

# Порошкові електродні матеріали для створення біметалевих бронепластин методом електродугового наплавлення

## Powder Electrode Materials for Creating Bimetallic Armor Plates by Electric Arc Deposition

**Анатолій Бабінець<sup>A</sup>**

**Corresponding author:** кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, e-mail: aa\_babinets@sstc.ua, ORCID ID: 0000-0003-4432-8879

**Ігор Рябцев<sup>B</sup>**

доктор технічних наук, професор, завідувач відділу, e-mail: ryabtsev39@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7180-7782

**Андрій Панфілов<sup>C</sup>**

доктор філософії, директор, e-mail: a.panfilov@apis-holding.com, ORCID ID: 0009-0001-0738-6706

**Антон Євдокимов<sup>D</sup>**

доктор філософії, головний зварник, e-mail: a.evdokimov@steel-work.net, ORCID ID: 0009-0005-1289-3592

**Олександр Приходько<sup>E</sup>**

заступник директора, e-mail: a.prihodko@apis-holding.com, ORCID ID: 0009-0005-0203-6060

**Валерій Перемітько<sup>F</sup>**

д. тех. наук, професор, декан факультету, e-mail: vperemitko1965@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9032-6116

**Anatoliy Babinets<sup>A</sup>**

**Corresponding author:** Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: aa\_babinets@sstc.ua, ORCID ID: 0000-0003-4432-8879

**Ihor Ryabtsev<sup>B</sup>**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, e-mail: ryabtsev39@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7180-7782

**Andriy Panfilov<sup>C</sup>**

Doctor of Philosophy, Director, e-mail: a.panfilov@apis-holding.com, ORCID ID: 0009-0001-0738-6706

**Anton Yevdokymov<sup>D</sup>**

Doctor of Philosophy, Head Welder, e-mail: a.evdokimov@steel-work.net, ORCID ID: 0009-0005-1289-3592

**Oleksandr Prykhodko<sup>E</sup>**

Deputy Director, e-mail: a.prihodko@apis-holding.com, ORCID ID: 0009-0005-0203-6060

**Valerii Peremitko<sup>F</sup>**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty, e-mail: vperemitko1965@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9032-6116

<sup>A</sup> Державне підприємство “Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки”, м. Київ, Україна

<sup>B</sup> Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, м. Київ, Україна

<sup>C</sup> ТОВ “АПІС ХОЛДІНГ”, м. Кривий Ріг, Україна

<sup>D</sup> ТОВ “Стіл Ворк”, м. Кривий Ріг, Україна

<sup>E</sup> ТОВ “АПІС ХОЛДІНГ”, м. Кривий Ріг, Україна

<sup>F</sup> Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

<sup>A</sup> The State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Kyiv, Ukraine

<sup>B</sup> E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine

<sup>C</sup> “APIS HOLDING” LLC, Kryvyi Rih, Ukraine

<sup>D</sup> “STEEL WORK” LLC, Kryvyi Rih, Ukraine

<sup>E</sup> “APIS HOLDING” LLC, Kryvyi Rih, Ukraine

<sup>F</sup> Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine

Received: October 23, 2025 | Revised: October 30, 2025 | Accepted: October 31, 2025

UDC 623.093, 623.445, 621.791.927.5

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.4.16>

**Мета роботи.** Розроблення хімічного складу, техніки та технології для електродугового наплавлення порошковим дротом зносостійкого та ударостійкого шару, з метою створення біметалевих бронепластин, здатних забезпечити панцерний захист спеціалізованого автомобіля (ПЗСА) по 4-му класу.

**Метод дослідження.** Запропоновано концепцію створення біметалевих бронепластин шляхом електродугового наплавлення високоміцного шару на основу з конструкційної сталі з використанням порошкового дроту оптимізованого складу. Хімічний склад осердя дроту та режими наплавлення визначали розрахунково-експериментальним методом. Виконували металографічний аналіз, визначення твердості та балістичні тести.

**Результати дослідження.** Розроблено порошковий дріт, який забезпечує формування якісного бездефектного наплавленого шару, що відповідає броньовим сталям класу підвищеної твердості. Балістичні випробування підтвердили відповідність класу захисту ПЗСА-4.

**Теоретична цінність дослідження.** Стаття поглиблює уявлення про закономірності формування структури та властивостей наплавленого металу, комплексно легованого хромом, молібденом, ванадієм та нікелем з урахуванням впливу мікролегуєчих добавок карбіду бору.

**Практична цінність дослідження.** Запропоноване рішення дозволяє оперативно виготовляти або відновлювати броньові

**Purpose.** Development of chemical composition, technique and technology for electric arc surfacing of a wear-resistant and impact-resistant layer with a flux cored wire, in order to create bimetallic armor plates capable of providing armor protection of a specialized vehicle (PZSA) according to the 4th class.

**Method.** The concept of creating bimetallic armor plates by electric arc welding of a high-strength layer on a structural steel base using flux cored wire of optimized composition was proposed. The chemical composition of the wire core and the welding modes were determined by the computational-experimental method. Metallographic analysis, hardness determination, and ballistic tests were performed.

**Findings.** A flux cored wire has been developed that ensures the formation of a high-quality, defect-free welded layer that corresponds to armor steels of the increased hardness class. Ballistic tests confirmed compliance with the PZSA-4 protection class.

**Theoretical implications.** The article deepens the understanding of the regularities of the formation of the structure and properties of the deposited metal, complexly alloyed with chromium, molybdenum, vanadium and nickel, taking into account the influence of microalloying additives of boron carbide.

**Practical implications.** The proposed solution allows for the rapid production or restoration of armor elements in conditions of

елементи в умовах обмеженого виробництва та дефіциту імпортованих матеріалів. Технологія є придатною для польового застосування та дозволяє адаптувати її до різних типів базової сталі. Пластини можуть застосовуватися як для підсилення кузовів бронетехніки, так і для засобів індивідуального захисту.

**Цінність дослідження.** Дослідження є першим, в якому створено вітчизняний порошковий дріт з борвмісними карбідами для наплавлення бронестійких шарів на сталеву основу, що забезпечує клас захисту ПЗСА-4. Запропонована технологія поєднує простоту та ефективність, забезпечуючи балістичний захист, притаманний високоцінним імпортованим аналогам.

**Тип статті.** Науково-прикладна експериментальна стаття.

limited production and shortage of imported materials. The technology is suitable for field application and allows it to be adapted to different types of base steel. The plates can be used both for reinforcing armored vehicles and for personal protective equipment.

**Value.** The research is the first to create a domestic flux-cored wire with boron-containing carbides for welding armor-resistant layers onto a steel base, providing protection class PZSA-4. The proposed technology combines simplicity and efficiency, providing ballistic protection inherent in high-cost imported analogues.

**Paper type.** Scientific and applied experimental article.

**Ключові слова:** біметалева бронепластина, дугове наплавлення, порошковий дріт, балістичний захист, зносостійкий шар.

**Key words:** bimetallic armor plate, arc surfacing, flux cored wire, ballistic protection, wear-resistant layer.

## Вступ

Повномасштабна військова агресія РФ проти України створила безпрецедентні виклики для її оборонної промисловості та ремонтних підрозділів Збройних Сил України (Павлов Ю. 2024), (Antis R.M., Mullis T.R. 2023), (Aleksic M. та інші 2023). За даними роботи (Єманов В. 2022) у сучасному бою втрати військової техніки можуть досягати 30 %. Тому однією з нагальних потреб, від якої залежить успіх у виконанні бойових завдань є швидке виготовлення, модернізація та ремонт елементів захисту легкоброньованої колісної військової техніки (Krobot Z. та інші 2023), (Жирний В. 2024), (Рікунов О. 2024).

