# Загальні питання

УДК 623.438 DOI: 10.30748/nitps.2018.32.14

С.П. Бісик[1], О.А. Сливінський[2], Л.С. Давидовський[1]

[1] *Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України, Київ*
[2] *НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ТА ХАРАКТЕРУ РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЗІ СТАЛІ НВ 500Mod ПРИ НАВАНТАЖЕННІ ВИБУХОМ

*У статті наведено результати досліджень поведінки та характеру руйнування зварних з'єднань зі сталі НВ 500Mod при навантаженні вибухом. На основі фізико-механічних характеристик сталі НВ 500Mod, згідно з сертифікатами якості, розраховані механічні властивості металу зварного шва та зон термічного впливу. Ці дані отримано шляхом термодинамічного розрахунку за хімічним складом у програмному комплексі JMatPro. З використанням методу скінченних елементів проведено дослідження поведінки зварних з'єднань типу У6 за ГОСТ 14771. При моделюванні заряд вибухової речовини розміщувався в різних точках відносно макету зварного з'єднання. Стійкість зварного з'єднання оцінювалась за значеннями прогинів пластини та наявністю руйнування зварного шва. Крім того, проведено оцінку механізму утворення і кінетики розвитку тріщини у зварному з'єднанні. Значення прогинів порівняно з розрахованими значеннями прогинів умовно-монолітного з'єднання двох пластин. За результатами проведених досліджень, встановлена кінетика тріщиноутворення у зварному з'єднанні при навантаженні вибухом. Виявлено, що осередком руйнування металу зварних з'єднань є ділянка сплавлення – перехідна зона від металу шва до найменш пластичної частини зони термічного впливу – ділянки перегріву. При цьому, зародження тріщини очікувано відбувається по концентратору напружень – в місці переходу від наплавленого металу до основного, як з лицевої сторони шва, так і з боку кореня. Виявлено, що різниця між прогинами в контрольних точках дещо відрізняється залежно від типу зварного з'єднання, що дозволяє зробити висновок про доцільність вибору типу зварного з'єднання для підвищення його стійкості до навантаження вибухом. Результати досліджень можуть бути використанні при розробці методик оцінки протимінної стійкості зразків бойових броньованих машин, оцінки напрямів підвищення стійкості зварних з'єднань до навантаження вибухом.*

***Ключові слова:*** *бойові броньовані машини, протимінний захист, вибухове навантаження, зварні з'єднання.*

## Вступ

**Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Одним з напрямів підвищення захищеності екіпажів бойових броньованих машин (ББМ) є вдосконалення рівня протимінної стійкості (ПМС) зразків ББМ [1]. Актуальність цієї задачі підтверджується зростанням кількості підривів ББМ на протитанкових мінах (ПТМ) у збройному конфлікті на сході України.

Проведення досліджень для розроблення технічних рішень, які можуть забезпечити достатній рівень ПМС ББМ, є досить складною науково-технічною проблемою. Одним зі способів її часткового вирішення є виявлення слабких елементів в конструкції ББМ, вдосконалення яких дозволить значно знизити імовірність ураження екіпажу ББМ. Зважаючи на те, що корпус ББМ виготовляється з броньових сталей високої твердості, а зварні з'єднання виконуються із застосуванням зварювальних матеріалів аустенітного класу, забезпечення рівноміцності металу зварного з'єднання є неможливим. На рівень міцності корпусу ББМ безумовно впливають конструктивні рішення при його виготовленні [2]. Тому, одним з критичних (слабких) елементів, що можуть негативно впливати на імовірність ураження екіпажу ББМ, є зварні з'єднання. Особливо гостро ця проблема стосується ББМ легкої категорії за масою (бронетранспортери, бойові машини піхоти), бронекорпуси яких являють собою зварні просторові тонколистові конструкції, що складаються з зовнішніх панелей, виготовлених з легованих броньових сталей, з'єднаних між собою та з внутрішнім силовим каркасом. У результаті руйнування ударною хвилею та продуктами детонації металу зварного шва або навколошовної зони, може бути уражений екіпаж, що знаходиться всередині корпусу ББМ. Недостатній рівень ПМС спричиняє «традиційне», ще з часів бойових дій СРСР в Афганістані, пересування десанту на даху ББМ, для підвищення імовірності збереження життя при під-


© Бісик С.П., Сливінський О.А., Давидовський Л.С., 2018

риві. Негативною стороною цього є зростання імовірності ураження особового складу кулями стрілецької зброї, осколками гранат і снарядів. Крім того, цілком порушується ідея (концепція) використання бронетранспортерів та бойових машин піхоти, які мають забезпечувати захист десанту від куль стрілецької зброї та осколків.

Приклади руйнування зварних з'єднань корпусів бронетехніки внаслідок підриву на ПТМ в зоні бойових дій на сході України наведені на рис. 1.

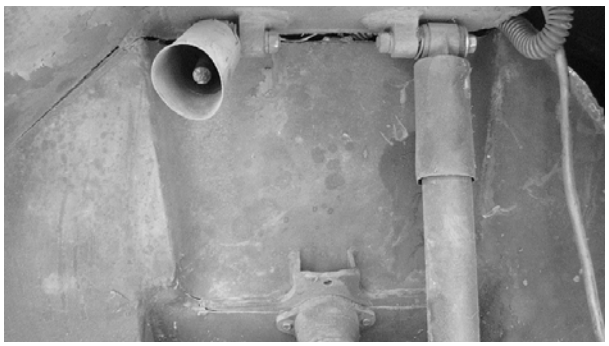
В роботах, що присвячені дослідженню протимінної стійкості ББМ [3–11], не враховується наявність зварних з'єднань. Однак, через неоднорідність та гетерогенність структури металу зварного з'єднання, саме він може стати осередком локального руйнування корпусу від вибухового навантаження та спричинити загибель членів екіпажу. В роботах [12–15] наведенні результати експериментальних досліджень стійкості зварних з'єднань до дії вибухового навантаження у металевих конструкціях та у будівельних конструкціях [16–17]. У роботі [18] запропонований підхід до оцінки протимінної стійкості корпусів ББМ з урахуванням зварних з'єднань та проведені дослідження того, як зварні з'єднання знижують рівень протимінної стійкості зразка. Однак, в цій роботі не досліджено сам механізм руйнування зварного з'єднання.

Таким чином, дослідження механізму та кінетики руйнування зварного з'єднання при вибуховому навантаженні є актуальним науково-технічним завданням, що і є **метою** статті.

## Виклад основного матеріалу

**Характеристика досліджуваного матеріалу**

На сьогоднішній день у виробництві зварних корпусів вітчизняних ББМ легкої категорії за масою широко застосовуються бронесталі високої твердості закордонного виробництва ARMSTAL 500 (Польща), HB500Mod або Quardian 500 (Бельгія), ARMOX 500T (Швеція) та ін. При виготовленні листового прокату з цих матеріалів, застосовується пряме загартування в роликових печах з наступним низьким відпуском. Особливістю цього режиму є дуже висока швидкість охолодження, що в поєднанні з дотриманням вимог по хімічній чистоті матеріалу (низькому вмісті H, N, P та S), яка досягається позапічною обробкою і вакуумуванням сталі перед розливкою, дозволяє отримувати після низького відпуску дрібнозернисту структуру відпущеного мартенситу з високими показниками твердості та міцності при досить високому рівні ударної в'язкості. Крім того, за рахунок мікролегування зазначених сталей бором, вдається суттєво підвищити їх прогартовуваність та зменшити вміст традиційних високовартісних легувальних елементів, в першу чергу нікелю та молібдену.



