

## ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ З'ЄДНАНЬ З ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО СПЛАВУ TiAlNb ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ ЗВАРЮВАННІ

Н.В. Піскун, Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, А.І. Устінов, Т.В. Мельніченко, І.І. Статкевич

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В роботі досліджено вплив технологічних прийомів дифузійного зварювання в вакуумі на формування структури та механічні властивості з'єднань з інтерметалідного сплаву TiAlNb. Показано, що зварювання інтерметалідного сплаву способом дифузійного зварювання в вакуумі при температурі  $T_{зв} = 1050$  °С, тиску  $P_{зв} = 10$  МПа, протягом 20 хв. не забезпечує отримання бездефектних з'єднань. Після зварювання в стику спостерігається лінія з'єднання, вздовж якої знаходиться значна кількість дефектів у вигляді ланцюжка пор. Збільшення параметрів зварювання до температури  $T_{зв} = 1200$  °С, тиску  $P_{зв} = 30$  МПа, тривалості зварювання 30 хв., а також використання пластичного прошарку з NbTi сплаву товщиною 1 мм дозволяє покращити умови формування зварного з'єднання та значно зменшити кількість дефектів в стику. В процесі зварювання між матеріалом прошарку та інтерметалідним сплавом відбувається утворення загальних зерен та дифузійної зони товщиною 25...35 мкм. Використання при зварюванні інтерметалідного сплаву TiAlNb наношаруватого проміжного прошарку системи Al–Ti загальною товщиною 25 мкм у поєднанні з циклічним навантаженням у вигляді 3 циклів навантаження–розвантаження призводить до зміни характеру структури в зоні з'єднання. На мікроструктурах зварних з'єднань, отриманих за допомогою оптичної металографії, лінія з'єднання не спостерігається. Застосування електронної мікроскопії дозволяє виявити в стику дифузійну зону товщиною 15...20 мкм, за складом близькою до хімічного складу інтерметалідного сплаву. Дослідження міцності зварних з'єднань на стиснення дозволили встановити, що середня міцність з'єднань з інтерметалідного сплаву TiAlNb, отриманих з використанням прошарку зі сплаву NbTi, становить 988,2 МПа, а використання при зварюванні наношаруватого прошарку системи Al–Ti дозволяє збільшити середню міцність зразків до 1279,8 МПа. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 8.

*Ключові слова:* інтерметалідний сплав TiAlNb, дифузійне зварювання, проміжні прошарки, мікроструктура з'єднань

Алюмініди титану є представниками важливого класу сплавів, що містять унікальний набір фізико-механічних властивостей, який робить їх перспективними для виготовлення елементів авіадвигунів. Основним недоліком зазначених сплавів є низька пластичність при кімнатній температурі, що ускладнює їх технологічну обробку і промислове використання.

Одним з напрямків можливого вирішення проблеми підвищення пластичності і, відповідно, технологічності є створення сплавів з орто- або  $V_2$ -структурою. Відомо, що додавання ніобію в  $\gamma$ -TiAl сприяє підвищенню його пластичності [1]. З цією метою алюмініди титану легують досить значною кількістю ніобію (до 25 ат. %) та іншими  $\beta$ -стабілізаторами. Однак при багатьох позитивних характеристиках орторомбічні сплави з вмістом ніобію до 25 ат. % мають підвищену щільність (6,9 г/см<sup>3</sup>). Крім того, високий вміст ніобію призводить до значного подорожчання сплавів.

Сучасною тенденцією розвитку технології жароміцних інтерметалідів на основі TiAl є створення класу сплавів, що мають в своєму складі третю фазу  $\beta$ , присутність якої полегшує технологічну обробку матеріалу, в тому числі прокатку

і гаряче пресування [2–4]. Сплави  $\gamma$ -TiAl містять 42..46 ат. % алюмінію і в якості лігатури в сумі до 10 ат. % перехідні метали, що стабілізують первинну  $\beta$ -Ti фазу (відому в низькотемпературному упорядкованому стані як  $V_2$ -фаза з решіткою ОЦК). Крім обов'язкового легування Nb, можуть використовуватися такі  $\beta$ -стабілізатори, як Mo, Ta, Zr, Cr, W, V. Їх застосування призводить до збереження в сплаві при кристалізації відносно малої об'ємної фракції залишкової  $V_2$ -фази, пластичної як при кімнатній, так і при високих температурах. Для створення  $V_2$ -фази може використовуватися молібден, який має високу  $\beta$ -стабілізуючу активність (звідси з'явилася абревіатура TNM – TiAl–Nb–Mo) [5–7]. Створення сплавів типу TNM дозволяє вирішити проблему низької пластичності інтерметалідів при кімнатній температурі, а також підвищити стійкість роботи виробів при високих температурах.

