

## РОЗДІЛ III. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.01.6

**М.Г. Болотов**, канд. техн. наук

**Т.Р. Ганєєв**, канд. техн. наук

**О.О. Новомлинець**, канд. техн. наук

**І.О. Прибитько**, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### НОВІ НАПРЯМКИ ЗАСТОСУВАННЯ АЛЮМІНІДІВ ТИТАНУ

**М.Г. Болотов**, канд. техн. наук

**Т.Р. Ганєєв**, канд. техн. наук

**О.А. Новомлинець**, канд. техн. наук

**И.А. Прибитько**, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА

**Maksym Bolotov**, PhD in Technical Sciences

**Timur Hanieiev**, PhD in Technical Sciences

**Oleh Novomlynets**, PhD in Technical Sciences

**Iryna Prybytko**, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

### NEW DIRECTION OF APPLICATION OF TITANIUM ALUMINIDES

*Проведено порівняльне оцінювання та визначено принципово можливий напрямок підвищення рівня балістичної стійкості титанових бронезилетів як військового, так і цивільного призначення за допомогою використання шарів високотвердого інтерметаліду системи Ti-Al. Показано, що використання шаруватих титанових бронепластин, зміцнених інтерметалідом – алюмінідом титану – дозволить підвищити рівень бронезахисту в разі прострілювання та знизити загальну вагу бронезилета в порівнянні з наявними аналогами металевих бронезилетів.*

**Ключові слова:** інтерметалід, балістична стійкість, бронепластина.

*Проведена сравнительная оценка и выяснено принципиально возможное направление повышения уровня баллистической стойкости титановых бронезилетов как военного, так и гражданского назначения путем использования слоев высокотвердого интерметаллида системы Ti-Al. Показано, что использование слоистых титановых бронепластин, усиленных интерметаллидом – алюминидом титана – позволит повысить уровень бронезащиты при простреливании и снизить общий вес бронезилета по сравнению с существующими аналогами металлических бронезилетов.*

**Ключевые слова:** интерметаллид, баллистическая стойкость, бронепластина.

*The comparative assessment and fundamentally shows the possible direction of improving ballistic vests titanium, both military and civil purposes through the use of layers of very hard intermetallic compound of Ti-Al. It is shown that the use of layered armor plates reinforced titanium intermetallic compounds – titanium aluminide will increase the level of armor protection when prostrelivanie and reduce the overall weight of the vest over existing analogues metal body armor.*

**Key words:** ballistic resistance, intermetallic compounds, armor plates.

**Вступ.** В умовах фактичної військової агресії в Україні особливо гостро постають питання підвищення власної безпеки військовослужбовців. У сучасних умовах ведення бойових дій бронезилет є найбільш ефективним засобом індивідуального захисту, що застосовується в силових структурах. Сучасний ринок пропонує бронезилети широкого спектра для прихованого та зовнішнього, періодичного та постійного носіння, захисту від куль та вражаючої дії вибуху осколкових гранат. Однак досвід експлуатації бронезилетів у зоні проведення АТО показує, що багато з них не забезпечують необхідний рівень захисту його власнику.

Основою більшості сучасних бронезилетів, що виробляються в Україні та у світі, є сталева пластина розмірами 25×30 см, яка піддається термічному обробленню. Такі бронезилети здатні забезпечувати достатній рівень захисту навіть під час влучання бронейно-запалювальної кулі калібру 7,62×25 мм типу БЗ, але внаслідок великої їх маси (залежно від класу захисту вага такого бронезилета коливається від 9 до 12 кг) та

товщини знижується маневреність бійця, підвищується його втомлюваність, виникають больові відчуття у хребті, що можуть стати причиною появи гематом на плечовому поясі внаслідок тривалого їх носіння [1].

