на дах кузова, а також борт, протилежний розташуванню заряду вибухової речовини, що призводили до їх вигину назовні, зумовлені затіканням і поширенням оскільки всередині кузова вибухової хвилі, спрощена модель кузова не передбачала врахування наявності дверей і скління. У якості моделі ґрунту задавалися властивості лісовидного суглинку. У розрахунковій моделі не враховувалися елементи конструкції оболонки заряду вибухової речовини. Можна припустити, що при детонації вибухової речовини, заглибленої в інший тип ґрунту, здатність якого до поглинання або відбиття вибухової хвилі та/або уламкоутворення буде відрізнятися від

прийнятого у розрахунках, з урахуванням особливостей конструкції кузова, або в разі негомогенності або невідповідності властивостей матеріалу кузова заявленим, результати враження кузова автомобіля вибуховою хвилею будуть відрізнятися від отриманих у цій роботі.

### Висновки

результаті виконаного У комплексного дослідження зроблено інженерне моделювання протимінної стійкості кузовів спеціалізованого броньованого транспорту згідно вимог договору по стандартизації NATO AEP-55 STANAG 4569 детонація заряду вибухової речовини масою 6 кг під кожним колесом і центром автомобіля. Отримані дані можуть використовуватися для оцінювання захисту екіпажів машин і підвищення рівня тактикотехнічних характеристик при розмінуванні небезпечних територій у процесі післявоєнної відбудови в Україні.

#### Література

1. Комісія ТЕБ та НС розглянула питання розмінування територій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.kmu.gov.ua/news/komisiia-teb-ta-ns-rozghlianula -pytannia-rozminuvannia-terytorii (дата звернення 17.11.2022)

2. Industry Ballistic and Stab Resistant Standards – Craig International Ballistics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ballistics.com.au/wp-content/uploads/2020/ 05/NATO\_AEP-55\_STANAG\_4569\_standards.pdf (дата звернення 17.11.2022) 3. Королько С.В. Аналіз і оцінка можливостей застосування сучасних матеріалів для броньованої техніки та захисту особового складу від ураження. [Текст] / С.В. Королько // Системи озброєння і військова техніка. – № 2. – 2015. С. 163–167.

4. Подригало М.А. Аналіз додаткового бронезахисту легкоброньованої техніки Збройних Сил України та іноземних держав. [Текст] / М.А. Подригало, Д.С. Баулін, С.А. Горслишев, С.А. Манжура, М.І. Ільченко, М.П. Одейчук Г.В Іванець, І.В. Віштак // Вісник машинобудування та транспорту. – Вип. 14(2). – 2021. С. 89–96. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-89-96

5. Shlyk S. The Explosive Expansion of Electrical Equipment Housings with Variable Curvature. [Text] / S. Shlyk, V. Drahobetskyi, O. Trotsko, O. Chencheva, D. Klets // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). – 2020. pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/ PAEP49887.2020.9240822

6. Yang Cao. Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. [Text] / Cao Yang, Ni Song, Liao Xiaozhou, Song Min, Zhu Yuntian // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2018. pp. 1–59. https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.001

7. Bagherpour E. An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications. [Text] / E. Bagherpour, N. Pardis, M. Reihanian et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – Vol. 100. – 2019. pp. 1647–1694. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2652-z

8. Segal V. Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). [Text] / V. Segal // Materials. – 2018. 11(7):1175. https://doi.org/10.3390/ma11071175

9. Mine Resistant Ambush Protected (MRAP) Vehicle Program [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/mrap. htm (дата звернення 17.11.2022)

10. The Evolution of Improvised Explosive Devices (IEDs) [Електронний pecypc]. – Режим доступу: https://www.brookings.edu/articles/the-evolution-of-

improvised-explosive-devices-ieds/ (дата звернення 17.11.2022)

#### References

1. The commission on TES and ES considered the issue of demining territories. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/ komisiia-teb-ta-ns-rozghlianula-pytannia-rozminuvannia-terytorii

2. Industry Ballistic and Stab Resistant Standards – Craig International Ballistics. URL: https://ballistics.com.au/wpcontent/uploads/2020/05/NATO\_AEP-55\_STANAG\_4569\_ standards.pdf

3. Korolko S. V. (2015). Stitutionalism opportunities and evaluation of modern materials and equipment for protection armored personnel from injuries. *Systems of Arms and Military Equipment*. No. 2. pp. 163–167.