В даний час увага дослідників приділяється створенню інтерметалідних сплавів потрібної системи Ti–Al–Nb. Складність отримання з'єднань з них методом дифузійного зварювання, насамперед, полягає в наявності на їх поверхні шару оксиду, який перешкоджає утворенню зварного з'єд-

Піскун Н.В. – [orcid.org/0000-0003-1459-2310](https://orcid.org/0000-0003-1459-2310), Фальченко Ю.В. – [orcid.org/0000-0002-3028-2964](https://orcid.org/0000-0002-3028-2964),  
Петрушинець Л.В. – [orcid.org/0000-0001-7946-3056](https://orcid.org/0000-0001-7946-3056), Устінов А.І. – [orcid.org/0000-0002-8855-3499](https://orcid.org/0000-0002-8855-3499),  
Мельніченко Т.В. – [orcid.org/0000-0002-1460-5532](https://orcid.org/0000-0002-1460-5532), Статкевич І.І. – [orcid.org/0000-0001-9403-2123](https://orcid.org/0000-0001-9403-2123)

© Н.В. Піскун, Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, А.І. Устінов, Т.В. Мельніченко, І.І. Статкевич, 2020

нання. Сплави цієї групи також мають недостатню пластичність, що, в свою чергу, перешкоджає схопленню контактних поверхонь на стадії утворення фізичного контакту. Відомі праці з дифузійного зварювання алюмінідів титану.

Автори [8] досліджували можливість дифузійного зварювання сплаву  $\gamma$ -TiAl. Було встановлено, що найвищі значення міцності на зсув були отримані на режимі:  $T_{зв} = 1000$  °C,  $P_{зв} = 10$  МПа,  $t = 300$  хв. (388,4 МПа). Незважаючи на бездефектність з'єднань усі зразки руйнувались при значеннях міцності на зсув на рівні 25 % від основного металу, причиною чого є наявність крихкої фази  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al вздовж стику.

В роботі [9] було показано, що при однаковому режимі зварювання сплаву TiAl з високим вмістом Nb ( $T_{зв} = 1100$  °C,  $P_{зв} = 30$  МПа,  $t = 45$  хв.), зниження шорсткості з 0,261 до 0,062 мкм дозволяє підвищити міцність на зсув на 100 МПа (до 383 МПа). Контроль шорсткості поверхонь зразків також позитивно впливає на формування структури з'єднань – з її зменшенням фаза  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al в стику зникає. Проведення термообробки сприяє усуненню лінії з'єднання, дещо підвищуючи тим самим міцність на зсув, але значно змінюючи мікроструктуру основного матеріалу. Вона стає грубозернистою, повністю пластинчастою.

Автори роботи [10] з метою інтенсифікації процесу утворення з'єднання сплаву TiAl з високим вмістом Nb при дифузійному зварюванні в якості джерела нагріву використовували імпульсний струм. Припускається, що плазма, яка утворюється в проміжках між поверхнями, активує та очищує їх, видаляючи оксиди та забруднення. Оптимальні параметри зварювання були наступні:  $T_{зв} = 1200$  °C,  $P_{зв} = 15$  МПа,  $t = 60$  хв. При даному режимі в зоні з'єднання вихідна ламелярна мікроструктура перетворюється на дуплексну, яка має вищі механічні властивості. Підвищення тиску до 30 МПа при температурі зварювання 1200 °C сприяє інтенсивному росту зерна, що призводить до падіння міцності з'єднань на розрив з 657 до 574 МПа.