а

б

в

г

Рис. 1. Пошкодження ББМ внаслідок підриву на мінах та фугасах:
а – руйнування зварних швів у зоні передньої колісної ніші БТР-80; б – руйнування зварних з'єднань лобової частини корпусу БТР-70;
в – руйнування зварного з'єднання корпусу БТР-80 над лівою передньою колісною нішею;
г – відірваний вибуховою хвилею упор балансира ходової частини Т-64БВ

Необхідно зазначити, що згідно чинного в Україні від 2009 року міжнародного стандарту EN 10025-6 «Технічні умови на постачання гарячекатаних виробів з конструкційних сталей з високою границею плинності в загартованому та відпущеному стані», зазначається лише максимальний граничний вміст легувальних елементів та домішок в сталі певної марки разом із мінімальними регламентованими значеннями показників її міцності та ударної в'язкості. Зазначені вище закордонні бронесталі високої твердості, в т.ч. і HB500Mod, принципово не відрізняються за своїм хімічним складом та технологією термомеханічної обробки від будівельних високоміцних сталей. Внаслідок чого, хімічний склад виробником цих матеріалів надається лише за верхнім граничним вмістом вуглецю та інших легувальних елементів і домішок, нижні границі не регламентуються. Що може привести до нестабільних показників твердості та міцності прокату різних плавок.

У табл. 1 для порівняння наведено максимальний вміст елементів у сталі HB500Mod за даними виробника із середньостатистичним складом цієї сталі за даними хімічного аналізу 16 різних плавок цього матеріалу.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі HB500Mod за даними виробника (максимальний вміст елементів) та середньостатистичний, за даними хімічного аналізу

| Вміст елементів | C, % | Mn ,% | Si, % | Cr, % | Ni, % | Mo ,% | P, % | S, % | B, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Максимальний, за даними виробника | 0,30 | 1,20 | 0,40 | 0,80 | 1,20 | 0,60 | 0,015 | 0,010 | 0,005 |
| Середній фактичний | 0,26 | 0,80 | 0,20 | 0,44 | 0,83 | 0,29 | 0,001 | 0,001 | 0,002 |

Економне легування закордонних сталей, в першу чергу, відносно невеликий фактичний вміст молібдену (до 0,3 %) та бору (до 0,002%), обумовлює їх низьку відпускну стійкість [19]. Так, виробник не рекомендує перебільшувати температуру нагрівання матеріалу вище 200 °С під час проведення технологічних операцій, пов'язаних зі зварюванням або термічним різанням. Оскільки при електродуговому зварюванні перегрівання основного металу вище зазначеної температури неминуче, метал зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань з цих сталей характеризується відносно протяжними (до 6…8 мм шириною) знеміцненими ділянками [2; 20]. Це обумовлює часті випадки невідповідності зварних складальних одиниць необхідному рівню протикульової або протимінної стійкості.

Чутливість бронесталей високої твердості до зварювального тепла, а також необхідність застосування високолегованого електродного дроту аустенітного класу для запобігання утворення холодних тріщин обумовлюють високий рівень структурно-фазової неоднорідності металу зварних з'єднань. В свою чергу, наявність литого металу зварних швів з аустеніто-феритною структурою, що має високу пластичність та значно меншу, у порівнянні з основним металом, твердість та міцність, а також набору видозмінених, під впливом зварювального тепла, ділянок зони термічного впливу (ЗТВ), обумовлює механічну неоднорідність зварних виробів.

За даними проведених авторами досліджень мікроструктури та твердості зварних з'єднань зі сталі HB500Mod товщиною 6…20 мм [20], їх структурна неоднорідність характеризується наявністю наступних ділянок ЗТВ.

Ділянка перегріву являє собою найбільш крихку та малопластичну частину ЗТВ. Вона має структуру пакетного мартенситу, що виділився в сильно перегрітому та, відповідно, збільшеному у розмірі аустенітному зерні. Кількість залишкового аустеніту незначна. Метал цієї ділянки має приблизно у 1,2…1,3 разів більшу твердість, ніж основний метал, структура якого складається з мартенситу відпуску.

Ділянка повної перекристалізації також має мартенситну структуру, але більш дрібний розмір первинного аустенітного зерна. Твердість металу цієї ділянки знаходиться на рівні основного металу.

Загальна ширина ділянок перегріву та повної перекристалізації, залежно від питомої погонної енергії зварювання, складає 0,5…2 мм.

Ділянки неповної перекристалізації нагрівалась під час зварювання до температури між точками $A_{c1}$ та $A_{c3}$. Вона являє собою суміш мартенситу, фериту та карбідів. Твердість металу цієї ділянки поступово спадає та, в зоні переходу до наступної ділянки відпуску, стає менша за твердість основного металу у 1,4…1,5 разів. Перехідна зона між ділянкою неповної перекристалізації та ділянкою відпуску має найменшу твердість.

Ділянка відпуску є найпротяжнішою частиною ЗТВ. Її структура складається з бейніту, троостіту відпуску та поступово, з віддаленням від зварного шва, переходить у структуру мартенситу відпуску, без зовнішніх відмінностей від основного металу, але з меншими показниками твердості, ніж основний метал.

Загальна ширина знеміцненої області ЗТВ, що складається з ділянок неповної перекристалізації та відпуску, для зварних з'єднань товщиною 6…20 мм, залежно від питомої погонної енергії зварювання, сягає 3…7 мм.

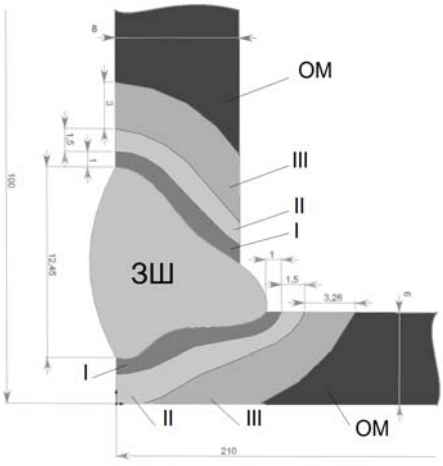
**Методика та результати моделювання**

Об'єктом моделювання обрано умовну частину корпуса ББМ, виготовлену зі сталі HB500Mod, що складається з днища товщиною 6 мм та бортової частини, товщиною 8 мм. Днище з'єднане з бортом кутовим зварним з'єднанням типу У6 за ГОСТ 14771 з розташуванням зварного шва з боку днища та з бортової частини корпуса (рис. 2). Також, для порівняння, створено модель монолітної частини корпуса без зварного з'єднання.

Схема розміщення заряду тринітротолуолу – вибухової речовини (ВР) представлена на рис. 3. Скінченно-елементна модель утворена повноінтегруємими об'ємними S/R елементами (з вибірковим пониженням порядку інтегрування) (рис. 4). Довжина зварного з'єднання складає 200 мм. Характерні розміри елементів скінченно-елементної моделі в зварному шві та зонах навколо нього складають 0,4×0,4 мм.

При моделюванні застосована модель матеріалу Купера-Саймондса.