Використання для цієї мети броньових сталей імпортованого виробництва може бути ускладнене через низку економічних та технологічних факторів: високої вартості продукції та невизначених строків виготовлення й транспортування (Antis R.M., Mullis T.R. 2023), (Aleksic M. та інші 2023), а також обмеженої здатності броньових сталей до зварювання (Prysyazhnyuk P. та інші 2025), (Cabrillo A., Janjic N. 2022), (Ворон М. та інші 2024). Окрім того, значна залежність від зовнішньої допомоги створює стратегічну вразливість для України. Розвиток внутрішнього виробництва, особливо з використанням доступних матеріалів та наявної інфраструктури, є життєво необхідним для зміцнення національної безпеки та оборони.

Одним із перспективних напрямів локального підвищення бронестійкості легкої колісної військової техніки та заміни бронепластин імпортованого виробництва, є розробка матеріалів та технологій дугового наплавлення для створення біметалевих бронепластин із поверхневим шаром підвищеної твердості, які не поступаються за ефективністю імпортованим аналогам, проте мають нижчу вартість, кращу технологічність і доступність виготовлення в умовах воєнного часу.

Важливо також враховувати, що велика різноманітність імпортованих броньових сталей, які використовуються для захисту техніки, яка експлуатується ЗСУ, ускладнює її технічне обслуговування при відновленні та модернізації, при цьому часто виникають питання до якості поставленої продукції (Сливінський О.А. та інші 2017). Перевагою використання порошкових дрітів для електродугового наплавлення є можливість отримання хімічного складу та властивостей наплавленого металу в широких межах, в тому числі при виконанні робіт в польових умовах (Prysyazhnyuk P. та інші 2025). Це має важливе значення для підтримки різноманітного парку легкоброньованих транспортних засобів та швидкого повернення пошкодженої техніки до експлуатаційного стану або її модернізації.

Запропонований підхід повністю відповідає меті посилення оборонно-промислового потенціалу України та сприяє самозабезпеченню. Таким чином, розробка матеріалів та технологій для створення біметалевих бронепластин методами дугового наплавлення, є обґрунтованою, актуальною та практично значущою задачею, спрямованою на підвищення обороноздатності України.

## **Теоретичні основи дослідження**

### **Огляд характеристик сучасних бронематеріалів, а також проблем та перспектив створення біметалевих бронепластин методами наплавлення**

Сучасні броньові сталі в основному класифікуються за твердістю. До них, наприклад, належить катана гомогенна броня з твердістю до 47 HRC (MIL-DTL-12560K 2013), броня підвищеної твердості – до 54 HRC (MIL-DTL-46100E 2008), та броня ультрависокої твердості - понад 57 HRC (MIL-DTL-32332A 2018).

У світовій практиці для виготовлення бронестійких елементів зазвичай використовують:

монолітні бронесталі типу Armoх, Hardox, Ramor, Mars, що мають високу твердість (45...58 HRC) і високий опір проникненню, однак мають суттєві обмеження щодо зварюваності та високу вартість (Basmaci M., Saklakoglu I.E. 2025), (Ворон М. та інші 2024), (Сливінський О.А. та інші 2017);

композитну броню (Chen H. та інші 2025), (Tsirogiannis E. C. 2023), (Wang Y. 2023) або багатошарові системи (Kovalchuk D.V. та інші 2025), (Zukas J. A., Scheffler D. R. 2001), (Markovsky P.E. та інші 2021), які мають добру стійкість до певних типів загроз, але технологічно складні у виготовленні та ремонті.

Броньована сталь повинна мати унікальне поєднання високої твердості для опору локальним ударам високої інтенсивності та достатньої в'язкості для уникнення крихкого руйнування (Prysyazhnyuk P. та інші 2025), (Markovsky P.E. та інші 2021), (Ворон М. та інші 2024). Ці властивості досягаються за допомогою точного хімічного складу та ретельно контрольованих складних виробничих процесів, включаючи плавлення, легування, безперервне лиття, гарячу прокатку та термічну обробку.

Збільшення твердості сталевих бронепластин значно покращує балістичний захист до певної межі, завдяки чому можна зменшити товщину, а отже і вагу пластини. Наприклад, бронепластина товщиною 6,5 мм, виготовлена із високотвердої сталі може замінити пластину товщиною 15 мм, виготовлену зі звичайної сталі, при цьому забезпечуючи однаковий клас захисту (Babinets A.A. та інші 2018).

Однак, як зазначалось вище, підвищені балістичні характеристики високотвердих сталей мають і певні недоліки: їх легкість оброблення та зварювання суттєво погіршується (Gaivoronskyi O.A. та інші 2023), (Cabrilo A., Janjic N. 2022), (Сливінський О.А. та інші 2017), а значне підвищення твердості може привести до зміни характеру ураження із в'язкого на крихке, що навпаки – негативно вплине на кулестійкість (Горбачова Я. 2021). Окрім того, складні та точні виробничі процеси, пов'язані з виготовленням цих спеціалізованих сталей неминуче підвищують їх вартість. Це може створювати значні перешкоди для реалізації процесу швидкого виробництва та ремонту, особливо з використанням зварювання.

При цьому для уникнення появи тріщин при зварюванні високотвердих броньових сталей найчастіше застосовують хромонікелеві аустенітні сталі які, втім, не забезпечують достатньої бронестійкості швів (Kumar S.N. та інші 2022), (Souza E.R.S. та інші 2021), (Özdemir T. 2020). Згідно з даними робіт (Prysyazhnyuk P. та інші 2025), (Garašić I. Та інші 2019) часто для зміцнення зварних швів доводиться наплавляти шари високотвердого покриття, що ще більше ускладнює технологію зварювання броньових листів та часто не приносить бажаного результату.

Альтернативною відповіддю на цей виклик може бути використання методів дугового наплавлення, які широко застосовуються для відновлення та зміцнення зношених металевих поверхонь різних деталей в тому числі і в цивільному секторі (Lozynskyi V. Та інші 2024), (Kuskov Y.M. та інші 2022), (Vembenek M. Та інші 2022), і можуть бути успішно реалізовані з метою створення біметалевих бронестійких пластин для військової техніки.

Дугове наплавлення порошковими дротами характеризується низкою важливих техніко-технологічних переваг:

можливість керованого варіювання хімічного складу наплавленого металу для забезпечення необхідних властивостей – твердості, міцності, корозійної стійкості тощо;

стабільність властивостей наплавленого шару, що досягається завдяки рівномірному розподілу легувальних компонентів;

висока продуктивність процесу;

можливості наплавлення у різних просторових положеннях;

мінімальні вимоги до підготовки поверхні;

відносна технологічна простота процесу та низька вартість обладнання, що дозволяє виконувати процес наплавлення навіть в польових умовах.