Автори [11] вказують на необхідність проходження рекристалізаційних процесів в стику для отримання якісного з'єднання сплаву TiAl з високим вмістом Nb. Дифузійне зварювання при температурі вище 1100 °C і тиску 30 МПа призводить до перекристалізації на границі контакту, сприяючи міграції границі розділу. Міцність з'єднань на зсув зростає зі збільшенням температури і тиску зварювання та досягає найбільшого значення (близько 400 МПа) при наступних параметрах режиму:  $T_{зв} = 1150$  °C,  $P_{зв} = 30$  МПа,  $t = 45$  хв.;  $T_{зв} = 1100$  °C,  $P_{зв} = 40$  МПа,  $t = 45$  хв.

Одним з методів активації зварювальних поверхонь є застосування проміжних прошарків,

використання яких дозволяє локалізувати пластичну деформацію безпосередньо в стику та мінімізувати вимоги до шорсткості і якості підготовки поверхонь.

В роботі [12] вивчали можливість дифузійного зварювання  $\gamma$ -TiAl з використанням в якості проміжного прошарку суміші порошоків титану, алюмінію та вуглецю високої чистоти. Порошки холодним способом пресували в циліндричні зразки товщиною 0,5 мм. Отриманий таким чином прошарок поміщали поміж зразками, що зварювали, і нагрівали до температури плавлення алюмінію (660 °C) під тиском 15...55 МПа. Порошкова суміш вступала в реакцію та утворювала на границі з алюмінідом титану шар TiAl<sub>3</sub> та пористу суміш фаз  $\gamma$ -TiAl і TiC в центральній ділянці області з'єднання. Найвищі значення міцності на розрив (близько 70 МПа) були отримані при зварювальному тиску 30 МПа. Більші або менші його значення призводять до росту пористості і як наслідок зниження значень механічних властивостей.

Для зменшення хімічної неоднорідності в зоні з'єднання існує необхідність у застосуванні більш тонкої фольги, проте здатної до пластичного деформування в процесі зварювання. До таких матеріалів можна віднести фольги, отримані методом електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі. Як показали попередні дослідження в процесі зварювання вони можуть трансформуватися в структуру, близьку за хімічним складом до матеріалу, що зварюється [13].

Метою даної роботи є дослідження впливу дифузійного зварювання в вакуумі сплаву TiAlNb при використанні прошарків систем Nb–Ti або Al–Ti на формування структури та механічні властивості з'єднань.

**Методики досліджень, матеріали та підготовка зразків для зварювання.** Для проведення досліджень використовувався інтерметалідний сплав TiAlNb (Ti – 28,80Al – 11,27Nb – Cr3,51 – 3,16Zr, мас. %). Сплав був розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і отриманий методом електронно-променевої плавки із застосуванням більш легких  $\beta$ -стабілізаторів, а саме Cr та Zr при зменшенні концентрації Nb і зниженим до 28,80 мас. % вмісту Al.

Розроблений сплав має такі переваги.

По-перше, Nb підвищує опір повзучості внаслідок зниження дифузійної рухливості елементів, зміцнює  $\gamma$  і  $\alpha_2$ -фази, а також покращує стійкість TiAl до окислення.

По-друге, Zr і Cr також, як і молібден, стабілізують  $\beta$ -фазу. Zr і Cr легші за Mo і тому створений сплав має меншу щільність, що є вагомим аргументом для аерокосмічної промисловості. Щільність отриманого сплаву 4,11 г/см<sup>3</sup>, що майже в

1,7 рази менше, ніж для сплавів TNM ( $6,9 \text{ г/см}^3$ ). Крім того, Cr, особливо в мікрокількості, покращує корозійну стійкість.

Первинний зливок, одержаний методом електронно-променевої плавки, мав нерівномірну грубу мікроструктуру, неоднорідний розподіл елементів по полю зливка, а також безліч пор і тріщин. Всі ці недоліки і визначали його низькі механічні властивості при кімнатній температурі. Відомо, що перед використанням литого інтерметалідного матеріалу його необхідно піддавати газостатичному ізотермічному пресуванню, багатогодинній термічній обробці або прокатці [14].