Під час створення скінченно-елементної моделі, для врахування структурної неоднорідності металу зварного з'єднання, його розбито на п'ять ділянок: зварний шов (ЗШ), хімічний склад якого прийнято рівним хімічному складу наплавленого металу згідно сертифікату на електродний дріт (табл. 2),



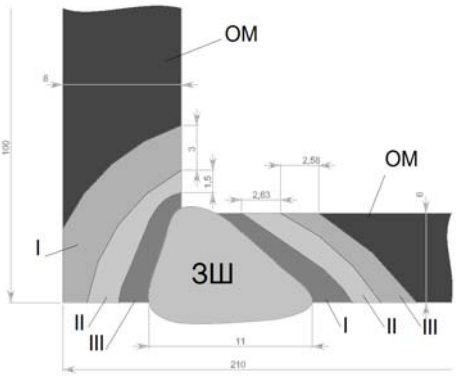




Рис. 2. Геометричні розміри зварного шва та зони термічного впливу, що прийнятті при проведенні моделювання

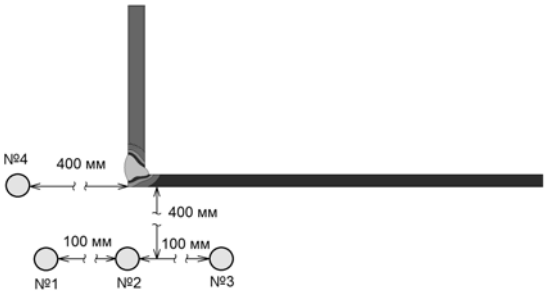
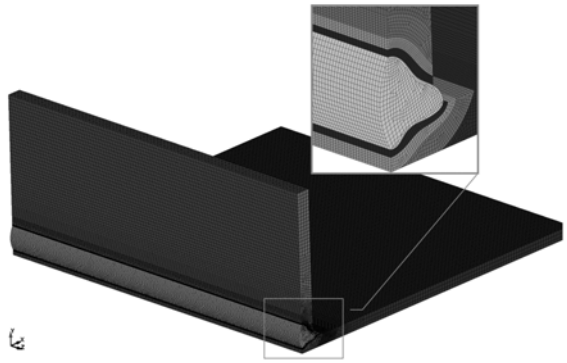
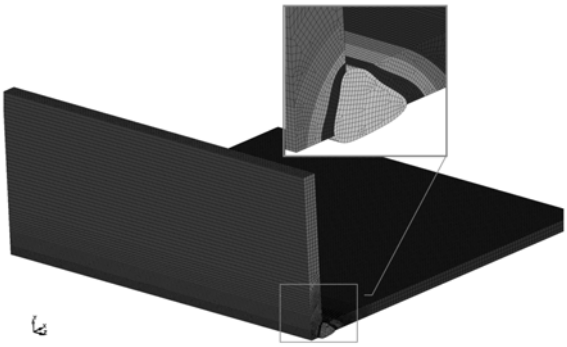



Рис. 3. Місця підриву заряду ВР



а



б

Рис. 4. Скінченно-елементна модель різних типів зварних з'єднань:
а – шов збоку, б – шов знизу

а також I, II та III ділянки ЗТВ та основний метал (ОМ), хімічний склад якого, за даними сертифікату на листовий прокат товщиною 8 мм, також наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад електродного дроту та основного металу

| Вміст елементів | C, % | Mn, % | Si, % | Cr, % | Ni, % | Mo, % | P, % | S, % | Cu, % | B, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ESAB OK Autrod 16.95 | 0,07 | 6,9 | 0,9 | 17,9 | 7,7 | 0,2 | 0,02 | 0,01 | 0,2 | - |
| HB500 Mod | 0,258 | 0,795 | 0,186 | 0,425 | 0,812 | 0,319 | 0,012 | 0,001 | 0,014 | 0,0019 |

Фізико-механічні властивості зазначених ділянок визначені розрахунково-експериментальним шляхом (табл. 3).

Значення границі міцності та плинності металу ЗШ взято з сертифікату на електродний дріт ESAB OK Autrod 16.95, що застосовувався при виготовленні досліджених в [20] зварних з'єднань.

Середня твердість металу ЗШ за даними проведених замірів мікротвердості складає 230 HV (табл. 3). Інші фізико-механічні характеристики металу шва, наведені у табл. 3, одержано шляхом термодинамічного розрахунку за хімічним складом у програмному комплексі JMatPro.

Аналогічним чином, середня арифметична твердість металу ділянок ЗТВ розраховувалась за експериментальним даними, а інші властивості – за хімічним складом ОМ.

При цьому, І-а ділянка ЗТВ відповідає ділянці перегріву, її протяжність, для товщини з'єднуваного металу 8 мм, сягає приблизно 1 мм. ІІ-а ділянка – ділянка повної перекристалізації, твердість та механічні властивості якої приблизно однакові з ОМ.

ІІІ-я ділянка поєднує усі зони металу зварного з'єднання, які не перегрівались вище температури $A_{c3}$ та, відповідно, зазнавали певного знеміцнення під впливом зварювального тепла.

Таблиця 3

Фізико-механічні характеристики ділянок металу зварного з'єднання

| № з/п | Частина макету зварного з'єднання | Фізико-механічні характеристики | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\sigma_B$, МПа | E, ГПа | ν | δ,% | HV |
| 1. | Основний метал | 1140 | 1393 | 210,6 | 0,29 | 8,2 | 445 |
| 2. | Зварний шов | 450 | 630 | 194,7 | 0,296 | 41 | 230 |
| 3. | Зона І | 1343 | 1584 | 210,5 | 0,29 | 7,5 | 506 |
| 4. | Зона ІІ | 1113 | 1368 | 210,6 | 0,29 | 8,4 | 437 |
| 5. | Зона ІІІ | 859 | 1140 | 210,7 | 0,29 | 10,8 | 357 |

$\sigma_{0,2}$ – границя плинності матеріалу; $\sigma_B$ – границя міцності матеріалу; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; δ – відносне подовження; HV – твердість.

Результати моделювання дії вибуху заряду з різною масою ВР в точках №1–4 наведені на рис. 5–9.

Наведені на рис. 6 прогини конструкції в різні моменти часу є характерними й для підриву ВР з масою 2 кг за виключенням максимальних значень прогину.