Ідея створення біметалевих листів методами наплавлення, або нанесення покриттів за своєю суттю не нова: наприклад, у роботі (Prysyazhnyuk P. та інші 2025) в якості основного металу використовували спеціальну зносостійку сталь Armoх 440Т (твердість 42...48 HRC) на яку наносили захисні шари металу при орієнтовному вмісті в ньому: 15...17 % Mn, 7...15 % Mo, 1,0 % В та С, решта – залізо. Основним недоліком наведеної роботи є використання в якості матеріалу основи спеціальної сталі, яка в 5...7 разів дорожча за низьколеговану сталь. У роботі (Nicolescu С. Та інші 2025) аналогічне завдання вирішували нанесенням на спеціальну сталь HARDOX 450 шару композитного матеріалу на основі оксиду алюмінію, товщиною 0,2 мм. Автори отримали якісне покриття із гарної адгезією до основного металу, і зробили припущення що такий матеріал можна використовувати в якості бронепластин, однак даних щодо бронестійкості не наводили. У роботі (Kovalchuk D.V. та інші 2025) в якості основного металу використовували титан та композитні шари. Однак недоліком представленого рішення є значна вага бронепластины: при необхідній товщині захисту композитної пластины в 27 мм, її вага в два рази перевищує вагу сталевого бронелиста товщиною 8 мм аналогічного класу захисту. У роботі (Altuncu E., Tarım M. 2020) на основу зі сталі Armoх 500Т за допомогою лазерного наплавлення наносили шар високотвердого (62 HRC) покриття. Однак через свою невелику товщину (менше 1,0 мм), даний спосіб не зміг суттєво підвищити кулестійкість бронеплатини.

Зазначені недоліки відсутні у підході, запропонованому в даній роботі. Створення біметалевої бронепластины на основі поєднання легкодоступного, легкозварюваного дешевого пластичного основного матеріалу типу низьковуглецевої низьколегованої сталі та високоміцного поверхневого шару, отриманого методом дугового наплавлення, потенційно створює більш сприятливий баланс властивостей, вартості та технологічності для досягнення поставленої мети.

### ***Матеріали та методики досліджень й концепція створення біметалевих бронепластин методом наплавлення***

В Україні бронепластины, що застосовуються для захисту легкоброньованої колісної техніки, повинні відповідати вимогам стандарту (ДСТУ 3975 2000) де, зокрема, встановлюються сім класів захисту. Рівень захисту ПЗСА-4 повинен забезпечувати захист від кулі 5,45 мм автоматного набою 7Н10, випущеної з автомата АК-74 або кулі 7,62 мм гвинтівкового набою 57-Н-323с, випущеної з гвинтівки СВД.

В роботі запропонована концепція створення біметалевої бронепластины, шляхом поєднання двох типів матеріалів – основи, виготовленої з пластичної сталі та високоміцного шару, отриманого методом дугового наплавлення. Дана концепція ґрунтується на принципах поверхнево-зміцненої броні, де твердий передній шар призначений для руйнування або деформації кулі, тоді як більш в'язкий, пластичний задній шар підтримує тверду поверхню під час удару та поглинає залишкову енергію, запобігаючи повному проникненню та відколу (Babinets A.A. та інші 2018).

В якості основного металу використовували пластини розмірами 300x300 мм та товщиною 5 мм зі сталей типу Ст.3, 09Г2С тощо, які характеризуються високою пластичністю, гарною оброблюваністю та зварюваністю.

Для наплавлення високоміцного шару використовували порошковий дріт з осердям із феросплавів та металічних матеріалів, вміст яких був розрахований для отримання наплавленого металу системи легування С-Cr-Mo-V-Ni-Si-Mn та додатково мікролегованого карбідами бору.

Запропонована система легування наплавленого металу та орієнтовний вміст легувальних елементів (табл. 1) визначені на основі аналізу хімічного складу імпортованих бронесталей та практичного досвіду (Рікунов О. та інші 2024), (Ворон М. та інші 2024), (Babinets A.A. та інші 2018), з метою отримання балансу високої твердості, зносостійкості та ударної в'язкості, що є вирішальним для балістичного захисту.

**Таблиця 1** – Орієнтовні діапазони вмісту основних легувальних елементів в наплавленому металі – аналогу бронестійкої сталі (мас. %)

Масова частка елементів, %							
С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	B
0,3-0,5	0,25-1,65	0,3-1,5	0,5-3,0	0,9-4,0	0,2-1,95	0,2-0,5	≤ 0,2

*Джерело:* підготовлено авторами за матеріалами робіт (Рікунов О. та інші 2024), (Ворон М. та інші 2024), (Babinets A.A. та інші 2018).

При цьому враховували вплив окремих легувальних елементів на властивості наплавленого металу (Sabrilo A., Janjic N. 2022), (Tandon D. Та інші 2023), (Jorge J.C.F. та інші 2001):

вуглець є основним елементом для досягнення високої твердості в сталях, головним чином через утворення мартенситу при загартуванні та виділення різних карбідів. Високий вміст вуглецю сприяє утворенню твердих карбідних фаз, які є критично важливими для зносостійкості та загальної твердості в наплавлених сплавах. Однак, високий вміст вуглецю ускладнює зварювання броньових сталей, підвищуючи чутливість до воднево-індукованого холодного розтріскування;

хром є потужним карбідоутворювачем. У поєднанні з вуглецем він утворює надзвичайно тверді карбіди, які значно підвищують абразивну зносостійкість та загальну твердість наплавленого шару. Однак, збільшення вмісту хрому в деяких випадках може погіршувати ударну в'язкість;

молібден підвищує твердість та міцність сталі шляхом утворення твердих розчинів із залізом та сприяння утворенню стабільних карбідів. Він відіграє вирішальну роль у покращенні в'язкості сталі, що є життєво важливим для опору ударам та деформації під динамічними навантаженнями;

ванадій є сильним карбідоутворювачем, карбіди ванадію ефективно блокують ріст аустенітних дендритів під час затвердіння, що призводить до більш дрібнозернистої мікроструктури, яка, як правило, покращує як твердість, так і зносостійкість;

нікель в основному додається для підвищення в'язкості та пластичності сталі. Він є сильним стабілізатором аустеніту і може покращити ударну в'язкість наплавлених сплавів;

кремній покращує текучість розплавленого зварювального металу, що є корисним для зварюваності. З металургійного погляду, кремній може підвищувати в'язкість та ударну зносостійкість, можливо, впливаючи на морфологію карбідів;

марганець є поширеним легувальним елементом, який діє як розкислювач та поглинач сірки, покращуючи зварюваність. Однак, збільшення вмісту вуглецю, часто в поєднанні з марганцем, може призвести до зниження ударної в'язкості через утворення небажаних мікроструктурних складових;

бор навіть у невеликих кількостях (до 0,1 мас.%) може значно підвищити прогартовуваність сталі шляхом пригнічення утворення м'якших фаз (фериту, бейніту, перліту), тим самим сприяючи більшому перетворенню в мартенсит. Цей ефект відбувається, коли бор сегрегує до меж зерен аустеніту (Prysyazhnyuk P. та інші 2025), (Vembenek M. та інші 2022), (Keleş-Dayaç A., Baran-Acimert Ö. 2025).

Вибір методу електродугового наплавлення порошковим дротом ґрунтується на його перевагах: високій швидкості наплавлення, можливості наплавлення у всіх просторових положеннях, мінімальними вимогами до підготовки поверхні та здатністю створювати міцне та довговічне з'єднання.