Кардинально протилежна ситуація складається з бронежилетами, зробленими з високоміцної балістичної тканини, що отримала назву кевлар. Такі бронежилети наявні в озброєнні військ США та НАТО. Переваги таких жилетів – невелика їх маса (до 4 кг), що забезпечує високу маневреність військовослужбовців у бойових ситуаціях. Вони комфортні – в них не спекотно, але поряд з усіма перевагами існують недоліки, що обмежують їх застосування. Так, кевлар та його аналоги схильні до зовнішнього впливу навколишнього середовища. Сонячна радіація з часом зменшує міцнісні властивості. Також кевлар втрачає міцність під час намокання. Такі бронежилети відносяться до другого класу захисту, що здатні захистити від вражаючої дії кулі пістолета ТТ, випущеної майже впритул, або від холодної колючо-ріжучої зброї [2].

Заміна сталевих бронепластин на керамічні дозволила знизити вагу бронежилета на 1–2 кг та одночасно підвищити його клас захисту. Кераміка під час влучання кулі здатна поглинати її енергію та зменшувати її дію, але при цьому вона виходить з ладу. Такі бронежилети вважають одноразовими [3].

У зв'язку з цим широкого впровадження для засобів індивідуального захисту набули бронепластики, зроблені з високоміцних титанових сплавів, оскільки вони здатні забезпечувати достатній рівень протиккульної стійкості і дозволяють знизити вагу виробу на 15–20 % у порівнянні зі сталевими бронежилетами [4]. Тестування таких бронежилетів у сучасних бойових умовах вимагають певні вимоги, головним чином, пов'язані із забезпеченням захисту їх носія від куль з підвищеною пробивною здатністю типу ПП калібру 7,62, випущених з АК-74, АКМ, або навіть СГД. Це потребує підвищення механічних властивостей титанового сплаву.

**Мета роботи.** Метою цієї роботи є пошук шляхів підвищення рівня балістичної стійкості титанових бронепластин.

**Виклад основного матеріалу.** На сьогодні титан та його сплави знайшли широке застосування у військовій промисловості під час виготовлення бронеелементів машин легкої та середньої вагової категорії, оскільки він володіє досить високою твердістю і стійкістю до корозії. Високе оцінювання протиккульної стійкості титанових сплавів у бойових умовах із залученням різного виду озброєння обумовила застосування їх і для виготовлення засобів індивідуального бронезахисту (ЗІБ) [5].

Нині відома велика гама титанових сплавів з  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$ ,  $\beta$ -структурою, що відрізняються один від одного певними властивостями. Так,  $\alpha$  – титанові сплави мають досить середній рівень міцності, не піддаються термообробці і володіють дуже високою корозійною стійкістю. У зв'язку з цим титанові сплави з  $\alpha$ -структурою мають обмежене застосування під час виготовлення засобів індивідуального бронезахисту.

Однофазні  $\beta$ -сплави також не знайшли широкого промислового застосування під час виготовлення ЗІБ, що пов'язано, насамперед, з досить високою їх вартістю, оскільки для отримання стійкої  $\beta$ -структури сплави повинні бути леговані великою кількістю  $\beta$ -стабілізаторів: V, Mo, Nb, Ta, до того ж вони значно підвищують щільність сплавів. Тому, як показала практика, під час виготовлення ЗІБ як протиккульної броні найбільш доцільно використовувати титанові сплави з  $\alpha+\beta$  структурою після відпалу, при якому рівень механічних властивостей визначається властивостями  $\alpha$  і  $\beta$ -фаз, ступенем гетерогенності і типом структури [6].

Проте вивчення особливостей деформації і руйнування титанових сплавів у разі інтенсивного динамічного навантаження показало, що  $\alpha+\beta$  титанові сплави більш схильні до високої локалізації пластичної деформації, при цьому відбуваються структурні

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

зміни: поява білих смуг адіабатичного зсуву, можливість фазових перетворень, що призводить до підвищення крихкості сплаву. Все це досить негативно впливає на балістичні властивості  $\alpha+\beta$  титану.