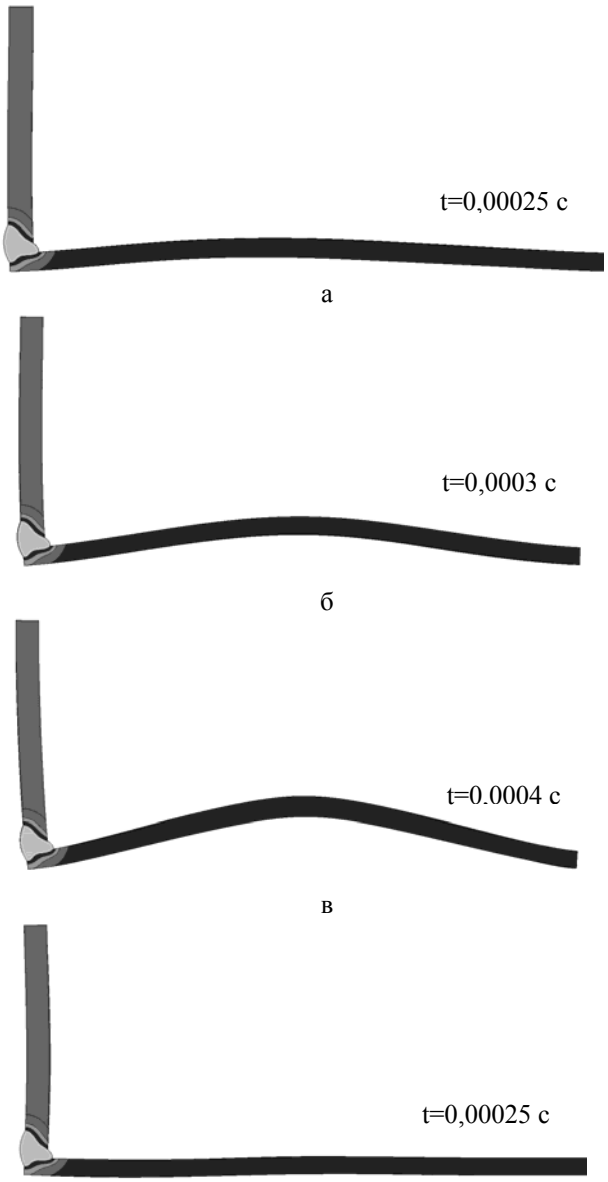
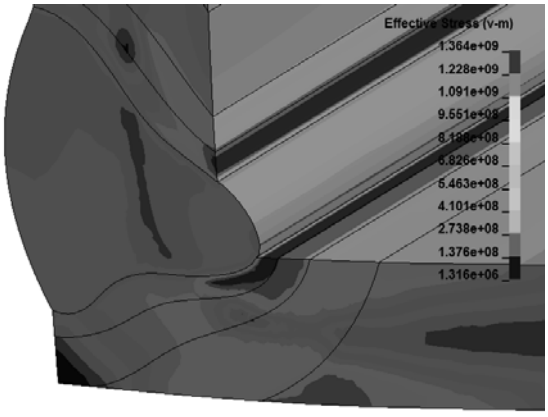
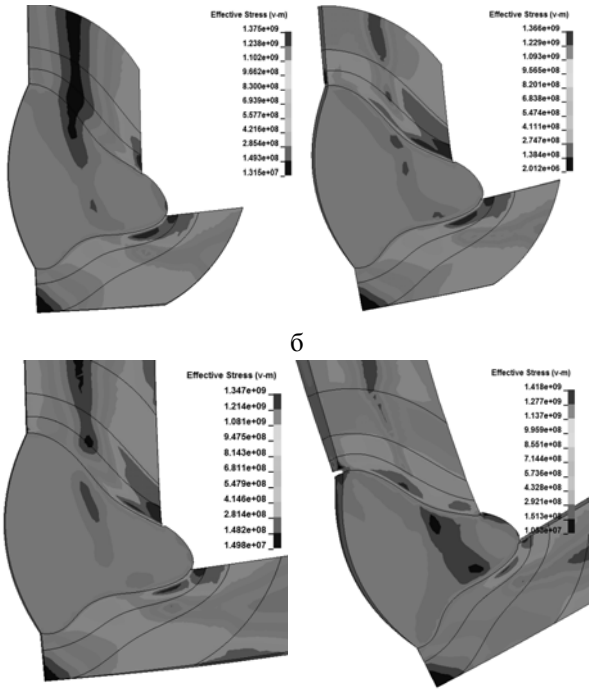



Рис. 5. Деформування конструкції при підриві ВР масою 1 кг в різних точках:
а – точка підриву №1; б – точка підриву №2;
в – точка підриву №3; г – точка підриву №4




а

Рис. 6. Еквівалентні напруження по Мізесу (початок)

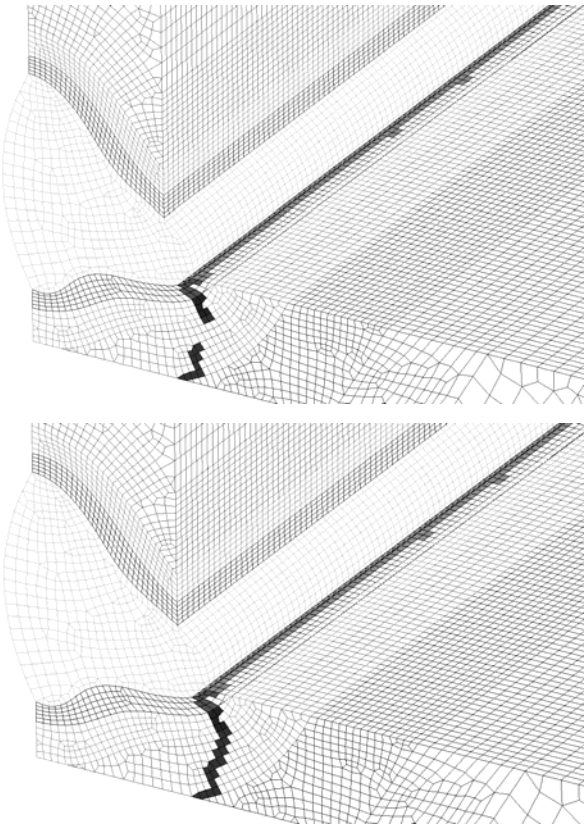



б

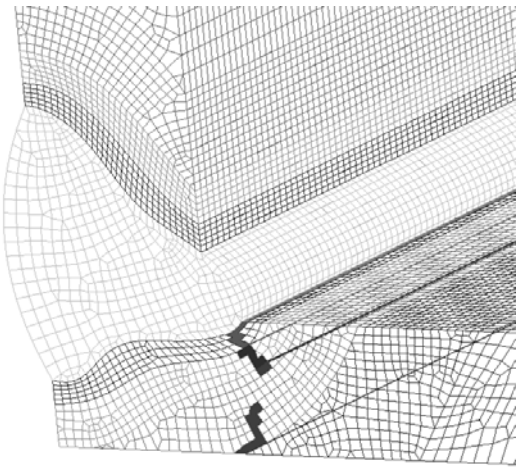



в

Рис. 6. Еквівалентні напруження по Мізесу:
а – точка підриву №2 (1кг); б – точка підриву №1 (2 кг);
в – точка підриву №3 (2 кг)
(закінчення)



б



а

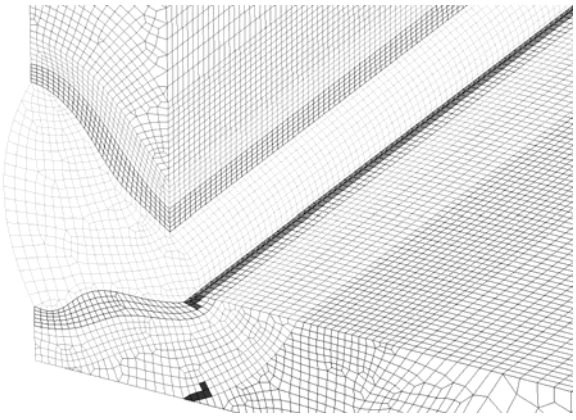
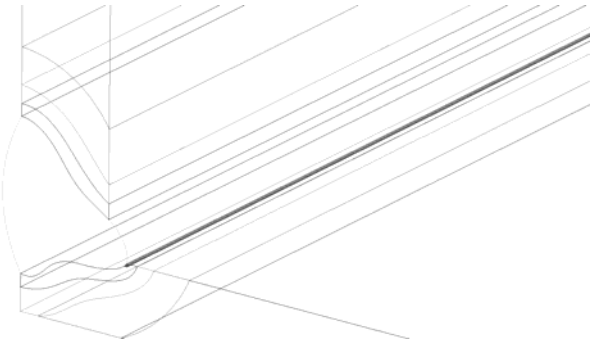
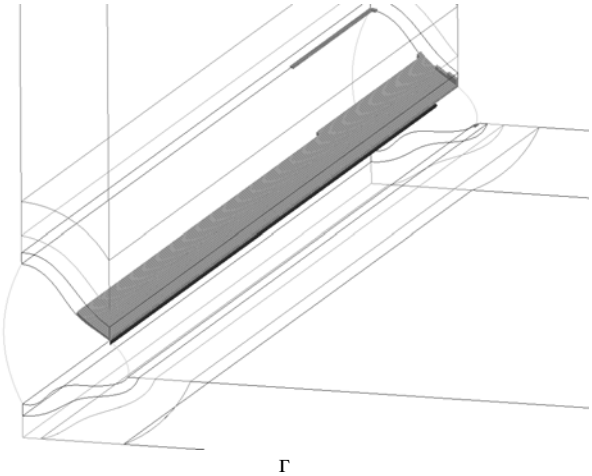