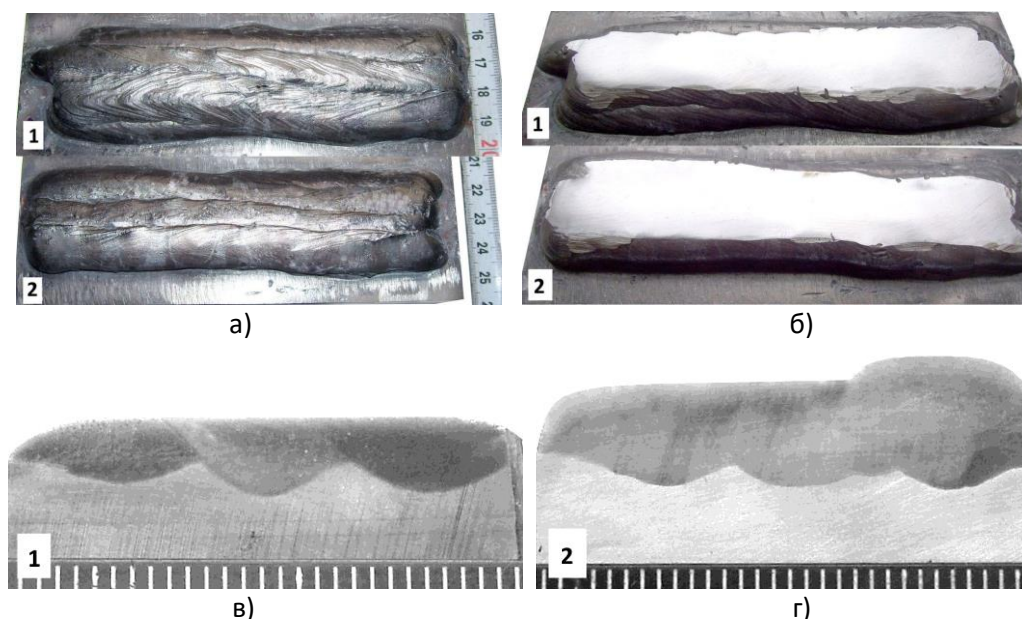
Наплавлення пластин виконували на режимах, які забезпечують мінімізацію тепловкладення (погонної енергії), що зменшує ступінь розширення та стиснення матеріалу, тим самим зменшуючи залишкову деформацію. Режимми обирались, враховуючи результати власних попередніх експериментальних досліджень. Крім того, для збалансування сил усадки та мінімізації деформацій, наплавлення пластин виконували з дотриманням певної послідовності накладання окремих валиків з певним кроком, та з пристосуванням для охолодження тильної сторони листа, що є ефективним методом впливу на умови кристалізації розплавленого металу та залишкові напруження (Colegrove P. та інші 2009).

Металографічні дослідження виконували при збільшеннях  $\times 300 \dots \times 600$ , використовуючи оптичний мікроскоп Neophot-2. Підготовку зразків виконували за стандартними методами, які включають багатоетапне шліфування. Хімічне травлення виконували в 4%-му розчині азотної кислоти.

Балістичні випробування наплавлених біметалевих бронепластин здійснювали в сертифікованій лабораторії відповідно до вимог стандарту (ДСТУ 3975 2000).

### Результати та обговорення

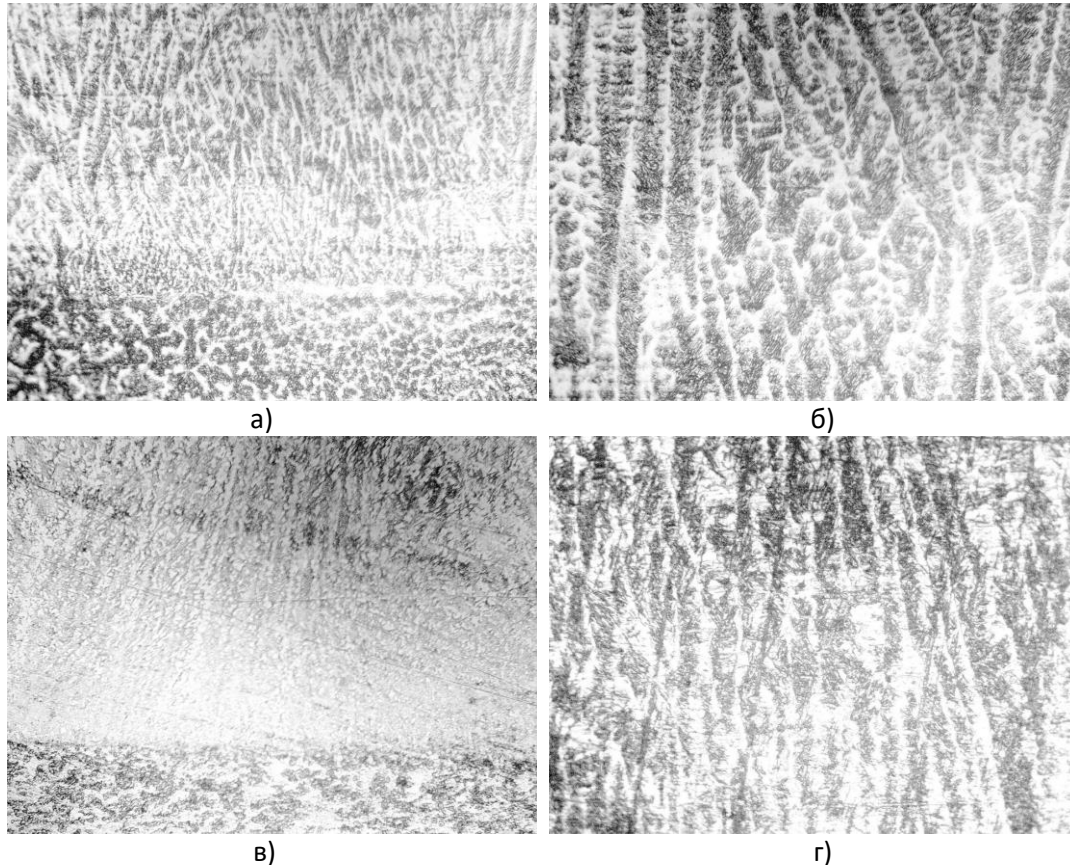
Зовнішній вигляд та поперечні макрошліфи зразків, наплавлених розробленим порошковим дротом оптимізованого та базового складів, який був використаний у якості еталона, наведено на рис. 1. З рис. 1 рисунку видно, що якість формування металу, наплавленого обома типами порошкових дротів є високою, зовнішніх та внутрішніх макро- та мікрodefektів у наплавленому металі не виявлено.



**Рисунок 1** – Поверхня наплавлених зразків, до (а) та після (б) механічної обробки та поперечні макрошліфи зразків (в, г): 1 – еталон; 2 – дослідний

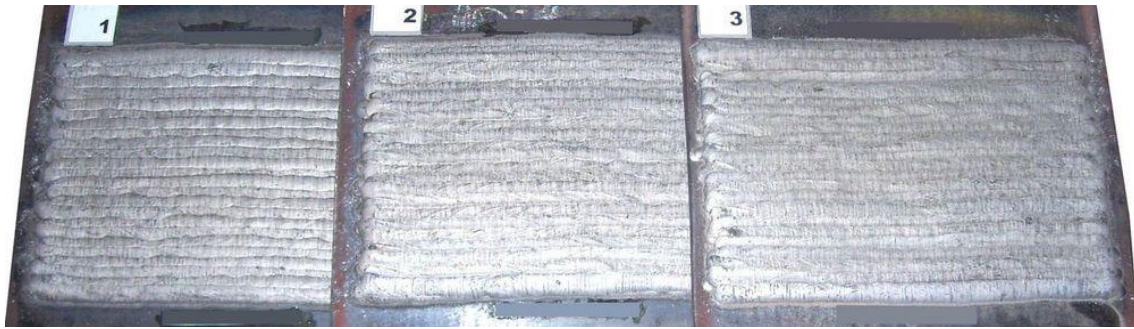
Металографічний аналіз зразків показав, що при наплавленні обома типами дротів, лінія сплавлення між основним (внизу) та першим шаром наплавленого (вгорі) металу простежується чітко (рис. 2, а, б). Структура в верхній частині наплавленого металу є достатньо однорідною, причому у випадку наплавлення дротом оптимізованого складу, спостерігається її подрібнення (рис. 2, в, г).