Обробку зливка проводили методом індукційної безтигельної зонної плавки (ІБЗП) [15]. Мікроструктура зразка (рис. 1) після зонного переплаву складається з витягнутих в одному напрямку зерен з середнім розміром  $31,5 \text{ мкм}$ , які також мають внутрішню ламельну структуру, що складається з  $\gamma + \alpha_2$  пластинчастих колоній, уздовж яких з'являються виділення світлих шарів  $\beta$ -фази і голчасті –  $\gamma$ -фази. У центрі зразка границі між зернами тонкі і мають товщину  $2 \text{ мкм}$  [16].

Розрізання металу на зразки для зварювання проводили на електроерозійному верстаті. Для зварювання вирізали зразки розміром  $10 \times 10 \times 5 \text{ мм}$ .

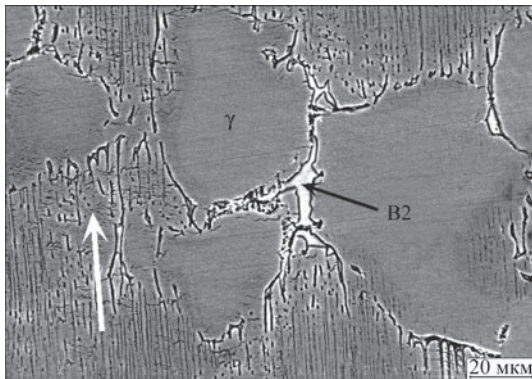


Рис. 1. Мікроструктура інтерметалідного сплаву після ІБЗП у вихідному стані (біла стрілка вказує напрямок кристалізації сплаву при плавці)

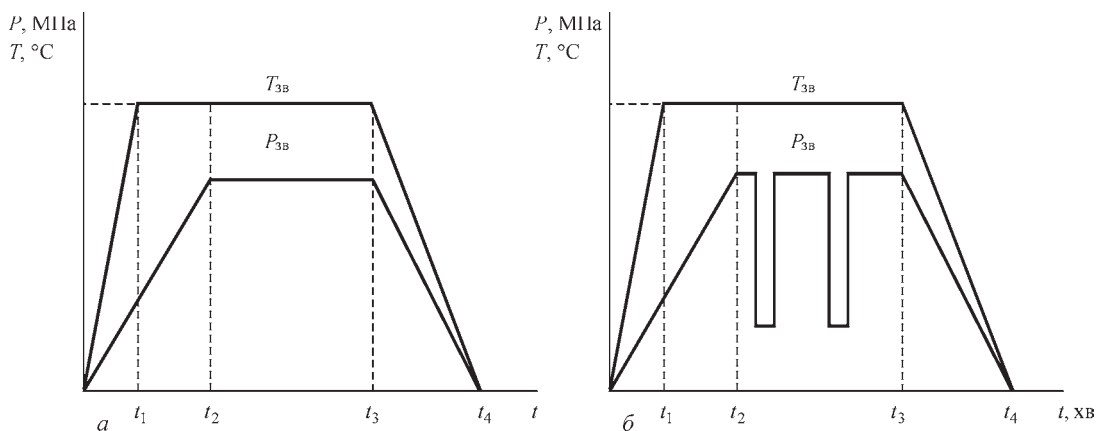


Рис. 2. Циклограма процесу ДЗВ: а – ДЗВ зі статичним навантаженням; б – ДЗВ з циклічним прикладенням тиску;  $T_{зв}$  – температура зварювання;  $P_{зв}$  – зусилля стиснення зразків;  $t_1$  – тривалість нагрівання до  $T_{зв}$ ;  $t_2$  – тривалість витримки при  $T_{зв}$ ;  $t_3$  – тривалість зварювання;  $t_4$  – тривалість охолодження

Поверхні, що підлягали з'єднанню, шліфували на алмазному крузі та знежирювали спиртом.

Зварювання інтерметалідного сплаву проводили на установці У-394М. Рівномірність нагріву зразків забезпечували за рахунок використання електронно-променевого нагрівача кільцевої форми, який встановлювали на рівні стика. Параметри процесу зварювання були наступні: температура зварювання  $T_{зв} = 1050 \dots 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , зварювальний тиск  $P_{зв} = 10 \dots 30 \text{ МПа}$ , тривалість зварювання  $t = 20 \dots 30 \text{ хв.}$ , вакуум в робочій камері підтримували на рівні  $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ . Зварювання зразків проводили із застосуванням статичного та циклічного навантаження. Циклограми процесів зварювання наведено на рис. 2.