Рис. 7. Кінетика утворення тріщини
у зварному з’єднанні (початок)

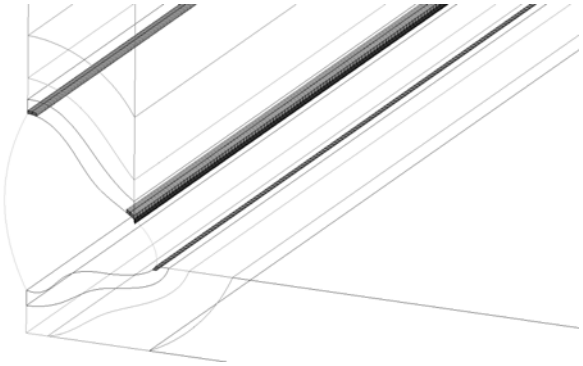


в



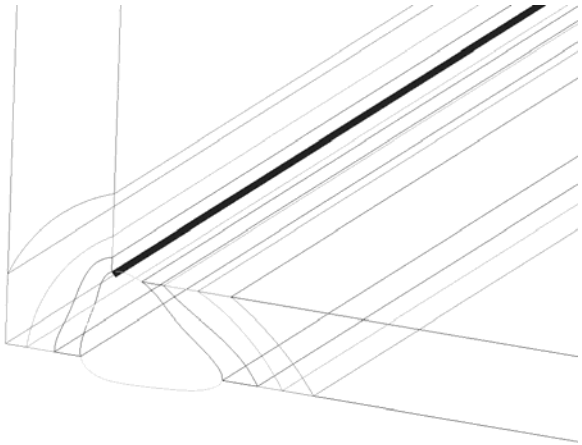
г

Рис. 7. Кінетика утворення тріщини
у зварному з’єднанні (продовження)

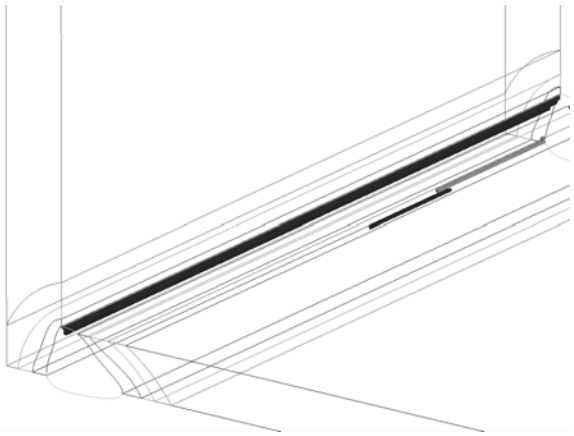


д

Рис. 7. Кінетика утворення тріщини
у зварному з'єднанні:
а – точка підриву №2 (1 кг); б – точка підриву №3 (1 кг);
в – точка підриву №1 (2 кг); г – точка підриву №2 (2 кг);
д – точка підриву №3 (2 кг)
(закінчення)

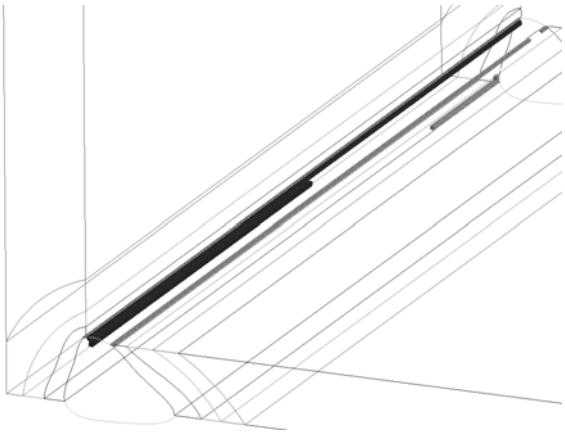


а

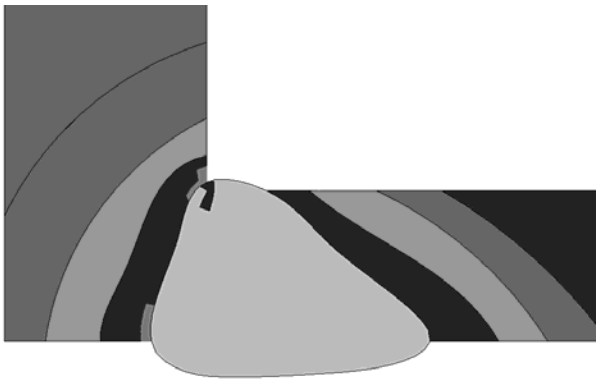


б

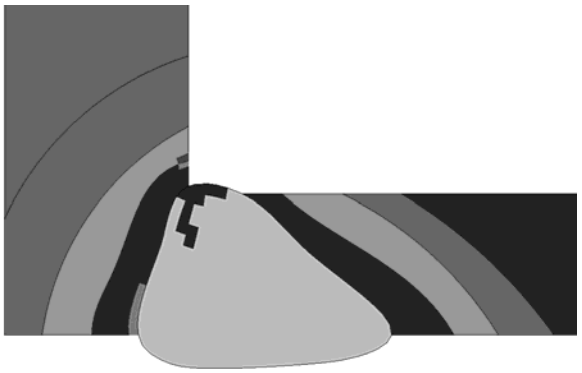
Рис. 8. Кінетика утворення тріщини у зварному
з'єднанні (початок)