Експериментально встановлено, що властивості металу, наплавленого дротом оптимізованого складу, знаходяться на високому рівні у порівнянні із дротом-еталоном. Внаслідок оптимізації складу порошкового дроту, твердість верхнього шару наплавленого ним металу зростає з 53...54 HRC до 57...60 HRC, що відповідає твердості імпорتنих броньових сталей підвищеної твердості типу UHS (MIL-DTL-32332A 2018).



**Рисунок 2** – Мікроструктура зразків, наплавлених дротом-еталоном (а, б) та дослідним дротом (в, г) поблизу лінії сплавлення зразка (а, в) та у верхній частині наплавленого металу (б, г). x240.

З метою отримання біметалевих бронепластин було розроблено технологію наплавлення листів зі сталі Ст.3, 09Г2С тощо, розробленим порошковим дротом оптимізованого складу. Як зазначалося вище, для мінімізації залишкових деформацій після наплавлення, дана технологія включає в себе вибір режимів наплавлення з мінімальним тепловкладенням, певний порядок накладання наплавлених валиків та спеціальні пристосування для охолодження тильної сторони пластин в процесі наплавлення. Візуальним оглядом поверхні серії наплавлених біметалевих листів, отриманих із використанням розробленого порошкового дроту підтвердив високу якість формування наплавленого металу та відсутність зовнішніх дефектів (рис. 3). Цей аспект дуже важливий, адже якість поверхні наплавленого металу та наявність в ньому дефектів значно впливає на обсяг механічної обробки поверхні і, як наслідок, на товщину високоміцного шару, а отже і на кулеустійкість бронепластини та технологічність її виготовлення.



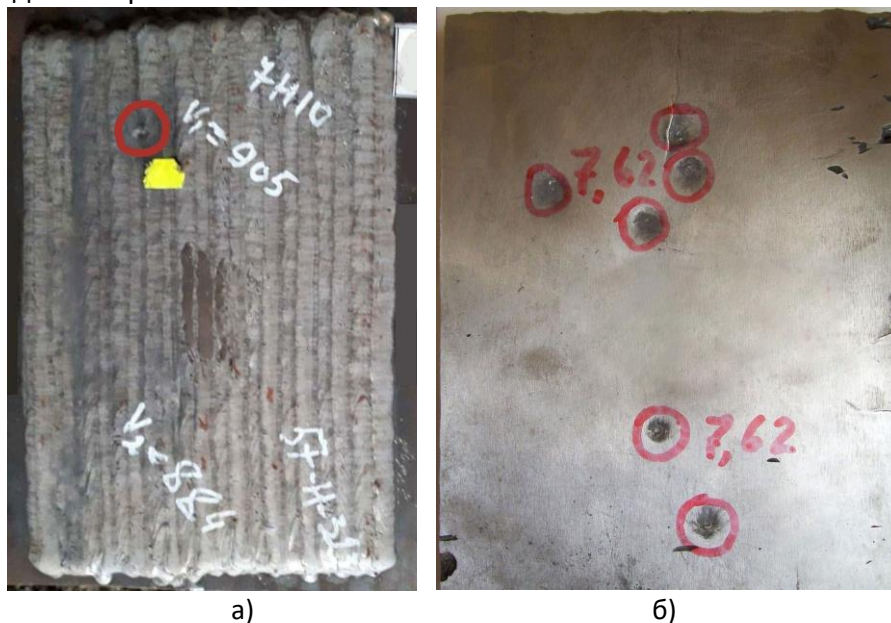
**Рисунок 3** – Зовнішній вигляд серії біметалевих бронепластин, які були отримані шляхом електродугового наплавлення

Балістичні випробування наплавлених біметалевих пластин, загальною товщиною близько 8 мм, проводили відповідно до вимог класу захисту ПЗСА-4, використовуючи два типи озброєнь і боєприпасів, характеристики яких наведено в табл. 2.

**Таблиця 2** – Найменування зброї та засобів ураження, які використовувались під час дослідно-промислової перевірки

Зброя та засіб ураження	Опис кулі	Маса кулі, г	Нормована швидкість кулі, м/с	Відстань від зрізу ствола до поверхні зразка, м
Автомат АК-74, куля 5,45 мм набою 7Н10	Сталеве загартоване осереддя у сталевій оболонці	3,6	910±15	10,0±0,5
Гвинтівка СВД, куля 7,62 мм набою 57-Н-323С	Сталеве осереддя у сталевій оболонці	9,6	850±15	10,0±0,5

Результати випробувань підтвердили відповідність наплавлених бронепластин вимогам класу захисту ПЗСА-4: у жодному зразку не було зафіксовано пробоїв при використанні калібру 7,62 мм включно, а також не спостерігалось утворення вторинних осколків. Зовнішній вигляд пластин без механічної обробки та з нею, після балістичних випробувань наведено на рис. 4.



**Рисунок 4.** Зовнішній вигляд біметалевих наплавлених пластин до механічної обробки (а) та після неї (б) після балістичних випробувань. Кружками указані місця попадання куль

Таким чином, за результатами балістичних випробувань встановлено, що біметалеві пластини, наплавлені розробленим порошковим дротом повністю відповідають вимогам класу захисту ПЗСА-4 згідно (ДСТУ 3975 2000), та можуть бути використані для локального підсилення елементів кузовів легкоброньованої колісної техніки. Також можливе використання для засобів індивідуального захисту особового складу (плит бронезилетів та плитоносок) згідно стандарту (ДСТУ 8782 2018).

Основними перевагами запропонованого у роботі підходу створення біметалевої бронепластини із використанням в якості основного металу ширококорозповсюдженої конструкційної сталі 09Г2С та дугового наплавлення високоміцних шарів на відміну від подібних технологічних рішень (Prysyazhnyuk P. та інші 2025), (Altuncu E., Tarım M. 2020) є:

у 7 разів нижча собівартість виготовлення за рахунок використання більш дешевого матеріалу основи та економного легування наплавлених шарів;

високий рівень зварюваності та ремонтпридатності за рахунок використання основних та наплавлювальних матеріалів не схильних до окрихчення;

відсутність потреби у закупівлі імпортих сталей, що особливо важливо в мінливих умовах сьогодення;

можливість виготовлення самозахисних порошкових дротів для локального зміцнення або ремонту елементів захисту військової техніки, який можна виконати в умовах ремонтної майстерні.

## **Висновки**

1. Проведене дослідження підтверджує високу актуальність та перспективність ідеї створення біметалевих бронепластин методом наплавлення з використанням порошкових дротів. В умовах повномасштабної військової агресії РФ, потреба України у технологічних, ефективних та економічно доцільних рішеннях спрямованих на відновлення та модернізацію бронеелементів військової техніки є критичною.