Після створення у вакуумній камері розрядження на рівні  $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$  проводили нагрівання зразків. При досягненні необхідної температури і витримці на режимі протягом кількох хвилин для вирівнювання температурного поля (тривалість визначається розмірами зразків) прикладається тиск зварювання.

Загальний час зварювання при застосуванні статичного навантаження складав  $20 \text{ хв.}$ , а при застосуванні циклічного навантаження  $30 \text{ хв.}$  При циклічному навантаженні застосовували 3 цикли навантаження–розвантаження зразків.

Зварювання зразків проводили як без застосування проміжних прошарків, так і з прошарками у вигляді фольги. В якості прошарків використовували ніобій-титановий сплав або наночарувату фольгу системи Al–Ti.

Прошарок зі сплаву NbTi був одержаний за технологією електронно-променевої плавки з проміжною ємністю інтерметалідного сплаву системи TiAl та ніобієвого сплаву 5ВМЦ. Ніобій в сплаві сприяє підвищенню жароміцності, пластичності і опору окисленню. Склад отриманого NbTi сплаву: Nb – 43,49Ti – 3,06W – 2,35 Al, мас. %.

Як показали дослідження, твердість металу однорідна і по перетину зливка складає  $HV = 1810 \dots 1930 \text{ МПа}$ . Прошарок зі сплаву NbTi

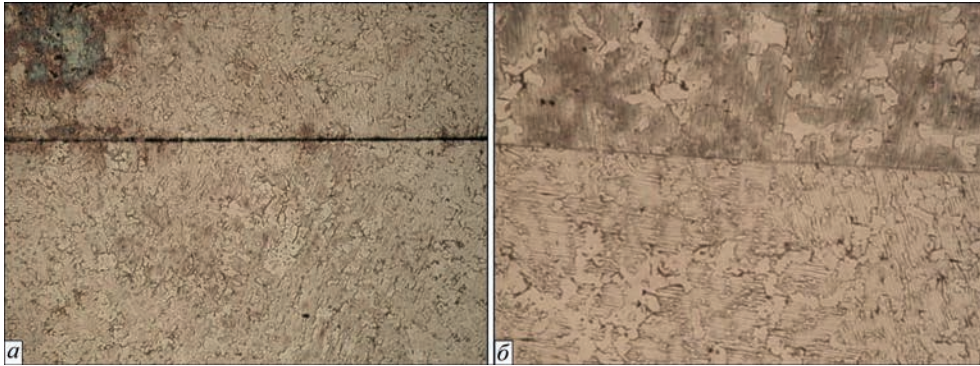


Рис. 3. Мікроструктура ( $\times 25$ ) зони з'єднання сплаву TiAlNb при зварюванні на режимі: а –  $T_{зв} = 1050\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 10\text{ МПа}$ ,  $t = 20\text{ хв.}$ ; б –  $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 30\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв.}$

вирізали на електроерозійному верстаті, після чого проводили шліфування його поверхонь. Товщина прошарку складала 1 мм.

Наночарувату фольгу на основі систем Al–Ti отримували методом електронно-променевого випаровування та конденсації у вакуумі. Процес осадження полягає в пошаровій конденсації елементів на горизонтальну підкладку, що обертається, яка закріплена на валу установки УЕ204.

Наночарувату фольгу (табл. 1) для використання в якості проміжного прошарку вибирали виходячи зі складу матеріалу, що зварювали, таким чином, щоб компоненти прошарку виступали легуючими елементами основного матеріалу. Фольга характеризується рівномірним розподілом елементів по товщині.

Дослідження структури та фазового складу отриманих з'єднань проводили за допомогою методів оптичної мікроскопії на мікроскопі «Neophot-32» та скануючої електронної мікроскопії (SEM) на мікроскопі: CAMSCAN 4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу Oxford Inca Energy 200. Для визначення хімічного складу елементів в зоні з'єднання дослідження проводили на плоских зразках, які виготовляли за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального обладнання фірми Struers. За цією методикою були виготовлені шліфи як поперечною перерізу фольги, так і зварних з'єднань.