Як відомо з літературних джерел, найбільшою балістичною стійкістю з  $\alpha+\beta$  титанів володіє титановий сплав VT23 (заліза 0,4–0,8 %, хрому 0,8–1,4 %, молібдену 1,5–2,5 %, ванадію 4–5 %, титану 84–89,3 %, алюмінію 4–6,3 %). Однак підвищення його міцності за допомогою термічного оброблення більш ніж 1000 МПа неминуче призводить до його крихкого руйнування, що знижує опір пластини до ударного впливу [7].

Враховуючи дані використання металевих бронезилетів у гарячих точках у всьому світі, можна зробити висновок, що надійний захист його носія буде залежати не тільки від високої міцності і твердості броньованої пластини, а й від наявності більш м'якого демпфуючого шару в його складі. Оскільки, як показує сумна практика використання бронезилетів, виконаних із суто титанових пластин, коли потрапляння кулі в жилет не спричиняє його руйнування, а боєць помирає повільно і болісно від внутрішньої кровотечі. Це спричинено тим, що куля передає імпульс титановій пластині на невеликій площі, відповідно, сила удару по тілу розподілена на невелику площу пластини, що частіше за все закінчувалося фатально [8].

Враховуючи все вищесказане, постає завдання створення гетерогенної титанової броні у поєднанні з іншим високотехнологічним металом, наприклад, алюмінієм, що дозволить запобігти крихкому руйнуванню титанової бронепластини.

Ми пропонуємо спосіб удосконалення балістичних властивостей титанових бронезилетів завдяки використанню високотвердих інтерметалідних сполук – алюмінідів титану. На нашу думку, чергування шарів високотвердого інтерметаліду та м'яких шарів алюмінію дозволить усунути вищеперераховані недоліки за рахунок високого модуля пружності і досить малої щільності цього матеріалу.

У процесі отримання біметалевого композиту з високотвердим інтерметалідним прошарком одним із головних завдань є визначення основних матеріалів. Титановий сплав OT4 та алюмінієві сплави 1901, 1903 системи Al-Zn-Mg знайшли широке застосування у виробках броньованої техніки легкої вагової категорії та можуть бути використані для виготовлення такого біметалевого композиту. Крім того, важливою проблемою є визначення оптимального типу інтерметаліду системи Ti-Al, оскільки, як відомо, збільшення кількості алюмінію в системі Ti-Al підвищує розчинність евтектоїдоутворюючих сполук, що, у свою чергу, приводить до зростання міцнісних показників сплаву [9]. У зв'язку з цим найбільш оптимально, на наш погляд, цим умовам відповідатимуть такі інтерметаліди:  $TiAl_3$ ,  $TiAl$ ,  $Ti_3Al_{11}$ , температура появи яких, виходячи з діаграми стану системи Ti-Al, коливається в межах 1340–1460 °C. Залежно від чистоти і мікроструктури механічні властивості інтерметаліду TiAl коливаються в досить широких межах і при кімнатній температурі становлять:  $\sigma_b = 350\text{--}580$  МПа,  $\delta = 0,5\text{--}1,5$  %. Модуль пружності алюмініду TiAl при 20 °C дорівнює:  $E = 175$  ГПа [10].

У зв'язку з цим важливим завданням постає необхідність оптимізації структури лицевого і тильного шарів, тобто забезпечити таке розташування в'язких шарів і шарів міцного інтерметаліду в системі, що забезпечить не тільки достатню міцність проти руйнування, а й зменшення позамежної дії кулі у разі потрапляння її у бронепластину. Варіанти отримання шарів інтерметаліду наведено на рис. 1.

У першому випадку (рис. 1, а) пропонується отримання лицевого інтерметалідного шару на поверхні титанового сплаву. Тут як вихідний алюмінієвий шар можуть використати, наприклад, високоміцні алюмінієві сплави системи Al-Zn-Mg з подальшим більш в'язким демпфуючим шаром, зробленого з титанового сплаву.