2. Розроблено оптимальний хімічний склад осердя порошкового дроту, що забезпечує отримання бездефектного наплавленого шару, з твердістю більше 57 HRC в верхньому шарі наплавленого металу.

3. Визначені оптимальні параметри електродугового наплавлення (струм, напруга, швидкість подачі дроту та швидкість наплавлення) для зниження теплового впливу на основу і забезпечення мінімальних залишкових деформацій після наплавлення бронепластин.

4. Розроблена техніка та технологія для мінімізації внутрішніх напружень та виникнення поверхневих дефектів у вигляді тріщин та западань.

5. Проведені балістичні випробування наплавлених зразків біметалевих бронепластин товщиною 8 мм, які показали що вони відповідають вимогам класу захисту ПЗСА-4 згідно з ДСТУ 3975-2000.

6. Напрямок є перспективним для подальших досліджень щодо використання для захисту від зброї більш високого класу ПЗСА-5 та ПЗСА-6 з модифікацією осердя дроту полімерами.

## **Фінансування**

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

## **Конкуруючі інтереси**

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

**Список використаних джерел**

- Aleksic M., Cvrk S., & Bozovic D. Analysis of Land Army Maintenance Techniques in the War in Ukraine. *Military Review*. 2023. URL: <https://www.armyupress.army.mil/Journals/Military-Review/English-Edition-Archives/May-June-2023/Land-Army-Maintenance-Techniques>
- Altuncu E., & Tarim M. Laser cladding of martensitic stainless steels on armor steels. *Emerging Materials Research*. 2020. Vol. 9, No. 1, 55–58. <https://doi.org/10.1680/jemmr.18.00120>
- Antis R.M. & Mullis T.R. *Russian war against Ukraine lessons learned. Curriculum guide*. 2023. Brussels: NATO Headquarters, 150 p. URL: [https://www.nato.int/nato\\_static\\_fl2014/assets/pdf/2023/12/pdf/231208-RusWar-Ukraine-Lessons-Curriculum.pdf](https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/12/pdf/231208-RusWar-Ukraine-Lessons-Curriculum.pdf)
- Babinets A.A., Ryabtsev I.A. & Panfilov A.I. Materials for individual armour protection (Review). *The Paton Welding Journal*. 2018. Is. 8. 39-43. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.08.07>
- Basmaci M., & Saklakoglu I.E. Classification of modern armor steels, history, material properties and heat treatment procedures. *Machines. Technologies. Materials*. 2025. Vol. 19, is. 3, 105-109.
- Bembenek M., Pryszyzhyuk P., Shihab T., Machnik R., Ivanov O., & Ropyak L. Microstructure and wear characterization of the Fe-Mo-B-C-based hardfacing alloys deposited by flux-cored arc welding. *Materials*. 2022. vol. 15, no. 14. <https://doi.org/10.3390/ma15145074>
- Cabrilo A., & Janjic N. Welding of High-Hardness Armor Steel. *Advanced Engineering Letters*. 2022. Vol. 1(4), 148–155. <https://doi.org/10.46793/adeletters.2022.1.4.5>
- Chen H., Li H., Zong S., Weng J. & Xiong X. Study on the Optimal Thickness Ratio and Backing Plate Stacking Sequence of Ceramic Composite Armor Components. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11252-z>
- Colegrove P., Ikeagu C., Thistlethwaite A., Williams S., Nagy T., Suder W., Steuwer A., & Pirling T. Welding process impact on residual stress and distortion. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2009. Vol. 14(8), 717-725. <https://doi.org/10.1179/136217109X406938>
- ДСТУ 3975. *Захист панцерний спеціалізованих автомобілів. Загальні технічні вимоги*. [Чинний від 2001-01-01]. Київ: Держстандарт України, 2000. 13 с.
- ДСТУ 8782. *Засоби індивідуального захисту. Бронжилети. Класифікація. Загальні технічні умови*. [Чинний від 01.07.2019]. Київ: Держстандарт України, 2018. 17 с.
- Gaivoronskyi O.A., Poznyakov V.D., Zavdoveyev A.V., Klapatyuk A.V., & Denysenko A.M. Prevention of cold cracking in armour steel welding. *The Paton Welding Journal*. 2023. Is. 5. 3-10. <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.05.01>
- Garašić I., Jurica M., Iljić D., & Barišić A. Determination of ballistic properties on ARMOX 500T steel welded joint. *Engineering Review*. 2019. Vol. 39(2). 186-196. <https://doi.org/10.30765/er.39.2.8>
- Горбачова Я. Формулювання вимог до захищеності бойових броньованих машин від ураження боєприпасами кінетичної дії. *Social Development and Security*. 2021. Vol. 11(2), 115-124. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.2.12>
- Jorge J.C.F, Souza L.F.G, & Rebello J.M.A. The effect of chromium on the microstructure/toughness relationship of C–Mn weld metal deposits. *Materials Characterization*. 2001. Vol. 47, is. 3–4, 195-205. [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(01\)00168-1](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(01)00168-1)
- Keleş-Dayauç A., Baran-Acimert Ö. Investigation of the Structural, Mechanical, Tribological and Electrochemical Properties of B4C Films Deposited by Different Techniques. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. 34, 13751–13760. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11153-1>
- Kovalchuk D.V., Savvakın D.G., Janiszewski J., Fikus B., Piasta K., Nevmerzhytskiy V., Tkachuk V., Stasiuk O.O., Oryshych D.V., Skoryk M.A., Sienkiewicz J. & Markovsky P.E. Terminal ballistic effects for 3D-printed multi-layered material consisting of Ti-6Al-4V alloy, metal matrix