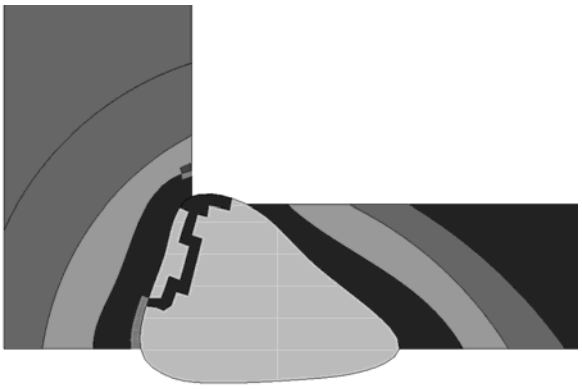


в



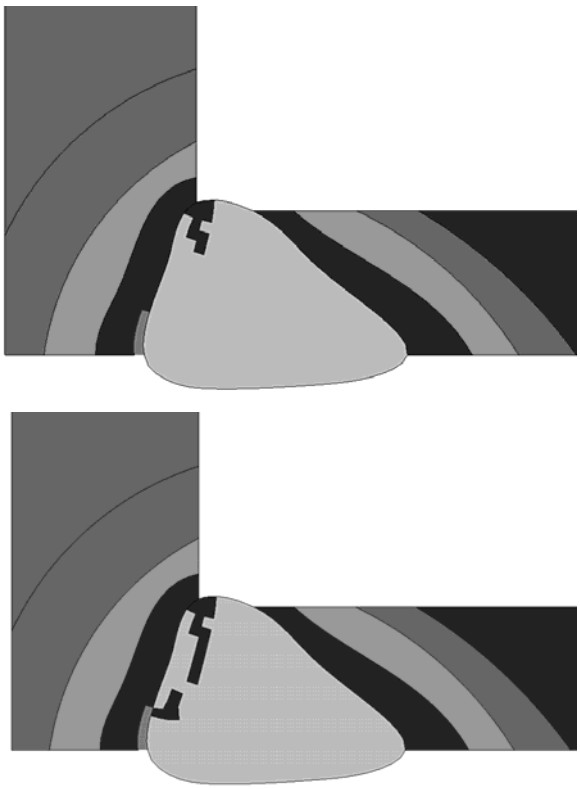
г





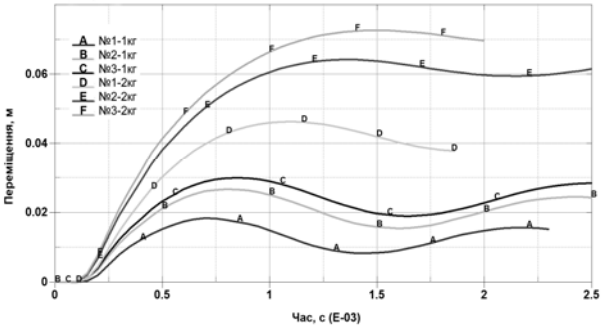
д

Рис. 8. Кінетика утворення тріщини у зварному
з'єднанні (продовження)

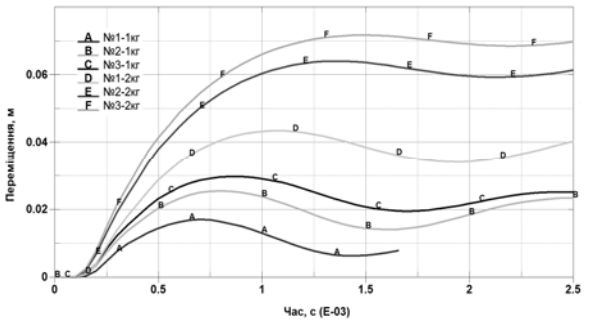


е

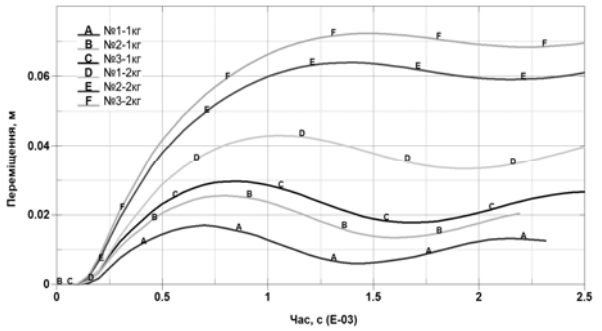
Рис. 8. Кінетика утворення тріщини у зварному з'єднанні: а – точка підриву №1 (1 кг); б – точка підриву №2 (1 кг); в – точка підриву №3 (1 кг); г – точка підриву №1 (2 кг); д – точка підриву №2 (2 кг); е – точка підриву №3 (2 кг)
(закінчення)




а




б




в

Рис. 9. Порівняння прогинів в середині нижньої пластини зварних з'єднань типах У6 (а), Т6 (б) та без зварного з'єднання (в)

Таблиця 4

Значення максимальних прогинів в центрі пластини для різних типів варного з'єднання

| | Значення прогинів, мм | | | |
|---|---|---|---|---|
| Місце підриву | №1 | №2 | №3 | №4 |
| Маса ВР | 1кг | | | |
| Без шва | 17 | 25,5 | 29,7 | 0,6 |
| Шов знизу | 18,4 | 26,7 | 29,9 часткове руйнування | 0,7 |
| Шов збоку | 17,1 | 25,5 часткове руйнування | 29,8 повне руйнування | 0,5 |
| | Значення прогинів, мм | | | |
| Маса ВР | 2кг | | | |
| Без шва | 43,1 | 63,9 | 72,4 | 1,7 |
| Шов знизу | 46,3 часткове руйнування | - повне руйнування | 72,7 часткове руйнування | 0,8 |
| Шов збоку | 43,5 часткове руйнування | 64,1 часткове руйнування | 71,8 | 1,5 |

## Висновки

Таким чином, на основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Врахування в конструкції корпусу ББМ зварного з'єднання доцільно проводити при визначенні гранично допустимого навантаження, що може витримати конструкція без втрати цілісності. В той час, як при значеннях, що не є граничними (відсутні значні пластичні деформації), розрахунок таких конструкцій може бути проведений без врахування зварного з'єднання, що підтверджується й результатами роботи [18].

2. За результатами моделювання дії вибуху заряду ВР масою 1 кг, перевагу можна віддати розташуванню зварного шва з боку днища, оскільки така конструкція зварного з'єднання виявила дещо більшу опірність до руйнування. При підриві заряду ВР масою 2 кг, обидва типи зварних з'єднань, що до-

сліджувались, виявилися нестійкими до вибухових навантажень.

3. Встановлена кінетика тріщиноутворення у зварному з'єднанні при вибуховому навантаженні. Виявлено, що осередком руйнування металу зварних з'єднань є ділянка сплавлення – перехідна зона від металу шва до найменш пластичної частини ЗТВ – ділянки перегріву. При цьому, зародження тріщини очікувано відбувається по концентратору напружень – в місці переходу від наплавленого металу до основного, як з лицевої сторони шва, так і з боку кореня. Наведені на рис. 1 фотографії реальних пошкоджень ББМ від підриву на ПТМ демонструють аналогічний характер руйнування зварних з'єднань.

4. Підвищенню опірності досліджених з'єднань до утворення тріщин сприятиме зменшення рівня структурної та пов'язаної з нею механічної неоднорідності металу ЗТВ шляхом регулювання тепловкладення в зварюваний метал, а також оптимізація геометричної форми зварних швів.

## Список літератури

1. Global Armoured Vehicles Market Report 2016. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://cdn.oemoffhighway.com/files/base/acbm/ooh/document/2015/11/Global_Armoured_Vehicles_Market_Report_2016.pdf.

2. Сливінський О.А. Структура та властивості зварних з'єднань броньових сталей закордонного виробництва / О.А. Сливінський, С.П. Бісик, О.В. Чернозубенко // Технологические системы. – 2016. – №3(76). – С. 103-112.

3. Williams K. A numerical analysis of the effect of surrogate anti-tank mine blasts on the M113 [Електронний ресурс] / K. Williams, K. Poon. – Режим доступу до ресурсу: http://pubs.drdc-rddc.gc.ca/BASIS/pcandid/www/engpub/DDW?W%3DSYSNUM=513131.