4. Podrigalo M., Baulin D., Horielyshev S., Manzhura S., Ilchenko M., Odeychuk M., Ivanets H., Vishtak, I. (2021). Analysis of additional armor protection for lightly armored vehicles of the armed forces of Ukraine and foreign states. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. Vol. 14(2). pp. 89–96. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-89-96

5. Shlyk S., Drahobetskyi V., Trotsko O., Chencheva O., Klets D. (2020). The Explosive Expansion of Electrical Equipment Housings with Variable Curvature. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (*PAEP*). pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020. 9240822

6. Yang Cao, Song Ni, Xiaozhou Liao, Min Song, Yuntian Zhu. (2018). Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: R: Reports.* pp. 1–59. https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.001

7. Bagherpour E., Pardis N., Reihanian M. et al. (2019). An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 100. pp. 1647–1694. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2652-z

8. Segal V. (2018). Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). *Materials*. 11(7):1175. https://doi.org/10.3390/ma11071175

9. Mine Resistant Ambush Protected (MRAP) Vehicle Program URL: https://www.globalsecurity.org/military/ systems/ground/mrap.htm

10. The Evolution of Improvised Explosive Devices (IEDs) URL: https://www.brookings.edu/articles/the-evolution-of-improvised-explosive-devices-ieds/

Рецензент: доктор технічних наук, доцент, директор навчально-наукового інституту механічної інженерії, транспорту та природничих наук В.С. Бахарєв, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна.

#### Автор: ЛАШКО Євгеній Євгенович

кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського E-mail – evgeny.lashko.lj@gmail.com

ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9691-4648

#### Автор: ЧЕНЧЕВА Ольга Олександрівна

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

E-mail – <u>chenchevaolga@gmail.com</u>

ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5691-7884

### Автор: СУКАЧ Сергій Володимирович

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

*E-mail – sergvs69@ukr.net* 

ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6834-0197

#### Автор: ШЛИК Сергій Вікторович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

E-mail – <u>svshlyk@gmail.com</u>

ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9422-1637

Автор: ДЯЧЕНКО Владислав Володимирович здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського E-mail – <u>inspektorylad23@gmail.com</u> ID ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0003-4662-003X</u>

### SIMULATION OF DYNAMIC EXPLOSIVE LOADING OF THE BODY OF A SPECIALIZED ARMORED VEHICLE

Ye. Lashko, O. Chencheva, S. Sukach, S. Shlyk, V. Diachenko Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine

The aim of the work is a simulation of dynamic explosive loading of the body of a specialized armored vehicle based on the development of theoretical foundations of shape change under the action of pulsed influence and calculation of power parameters.

The further equation of the stress state at the point of the material under the conditions of pulse loading was obtained, the methods for determining the principal stresses and the invariant of the stress tensor considering the pulse nature of the load were established. The nature of the formed shock wave behavior due to the detonation of an explosive has been established. Analytical dependencies of the interaction of the shock wave with the loaded surface are made. A mathematical apparatus for calculating such parameters of the shock wave as the pressure of the detonation front and its change in time and the velocity of the shock wave at the time of reaching the surface has been developed.

The authors developed and proposed an iterative procedure that allows determining the current values of stresses and strains passing through the points of the actual stresses curve, as well as the stresses and strains intensity during pulse loading of metals.

A qualitative analysis of the developed models is performed and the values obtained during numerical simulation in the Ansys AUTODYN of the stress-strain state of workpieces during the explosive expansion using an iterative procedure. Using the analytical method proposed in the work, the theoretical calculation of mine resistance of the MPV's bodies was performed in accordance with the requirements of the NATO AEP-55 STANAG 4569 standardization agreement.

The solution to this problem can be used in the future to evaluate the plastic properties of materials during welding and blast hardening; with explosion stamping of blanks and combined welding and explosion stamping operations; with impulse methods of stamping - magnetic-pulse, electro-hydraulic, gas detonation, etc., when parts of the workpiece collide with the matrix, and the other part continues to deform; when stamping on hammers; when crushing materials by the impact of a rigid body; explosion crushing of multicomponent environments; determined ballistic resistance of elements of combat equipment.

Keywords: simulation, explosive loading, impulse impact, specialized armored vehicle, mine resistance.