На рис. 1, б пропонується варіант пошарового виконання бронепластины, коли шари титану чергуються з інтерметалідними прошарками, які поєднані між собою, наприклад, засобами дифузійного зварювання.

Третій варіант виконання бронепластины (рис. 1, в) пропонує як в'язкий лицевий шар алюмінієвий сплав, що частково прореагував з титаном, утворивши інтерметалідний прошарок у зоні їх контакту.

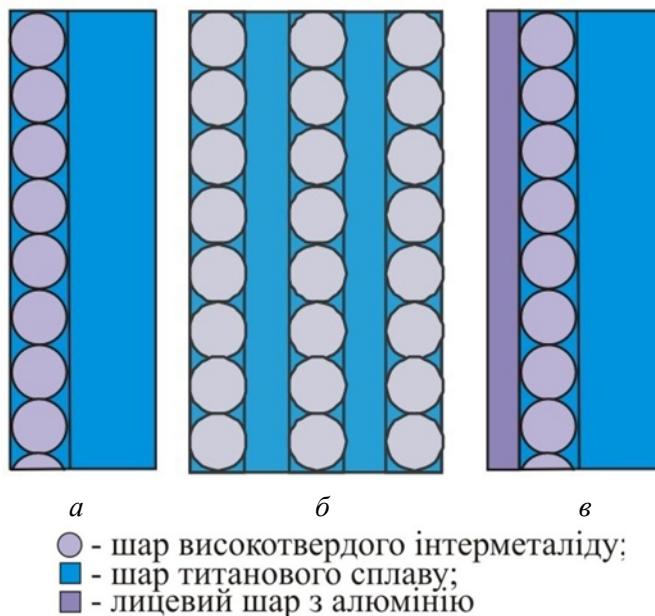


Рис. 1. Варіанти виконання шарів титанових бронепластин: а – з лицевим інтерметалідним прошарком; б – пошарове чергування шарів титану та інтерметаліду; в – з лицевим шаром з алюмінієвого сплаву

Дослідження щодо отримання шарів інтерметаліду TiAl проводили із застосуванням дифузійного зварювання титану ВТ1-0 з алюмінієм марки АД1.

Отримання дифузійно-зварювального з'єднання здійснювалося при температурі ізотермічної витримки в межах  $T=550\text{--}630\text{ }^{\circ}\text{C}$ , зварювальному тиску  $P=225\text{ МПа}$  протягом часу  $t=60\text{ хв}$  [11]. З метою подальшого росту інтерметалідного прошарку зварні зразки піддавали термічному обробленню в муфельній печі при температурі  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 5 годин.

Польові випробування отриманого біметалевого шаруватого зразка проводили за допомогою його порівняння з аналогічними випробуваннями гомогенної титанової пластини товщиною 10 мм під час прострілювання їх з пістолета Макарова кулею калібру  $9\times 18\text{ мм}$ , випущеної з дистанції 5 метрів, що відповідає ГОСТ Р 50744-95. Випробування показали, що зразок, який містить у своєму складі прошарки високотвердого інтерметаліду – алюмініду титану, витримав потрапляння кулі, випущеної з пістолета Макарова, на відміну від гомогенної титанової пластини.

### Висновки

1. На сьогодні актуальною проблемою є підвищення рівня безпеки військовослужбовців за рахунок удосконалення засобів індивідуального бронезахисту.

2. Одним із перспективних напрямків розвитку засобів індивідуального бронезахисту є вдосконалення бронепластин на основі титану за рахунок використання високотвердих інтерметалідних сполук – алюмініду титану.

3. Випробування бронепластин на основі високотвердого інтерметаліду – алюмініду титану показали ефективність їх використання для виготовлення засобів індивідуального бронезахисту.