4. Wei R. Application of dimension reduction based multi-parameter optimization for the design of blast-resistant vehicle / R. Wei, X. Wang, M. Zhang, Y. Zhou, L. Wang // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2016. https://doi.org/10.1007/s00158-017-1696-2.

5. Mikulic D. Design of Demining Machines. [Електронний ресурс] / D. Mikulic. – Режим доступу до ресурсу: http://www.springer.com/us/book/9781447145035. DOI 10.1007/978-1-4471-4504-2.

6. Showichen A. Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions. [Електронний ресурс] / A. Showichen // Cranfield University, 2008. PhD thesis. – 328 p. – Режим доступу до ресурсу: http://hdl.handle.net/1826/2914.

7. Zhang X. Modelling and analysis of the vehicle underbody and the occupants subjected to a shallow-buried-mine blast impulse / X. Zhang, Y. Zhou, X. Wang, Z. Wang // Journal of Automobile Engineering. – 2016 (231). – P. 214-224. https://doi.org/10.1177/0954407016651353.

8. Erdik A. Numerical simulation of armored vehicles subjected to undercarriage landmine blasts / A. Erdik,·S. Kilic,·N. Kilic, S. Bedir // Shock Waves. – 2016 (26). – P. 449-464. https://doi.org/10.1007/s00193-015-0576-1.

9. Бісик С.П. Оцінка протимінної стійкості легкої бойової колісної машини / С.П. Бісик, О.М. Купріненко, В.Г. Корбач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Збірник наукових праць. Серія: Машинознавство та САПР. – НТУ «ХПІ», 2015. – № 31 (1140). – С. 11-20.

10. Бісик С.П. Дослідження конструкції захисного протимінного екрана / С.П. Бісик // Військово-технічний збірник. – Львів: АСВ, 2015. – №12. – С. 110-117.

11. Бісик С.П. Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2» / С.П. Бісик, І.Б. Чепков, М.І. Васьківський, Л.С. Давидовський, В.Г. Корбач, О.М. Висоцький, Д.М. Захаревич // Озброєння та військова техніка: Щоквартальний науково-технічний журнал, 2016. – №1 (9). – С. 26-31.

12. Frain E. The Effect of Weld Penetration on Blast Performance of Welded Panels [Електронний ресурс] / E. Frain, L. Davidson. – Режим доступу до ресурсу: http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA616386.

13. Falkenreck Th.E. Blast resistance of high-strength structural steel welds / Th.E. Falkenreck, Th. Boellinghaus // Weld World. – 2016. – №60(3). – P. 475-483. https://doi.org/10.1007/s40194-016-0307-y.

14. Yue X. Effect of Welding Parameters on the Heat-Affected Zone ydrogen-Induced Cracking Tendency of a Blast-Resistant Steel / X. Yue, X.-L. Feng, J.C. Lippold // Welding research. – 2014. – № 93. – P. 98-105.

15. Geffroy A.G. Fracture analysis and constitutive modelling of ship structure steel behaviour regarding explosion / A.G. Geffroy, P. Longire, B. Leble // Engineering Failure Analysis. – 2011. – No. 18. – P. 670-681.

16. Krauthammer T. Blast-resistant structural steel connections / T. Krauthammer, G.J. Oh // Transactions on the Built Environment. – 1998. – No. 32. – P. 63-72.

17. Gordon P. Warn Blast Resistance of Steel Plat Shear Walls Designed for Seismic Loading / P. Warn Gordon, M. Bruneau // Journal of structural engineering. – 2009. – P. 1222-1230. https://doi.org/10.1061/_ASCE_ST.1943-541X.0000055.

18. Бісик С.П. Підхід до оцінки протимінної стійкості корпусів бойових броньованих машини з урахуванням зварних з'єднань / С.П. Бісик // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 3. – С. 121-127. https://doi.org/10.30748/nitps.2017.28.15.

19. Бісик С.П. Щодо проблем виготовлення зварних бронекорпусів вітчизняних бойових броньованих машин / С.П. Бісик, О.А. Сливінський, І.Б. Чепков, М.І. Васьківський, О.В. Чернозубенко // Озброєння та військова техніка: щоквар. наук.-техн. журн., 2017. – № 4(16). – С. 29-38.

20. Сливінський О.А. Неоднорідності зварних з'єднань броньових сталей високої твердості / О.А. Сливінський, С.П. Бісик, М.М. Ковтонюк // Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V Міжн. наук.-прак. конф., 11-12 жовт. 2017 р.: тези доповідей. – 2017. – С. 192-194.

## References

1. *Global Armoured Vehicles Market Report 2016*, www.cdn.oemoffhighway.com/files/base/acbm/ooh/document/2015/11/Global_Armoured_Vehicles_Market_Report_2016.pdf.

2. Slyvinskyj, O.A., Bisyk, S.P. and Chernozubenko, O.V. (2016), "Struktura ta vlasty vosti zvarnyh zyednan bronovyh stalej zakordonnogo vyrobnycztva" [Structure and properties of welded joints of armor steels foreign production], *Technological systems*, No. 3(76). pp. 103-112.

3. Williams, K. and Poon, K. (2000), *A numerical analysis of the effect of surrogate anti-tank mine blasts on the M113*, www.oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadata Prefix=html&identifier=ADA375585.

4. Wei, R., Wang, X., Zhang, M., Zhou, Y. and Wang, L. (2016), *Application of dimension reduction based multi-parameter optimization for the design of blast-resistant vehicle, Structural and Multidisciplinary Optimization*. https://doi.org/10.1007/s00158-017-1696-2.

5. Mikulic, D. (2013), *Design of Demining Machines*, www.springer.com/us/book/9781447145035. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4504-2.

6. Showichen, A. (2008), *Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions*, Cranfield University, PhD thesis, 328 p. www.hdl.handle.net/1826/2914.

7. Zhang, X., Zhou, Y., Wang, X. and Wang, Z. (2016), Modelling and analysis of the vehicle underbody and the occupants subjected to a shallow-buried-mine blast impulse, *Journal of Automobile Engineering*, No.231, pp. 214-224. https://doi.org/10.1177/0954407016651353.

8. Erdik, A.,·Kilic, S.,· Kilic, N. and Bedir, S. (2016), Numerical simulation of armored vehicles subjected to undercarriage landmine blasts, *Shock Waves*, No. 26, pp. 449-464. https://doi.org/10.1007/s00193-015-0576-1.

9. Bisyk, S.P., Kuprinenko, O.M. and Korbach, V.G. (2015), "Ocinka protyminnoyi stijkosti legkoyi bojovoyi kolisnoyi mashyny" [Evaluation of anti mine protections of the light military multiple vehicles], *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine-building and CAD*, No. 31(1140), pp. 11-20.

10. Bisyk, S.P. (2015), "Doslidzhennya konstrukciyi zahysnogo protyminnogo ekrana" [Study construction protective mine screen], *Military Technical Collection,* No. 12, pp. 110-117.

11. Bisyk, S.P., Chepkov, I.B., Vaskivskyj, M.I., Davydovskyj, L.S., Korbach, V.G., Vysoczkyj, O.M. and Zaxarevych, D.M. (2016), "Teoretychna ocinka protyminnoyi stijkosti bagatocilovogo taktychnogo avtomobilya «Kozak-2»" [Theoretical evaluation of the mine protection level of the multi-purpose tactical car "Kozak-2"], *Arms and military equipment*, No. 1(9), pp. 26-31.