- composite and porous titanium. *Scientific reports*. 2025. 15, 12767. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97087-z>
- Krobot Z., Stodola P., & Stodola J. Methodology for Evaluating the Combat Capability of Armored Vehicle. *Proc. of the 27th Int. Sci. Conf. on Transport Means*. 4-6 October, 2023. Palanga, Lithuania. 617 – 622.
- Kumar S.N., Balasubramanian V., Malarvizhi S., Rahman A.H., & Balaguru V. Effect of welding consumables on shielded metal arc welded ultra high hard armour steel joints. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2022. vol. 31, no. 1. 8-21. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0002>
- Kuskov Y.M., Zadorozhna K.R., Makarenko V.D., Tishchenko V.D., Gordan G.N., Bogaychuk I.L. & Kaida T.V. Pulse-Arc Surfacing of Corrosion-Resistant Austenitic-Martensitic Steel. *Materials Science*. 2022. Vol. 58, 28–34. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00626-6>
- Lozynskiy V., Trembach B., Hossain M., Kabir M.H., Silchenko Yu., Krbata M., Sadovyi K., Kolomiitse O., & Ropyak L. Prediction of phase composition and mechanical properties Fe–Cr–C–B–Ti–Cu hardfacing alloys: Modeling and experimental validations. *Heliyon*. 2024. vol. 10, no. 3. e25199. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25199>
- Markovsky P.E., Savvakina D.G., Stasiuk O.O., Sedov S.H., Golub V.A., Kovalchuk D.V., & Prikhodko S.V. Ballistic Resistance of Layered Titanium Armour Made Using Powder Metallurgy and Additive 3D Printing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2021. Vol. 43, is. 12, 1573–1588. <https://doi.org/10.15407/mfint.43.12.1573>
- MIL-DTL-12560K. *High Strength Armor Steel specified by the U.S. Department of Defense. Rolled Homogeneous Alloy Steel (RHA)*. 2013. 52 p.
- MIL-DTL-32332A. *Armor plate, steel, wrought, ultra-high-hardness*. 2018. 27 p.
- MIL-DTL-46100E. *Armor plate, steel, wrought, high-hardness*. 2008. 29 p.
- Nicolescu C., Munteanu C., Lupescu Ș., Țigănescu V., Miculescu M., Istrate B., & Antoniac I. Characterization of the alumina layer deposited by plasma spray deposition on the hardox steel for ballistic protection. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*. 2025. Vol. 87, Is. 1. 215-226.
- Özdemir T. Mechanical & microstructural analysis of armor steel welded joints. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2020. Vol. 12, is. 1. 166-175. <https://doi.org/10.29137/umagd.488104>
- Павлов Я. Алгоритми дій ремонтних підрозділів з відновлення автобронетанкової техніки в умовах ведення бойових дій. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2024. Том 2, № 44. 115-121. <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2024/2/44/319518>
- Prysyazhnyuk P., Biały W., Bembenek M., Panchuk V., Medvid I., Duriagina Z., Romanyshyn T. & Vytvytskyi V. Improving Ballistic Resistance of Armor Steel by FCAW with Hardfacing Alloys of Fe–Mo–Mn–B–C System. *Management Systems in Production Engineering*. 2025. Vol. 33(3). 380-387. <https://doi.org/10.2478/mspe-2025-0036>
- Рікунов О., Смагін О., Бісик В. Удосконалення методики оцінювання можливостей ремонтно-відновлювальних органів військових частин НГУ з проведення ремонту пошкоджених зразків озброєння та військової техніки у ході виконання завдань за призначенням. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2024. Том 1, № 43. 101-105. <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2024/1/43/307908>
- Souza E.R.S., Weber R.P., Monteiro S.N., & Oliveira S. Microstructure effect of heat input on ballistic performance of welded high strength armor steel. *Materials*. 2021. vol. 14, is. 19, 5789. <https://doi.org/10.3390/ma14195789>
- Сливінський О.А., Бісик С.П., Чепков І.Б., Васьківський М.І., & Чернозубенко О.В. Проблеми виготовлення зварних бронекорпусів вітчизняних бойових броньованих машин.

- Weapons and military equipment*. 2017. 4. 29-38. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.4\(16\).29-38](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.4(16).29-38)
- Tandon D., Li H., Pan Z., Yu D., & Pang W. A Review on Hardfacing, Process Variables, Challenges, and Future Works. *Metals*. 2023. Vol. 13(9). 1512. <https://doi.org/10.3390/met13091512>
- Tsirogiannis E. C., Daskalakis E., Hassan M. H., Omar A.M., & Bartolo P. Ballistic design and testing of a composite armour reinforced by CNTs suitable for armoured vehicles. *Defence Technology*. 2023. Vol. 32. 173-195. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.04.013>
- Ворон М., Скоробагатько Ю., Тимошенко А., Семенко А., Шваб С., & Смірнов О. Потенціал застосування надлегких сталей для виробництва елементів броні військової техніки. *Social Development and Security*. 2024. 14(5). 106-112. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.5.10>
- Wang Y., Liu Q., Zhang B., Wang H., Hazell P.J., Han Z., Li J., Li B., Li L., Liu F., Ye F. Ballistic performance of functionally graded B4C/Al composites without abrupt interfaces: Experiments and simulations. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023. vol. 25. 1011-1029. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.021>
- Єманов В. Проблемні питання систем експлуатації та відновлення автобронетанкової техніки національної гвардії України. *Честь і закон*. 2022. Том 2, № 81. 63-71. <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2022/2/81/263780>
- Жирний В., Задорожній І., Найко А., Третяк Н. Інновації щодо бронезахисту військової техніки. *Military Science*. 2024. Том 2, № 3. 120-132. <https://doi.org/10.62524/msj.2024.2.3.10>
- Zukas J.A. & Scheffler D. R. Impact effects in multilayered plates. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 38, Is. 19. 3321-3328. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(00\)00260-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00260-2)

## References

- Aleksic M., Cvrk S., & Bozovic D. Analysis of Land Army Maintenance Techniques in the War in Ukraine. *Military Review*. 2023. URL: <https://www.armyupress.army.mil/Journals/Military-Review/English-Edition-Archives/May-June-2023/Land-Army-Maintenance-Techniques>
- Altuncu E., & Tarim M. Laser cladding of martensitic stainless steels on armor steels. *Emerging Materials Research*. 2020. Vol. 9, No. 1, 55–58. <https://doi.org/10.1680/jemmr.18.00120>
- Antis R.M. & Mullis T.R. *Russian war against Ukraine lessons learned. Curriculum guide*. 2023. Brussels: NATO Headquarters, 150 p. URL: [https://www.nato.int/nato\\_static\\_fl2014/assets/pdf/2023/12/pdf/231208-RusWar-Ukraine-Lessons-Curriculum.pdf](https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/12/pdf/231208-RusWar-Ukraine-Lessons-Curriculum.pdf)
- Babinets A.A., Ryabtsev I.A. & Panfilov A.I. Materials for individual armour protection (Review). *The Paton Welding Journal*. 2018. Is. 8. 39-43. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.08.07>
- Basmaci M., & Saklakoglu I.E. Classification of modern armor steels, history, material properties and heat treatment procedures. *Machines. Technologies. Materials*. 2025. Vol. 19, is. 3, 105-109.
- Bembenek M., Prysyzhnyuk P., Shihab T., Machnik R., Ivanov O., & Ropyak L. Microstructure and wear characterization of the Fe-Mo-B-C-based hardfacing alloys deposited by flux-cored arc welding. *Materials*. 2022. vol. 15, no. 14. <https://doi.org/10.3390/ma15145074>
- Cabrilo A., & Janjic N. Welding of High-Hardness Armor Steel. *Advanced Engineering Letters*. 2022. Vol. 1(4), 148–155. <https://doi.org/10.46793/adeletters.2022.1.4.5>
- Chen H., Li H., Zong S., Weng J. & Xiong X. Study on the Optimal Thickness Ratio and Backing Plate Stacking Sequence of Ceramic Composite Armor Components. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11252-z>
- Colegrove P., Ikeagu C., Thistlethwaite A., Williams S., Nagy T., Suder W., Steuer A., & Pirling T. Welding process impact on residual stress and distortion. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2009. Vol. 14(8), 717-725. <https://doi.org/10.1179/136217109X406938>
- DSTU 3975. *Armored protection of specialized vehicles. General technical requirements*. [Valid from 2001-01-01]. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2000. 13 p. (In Ukrainian).