4. Актуальними є подальші дослідження, спрямовані на розроблення шаруватих бронепластин на основі титану та алюмінію, в яких будуть чергуватися високотверді шари інтерметаліду алюмініду титану з м'якими шарами з алюмінію.

#### Список використаних джерел

1. *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования* / В. А. Григорян, И. Ф. Кобылкин, В. М. Маринин, Е. Н. Чистяков. – М. : РадиоСофт, 2008. – 406 с.
2. *Швайков Д. К.* Сравнительные баллистические характеристики защитных пакетов из некоторых видов высокопрочных химических волокон / Д. К. Швайков, В. В. Чивилев, В. В. Прошкин // Вопросы оборонной техники. – 1996. – Сер. 15, вып. 3 (115)–4 (116). – С. 10–12.
3. *Кобылкин И. Ф.* Материалы и структуры легкой бронезащиты : учебник / И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов ; под ред. И. Ф. Кобылкина. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 191 с.
4. *Петрова Э. Н.* Особенности взаимодействия средств поражения с броней СИБ / Э. Н. Петрова, Б. Д. Чухин // ВОТ. – 2003. – Сер. 16, вып. 3–4.
5. *Концептуальные основы создания СИБ* / В. И. Байдак [и др.]. – М., 2003. – 395 с.
6. *Каннель Г. И.* Прочность титана ВТ6 в условиях ударно-волнового нагружения / Г. И. Каннель, Э. Н. Петрова // Материалы II Всесоюзного совещания по детонации. – 1981.
7. *Исследование возможности путей создания перспективных материалов для СИБ бойца* / В. А. Григорян, Э. Н. Петрова, В. А. Хромушин, В. П. Яньков // ВОТ. – 2003. – Сер. 16, вып. 3–4.
8. *Мондольфо Л. Ф.* Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо. – М. : Металлургия, 1979. – 639 с.
9. *Проникание и пробивание твердых тел.* USA Ballistic Research Laboratory : пер. с англ. / Дж. А. Зукас, Т. Николас, Х. Ф. Свифт и др. ; под ред. С. С. Григоряна // Динамика удара. – М. : Мир, 1985.
10. *Аномалии деформационных характеристик интерметаллида TiAl* / Б. А. Гринберг, О. В. Антонова, В. Н. Индендаум и др. // Физика металлов и металловедение. – 1992. – № 4. – С. 24–32.
11. *Рабкин Д. М.* Сварка разнородных металлов / Д. М. Рабкин, В. Р. Рябов, С. М. Гуревич. – К. : Техника, 1976. – 208 с.

УДК 691.791.4

**Т.Р. Гансєв**, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### ОСОБЛИВОСТИ ДИФУЗІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІДІ ТА МОЛІБДЕНУ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ

**Т.Р. Гансєв**, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### ОСОБЕННОСТИ ДИФУЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕДИ И МОЛИБДЕНА ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ

**Timur Hanieiev**, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

### FEATURES OF DIFFUSION INTERACTION OF COPPER AND MOLYBDENUM DURING THE PRESSURE WELDING

*Досліджено процес дифузійного зварювання у вакуумі міді з молибденом через модифіковані іонним обробленням прошарки. За допомогою методу радіоактивних ізотопів визначені особливості дифузійної взаємодії міді з молибденом. Показано, що змінюючи основні параметри режиму іонного оброблення поверхневого шару зварного матеріалу, можна суттєво впливати на розміри зони взаємодії та механічні властивості зварного з'єднання. Встановлено доцільність під час дифузійного зварювання у вакуумі міді з молибденом попередньої модифікації поверхні молибдену міддю.*

**Ключові слова:** дифузійні процеси, дифузійне зварювання у вакуумі, мідь, молибден.

*Исследован процесс диффузионной сварки в вакууме меди с молибденом через модифицированные ионной обработкой слои. С помощью метода радиоактивных изотопов определены особенности диффузионного взаимодействия.*