Для виявлення мікроструктури зразків методом оптичної металографії здійснювали травлення в реактиві, що складається з суміші плавикової та азотної кислот у співвідношенні: 1 частина плавикової (HF) і 3 частини азотної (HNO<sub>3</sub>). Фотографії мікроструктури з'єднань отримували за допомогою цифрової фотокамери С-3000 фірми «OLYMPUS».

Мікротвердість зразків виміряли на твердометрі М-400 фірми «LECO» алмазною пірамідкою. Значення навантаження складало 25 г.

Таблиця 1. Загальна характеристика фольги Al/Ti

Фольга	Загальна товщина фольги, мкм	Товщина шару, нм		Склад фольги, ат. %		Склад фольги, мас. %	
		Al	Ti	Al	Ti	Al	Ti
Al/Ti	25	30	25	47,14	52,86	33,45	66,55

Зразки для механічних випробувань вирізали зі зварних з'єднань за допомогою електроерозійного верстата. Розмір зразків становив 4×4×8 мм. На одному з отриманих після зварювання зразків проводили металографічні дослідження структури та хімічного складу, а інші використовували для оцінки механічних властивостей зварних з'єднань.

**Зварювання інтерметалідного сплаву TiAlNb без використання проміжних прошарків.** Зварювання інтерметалідного сплаву TiAlNb проводили при температурі  $T_{зв} = 1050\text{ }^\circ\text{C}$ , тиску  $P_{зв} = 10\text{ МПа}$ , протягом 20 хв. Як показали металографічні дослідження зразків, в стику спостерігається лінія з'єднання, вздовж якої знаходиться значна кількість дефектів у вигляді ланцюжка пор, що добре виявляється при хімічному травленні з'єднання (рис. 3, а).

Підвищення параметрів режиму зварювання до  $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 30\text{ МПа}$  при витримці протягом 30 хв. дозволяє значно зменшити кількість дефектів в стику (рис. 3, б). При цьому мікротвердість матеріалу безпосередньо в зоні з'єднання складає  $HV\ 4800\text{ МПа}$ , на відстані 20 мкм від стику – відповідно  $HV\ 4730\text{ МПа}$ , а на відстані 50 мкм –  $HV\ 4180\text{ МПа}$ .

**Зварювання інтерметалідного сплаву TiAlNb з використанням прошарку на основі сплаву NbTi.** Застосування при зварюванні прошарку з більш м'якого матеріалу ніж інтерметалідний сплав дозволяє покращити умови формування зварного з'єднання (рис. 4). При зварюванні на режимі:  $T_{зв} = 1050\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P_{зв} = 15\text{ МПа}$  та  $t = 30\text{ хв.}$ , у стику спостерігається дифузійна зона, структура металу якої відрізняється від структури інтерметалідного сплаву TiAlNb (рис. 4, а). З двох боків (відносно прошарку) ця зона відокремлена від інтерметалідного сплаву чіткими лініями, вздовж яких спостерігається скупчення дефектів.

При збільшенні параметрів зварювання до температури  $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$  та значення тиску  $P_{зв} = 30\text{ МПа}$ , при збереженні часу витримки  $t = 30\text{ хв.}$ , кількість дефектів в стику значно зменшується (рис. 4, б).

Застосування електронної мікроскопії дозволяє виявити в стику значну дифузію хімічних елементів.