- DSTU 8782. *Personal protective equipment. Body armor. Classification. General technical conditions*. [Valid from 01.07.2019]. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2018. 17 p. (In Ukrainian).
- Gaivoronskyi O.A., Poznyakov V.D., Zavdoveyev A.V., Klapatyuk A.V., & Denysenko A.M. Prevention of cold cracking in armour steel welding. *The Paton Welding Journal*. 2023. Is. 5. 3-10. <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.05.01>
- Garašić I., Jurica M., Iljkić D., & Barišić A. Determination of ballistic properties on ARMOX 500T steel welded joint. *Engineering Review*. 2019. Vol. 39(2). 186-196. <https://doi.org/10.30765/er.39.2.8>
- Horbachova Y. Formulation of requirements for the protection of armored combat vehicles from damage by kinetic ammunition. *Social Development and Security*. 2021. Vol. 11(2), 115-124. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.2.12> (In Ukrainian).
- Jorge J.C.F, Souza L.F.G, & Rebello J.M.A. The effect of chromium on the microstructure/toughness relationship of C–Mn weld metal deposits. *Materials Characterization*. 2001. Vol. 47, is. 3–4, 195-205. [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(01\)00168-1](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(01)00168-1)
- Keleş-Dayauç A., Baran-Acimert Ö. Investigation of the Structural, Mechanical, Tribological and Electrochemical Properties of B4C Films Deposited by Different Techniques. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. 34. 13751–13760. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11153-1>
- Kovalchuk D.V., Savvakín D.G., Janiszewski J., Fikus B., Piasta K., Nevmerzhytskiy V., Tkachuk V., Stasiuk O.O., Oryshych D.V., Skoryk M.A., Sienkiewicz J. & Markovsky P.E. Terminal ballistic effects for 3D-printed multi-layered material consisting of Ti-6Al-4V alloy, metal matrix composite and porous titanium. *Scientific reports*. 2025. 15, 12767. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97087-z>
- Krobot Z., Stodola P., & Stodola J. Methodology for Evaluating the Combat Capability of Armored Vehicle. *Proc. of the 27th Int. Sci. Conf. on Transport Means*. 4-6 October, 2023. Palanga, Lithuania. 617 – 622.
- Kumar S.N., Balasubramanian V., Malarvizhi S., Rahman A.H., & Balaguru V. Effect of welding consumables on shielded metal arc welded ultra high hard armour steel joints. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2022. vol. 31, no. 1. 8-21. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0002>
- Kuskov Y.M., Zadorozhna K.R., Makarenko V.D., Tishchenko V.D., Gordan G.N., Bogaychuk I.L. & Kaida T.V. Pulse-Arc Surfacing of Corrosion-Resistant Austenitic-Martensitic Steel. *Materials Science*. 2022. Vol. 58, 28–34. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00626-6>
- Lozynskiy V., Trembach B., Hossain M., Kabir M.H., Silchenko Yu., Krbata M., Sadovyi K., Kolomiitse O., & Ropyak L. Prediction of phase composition and mechanical properties Fe–Cr–C–B–Ti–Cu hardfacing alloys: Modeling and experimental validations. *Heliyon*. 2024. vol. 10, no. 3. e25199. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25199>
- Markovsky P.E., Savvakín D.G., Stasiuk O.O., Sedov S.H., Golub V.A., Kovalchuk D.V., & Prikhodko S.V. Ballistic Resistance of Layered Titanium Armour Made Using Powder Metallurgy and Additive 3D Printing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2021. Vol. 43, is. 12, 1573–1588. <https://doi.org/10.15407/mfint.43.12.1573>
- MIL-DTL-12560K. *High Strength Armor Steel specified by the U.S. Department of Defense. Rolled Homogeneous Alloy Steel (RHA)*. 2013. 52 p.
- MIL-DTL-32332A. *Armor plate, steel, wrought, ultra-high-hardness*. 2018. 27 p.
- MIL-DTL-46100E. *Armor plate, steel, wrought, high-hardness*. 2008. 29 p.
- Nicolescu C., Munteanu C., Lupescu Ş., Ţigănescu V., Miculescu M., Istrate B., & Antoniac I. Characterization of the alumina layer deposited by plasma spray deposition on the hardox steel for ballistic protection. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*. 2025. Vol. 87, Is. 1. 215-226.
- Özdemir T. Mechanical & microstructural analysis of armor steel welded joints. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2020. Vol. 12, is. 1. 166-175. <https://doi.org/10.29137/umagd.488104>
- Pavlov Y. Algorithms of actions of repair units on the restoration of armored tank vehicles in the conditions of combat operations. *The collection of scientific works of the National Academy of the National Guard of Ukraine*. 2024. Vol. 2, No. 44. 115-121. <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2024/2/44/319518> (In Ukrainian).
- Prysyazhnyuk P., Biały W., Bembenek M., Panchuk V., Medvid I., Duriagina Z., Romanyshyn T. & Vytvytskyi V. Improving Ballistic Resistance of Armor Steel by FCAW with Hardfacing Alloys of Fe–Mo–Mn–B–C

- System. *Management Systems in Production Engineering*. 2025. Vol. 33(3). 380-387. <https://doi.org/10.2478/mspe-2025-0036>
- Rikunov O., Smahin O., & Bisyk V. Improving the methods of assessing the capabilities of the repair and restoration bodies of the military units of the national guard of Ukraine to repair damaged samples of weapons and military equipment in the performance of tasks meaning. *The collection of scientific works of the National Academy of the National Guard of Ukraine*. 2024. Vol. 1 No. 43. 101-105. <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2024/1/43/307908> (In Ukrainian).
- Souza E.R.S., Weber R.P., Monteiro S.N., & Oliveira S. Microstructure effect of heat input on ballistic performance of welded high strength armor steel. *Materials*. 2021. vol. 14, is. 19, 5789. <https://doi.org/10.3390/ma14195789>
- Slyvinsky O.A., Bisyk S.P., Chepkov I.B., Vaskovskiy M.I., & Chernozubenko O.V. Problems of manufacturing welded armored hulls of domestic armored combat vehicles. *Weapons and military equipment*. 2017. 4. 29-38. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.4\(16\).29-38](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.4(16).29-38) (In Ukrainian).
- Tandon D., Li H., Pan Z., Yu D., & Pang W. A Review on Hardfacing, Process Variables, Challenges, and Future Works. *Metals*. 2023. Vol. 13(9). 1512. <https://doi.org/10.3390/met13091512>
- Tsirogiannis E. C., Daskalakis E., Hassan M. H., Omar A.M., & Bartolo P. Ballistic design and testing of a composite armour reinforced by CNTs suitable for armoured vehicles. *Defence Technology*. 2023. Vol. 32. 173-195. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.04.013>
- Voron M., Skorobagatko Y., Tymoshenko A., Semenko A., Schwab S., & Smirnov O. The potential of lightweight steels application for the production of armor elements for military technique. *Social Development and Security*. 2024. 14(5). 106-112. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.5.10> (In Ukrainian).
- Wang Y., Liu Q., Zhang B., Wang H., Hazell P.J., Han Z., Li J., Li B., Li L., Liu F., Ye F. Ballistic performance of functionally graded B4C/Al composites without abrupt interfaces: Experiments and simulations. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023. vol. 25. 1011-1029. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.021>
- Yemanov V. Problem issues of systems of operation and restoration of armored vehicles of the national guard of Ukraine. *Honor and Law*. Vol. 2 No. 81 (2022). 63-71. <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2022/2/81/263780> (In Ukrainian).
- Zhyrnyi V., Zadorozhnii I., Naiko A., & Tretyak N. Armoured military equipment innovations. *Military Science*. 2024. Vol. 2(3), 120-132. <https://doi.org/10.62524/msj.2024.2.3.10> (In Ukrainian).
- Zukas J.A. & Scheffler D. R. Impact effects in multilayered plates. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 38, Is. 19. 3321-3328. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(00\)00260-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00260-2)