12. Frain, E. and Davidson, L. (2014), *The Effect of Weld Penetration on Blast Performance of Welded Panels*, www.dtic.mil/docs/citations/ADA616386.

13. Falkenreck, Th.E. and Boellinghaus, Th. (2016), Blast resistance of high-strength structural steel welds, *Weld World*, No. 60(3), pp.475-483. https://doi.org/10.1007/s40194-016-0307-y.

14. Yue, X., Feng, X.-L. and Lippold, J.C. (2014), Effect of Welding Parameters on the Heat-Affected Zone ydrogen-Induced Cracking Tendency of a Blast-Resistant Steel, *Welding research*, No. 93, pp. 98-105.

15. Geffroy, A.G., Longure, P. and Leble, B. (2011), Fracture analysis and constitutive modelling of ship structure steel behaviour regarding explosion, *Engineering Failure Analysis*, No. 18, pp. 670-681.

16. Krauthammer, T. and Oh, G.J. (1998), Blast-resistant structural steel connections, *Transactions on the Built Environment*, No. 32, pp. 63-72.

17. Gordon, P. Warn and Bruneau, M. (2009), Blast Resistance of Steel Plat Shear Walls Designed for Seismic Loading, *Journal of structural engineering*, pp. 1222-1230. https://doi.org/10.1061/_ASCE_ST.1943-541X.0000055.

18. Bisyk, S.P. (2017), "Pidkhid do otsinky protyminnoi stiikosti korpusiv boiovykh bronovanykh mashyny z urakhuvanniam zvarnykh ziednan" [Approach to evaluation of mine resistant levels of armored vehicles taking into account welded joints], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 3(28), pp. 121-127. https://doi.org/10.30748/nitps.2017.28.15.

19. Bisyk, S.P., Slyvinskyi, O.A., Chepkov, I.B., Vaskivskyi, M.I. and Chernozubenko, O.V. (2017), "Shchodo problem vyhotovlennia zvarnykh bronekorpusiv vitchyznianykh boiovykh bronovanykh mashyn" [The problems of manufacturing welded armored hull of domestic armored vehicles], *Arms and military equipment*, No. 4(16), pp. 29-38.

20 Slyvinskyi, O.A., Bisyk, S.P. and Kovtoniuk, M.M. (2017), "Neodnoridnosti zvarnykh ziednan bronovykh stalei vysokoi tverdosti" [Non-homogeneity of welded joints of armor steels of high hardness], *Problems of coordination of military-technical and defense-industrial policy in Ukraine, Prospects for the Development of Arms and Military Equipment: V Practical sciences. conf.*, Oct. 11-12, Kyiv, pp. 192-194.

*Надійшла до редколегії 19.06.2018*
*Схвалена до друку 17.07.2018*

***Відомості про авторів:***

**Бісик Сергій Петрович**
кандидат технічних наук старший науковий співробітник
начальник науково-дослідної лабораторії Центрального
науково-дослідного інституту озброєння та військової
техніки Збройних Сил України,
Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-5009-2113

***Information about the authors:***

**Sergey Bisyk**
Candidate of Technical Sciences Senior Research
Head of Research Laboratory of Central Research
Institute of Arms and Military Equipment
of the Armed Forces of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-5009-2113

**Сливінський Олексій Анатолійович**
кандидат технічних наук доцент
доцент кафедри Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0001-6418-4898

**Давидовський Леонід Сергійович**
кандидат технічних наук
науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України,
Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-2529-1989

**Oleksiy Slyvinskyy**
Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer of Department of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-6418-4898

**Leonid Davidovskyi**
Candidate of Technical Sciences
Researcher of the Central Research Institute of Arms and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-2529-1989

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ И ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ HB 500Mod ПРИ НАГРУЗКЕ ВЗРЫВОМ

С.П. Бисык, О.А. Сливинский, Л.С. Давыдовский

*В статье приведены результаты исследований поведения и характера разрушения сварных соединений из стали HB 500Mod при нагрузке взрывом. На основе физико-механических характеристик стали HB 500Mod, согласно сертификатам качества, рассчитаны механические свойства металла сварного шва и зон термического влияния. Эти данные получены путем термодинамического расчета по химическому составу в программе JMatPro. С использованием метода конечных элементов проведено исследование поведения сварных соединений типа У6 (ГОСТ 14771). При моделировании заряд взрывчатого вещества размещался в разных точках относительно макета сварного соединения. Стойкость сварного соединения оценивалась по значениям прогибов пластины и наличию разрушения сварного шва. Кроме того, проведена оценка механизма образования и кинетики развития трещины в сварном соединении. Значение прогибов сравнено с рассчитанными значениями прогибов условно-монолитного соединения двух пластин. По результатам проведенных исследований установлена кинетика трещинообразования в сварном соединении при нагрузке взрывом. Выявлено, что центром разрушения металла сварных соединений является участок сплавления – переходная зона от металла шва к наименее пластической части зоне термического влияния – участки перегрева. При этом, ожидаемо, зарождение трещины происходит по концентратору напряжений – в месте перехода от наплавленного металла к основному, как с лицевой стороны шва, так и со стороны корня. Результаты исследований могут быть использованы при разработке методик оценки противоминной стойкости образцов боевых бронированных машин и формировании направлений повышения устойчивости сварных соединений к нагрузке взрывом.*

***Ключевые слова:*** *боевые бронированные машины, противоминная защита, взрывные нагрузки, сварные соединения.*

## RESEARCH OF BEHAVIOR AND NATURE OF THE FRACTURE OF WELDED JOINTS OF HB 500Mod STEEL UNDER EXPLOSION LOADING

S. Bisyk, O. Slyvinskyy, L. Davidovskyi

*The article presents the results of research on the behavior and nature of the fracture of welded joints of HB 500Mod steel under explosion loading. Based on the physical and mechanical characteristics of steel HB 500Mod, according to quality certificates, the mechanical properties of the weld metal and zones of thermal impact have been calculated. These data have been obtained using thermodynamic calculation of the chemical composition in using JMatPro software. Using the finite element method, a study of the behavior of welded joints of type U6 ( GOST 14771) have been carried out. During simulation, the explosive charge was placed at different points relative to the dummy of the welded joint. The resistance of the welded joint has been estimated by the values of the plate deflection and the presence of the fracture of the weld. In addition, an estimation of the mechanism of formation and kinetics of crack formations in a welded joint has been made. The value of deflections has been compared with the calculated values of the deflections of the conditionally monolithic connection of the two plates. According to the results of the conducted researches, the kinetics of crack formation in a welded joint under explosion loading has been established. It was discovered that the site of destruction of the metal of welded joints was the fusion area - the transition zone from the weld metal to the least plastic part of the zone of thermal influence - the site of overheating. In this case, the origin of the crack is expected to occur on the concentrator of stresses - in the place of transition from the weld metal to the main, both from the front side of the seam, and from the side of the root. It was found that the difference between the deflections at the control points is slightly different depending on the type of welded joint, which allows us to conclude that it is advisable to choose the type of welded joints to increase its resistance under explosion loading. The results of the research can be used in the development of methods for assessing the resistance of samples of armored vehicles and the test of directions to increase the resistance of welded joints to explosive loading.*

***Keywords:*** *armored vehicles, mine resistance, explosive loading, welded joints.*