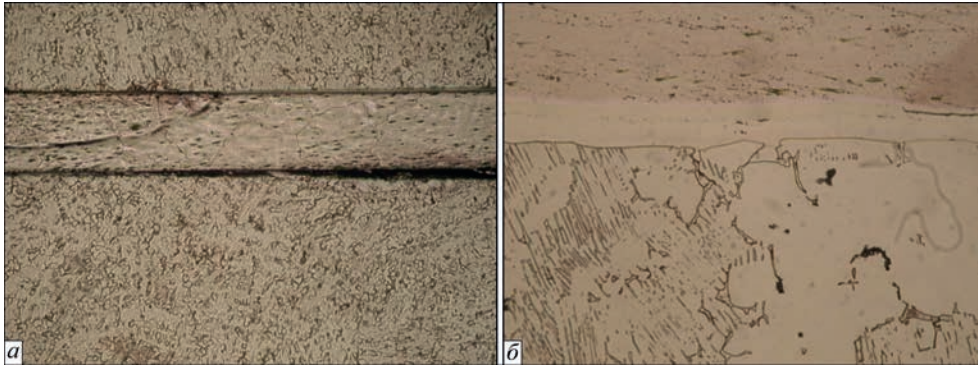


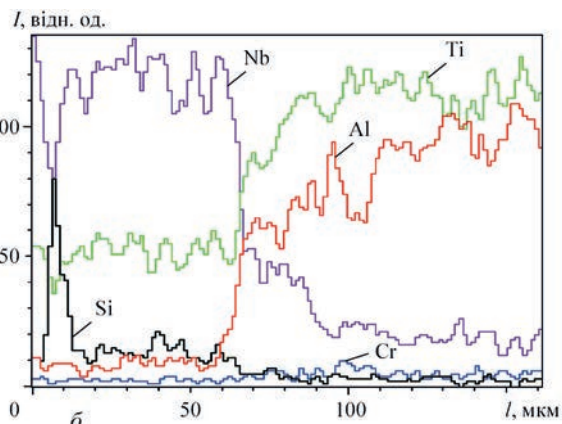
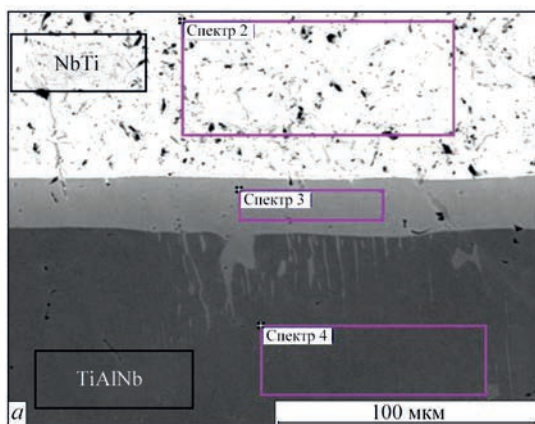
Рис. 4. Мікроструктура зони з'єднання сплаву TiAlNb при зварюванні з використанням прошарку зі сплаву NbTi на режимі:  $a - T_{зв} = 1050\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 15\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв.}$  ( $\times 25$ );  $b - T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 30\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв.}$  ( $\times 200$ )

тів (рис. 5). На рис. 5, а представлено половину зварного з'єднання.

Як видно з рис. 4, б та рис. 5, а в стику в процесі зварювання між матеріалом прошарку і інтерметалідним сплавом відбувається утворення загальних зерен. Вздовж границі прошарок–сплав TiAlNb спостерігається дифузійна зона товщиною 25...35 мкм. Хімічний склад цієї зони відповідає наступному вмісту елементів: 47,04Ti – 29,31Nb – 20,28Al – 1,97Cr – 1,4W, % ваг. В середній частині хімічний склад прошарку внаслідок його значної товщини зберігається (66,34Nb – 28,83Ti – 3,48W – 1,35Al, мас. %).

Як показують результати досліджень, в приконтатній зоні прошарок–інтерметалідний сплав спостерігається підвищення значень мікротвердості до  $HV\ 5090\text{ МПа}$ . Мікротвердість в самому інтерметалідному сплаві, на відстані 0,1 мм від стику становить  $HV\ 3670\text{ МПа}$ , а на відстані 2 мм –  $HV\ 4120\text{ МПа}$ , в центральній частині прошарку відповідно  $HV\ 2440\text{ МПа}$ .

**Зварювання інтерметалідного сплаву TiAlNb з використанням наносаруватого прошарку**



Спектр	Хімічний склад, мас. %				
	Al	Ti	Cr	Nb	W
2	1,35	38,83	-	66,34	3,48
3	20,28	47,04	1,97	29,31	1,4
4	31,38	56,56	2,56	9,49	-

Рис. 5. Мікроструктура зони з'єднання сплаву TiAlNb, отриманого з використанням прошарку зі сплаву NbTi на режимі:  $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 30\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв.}$  (а); розподіл хімічних елементів в стику (б); вміст хімічних елементів в окремих ділянках в зоні з'єднання (в)

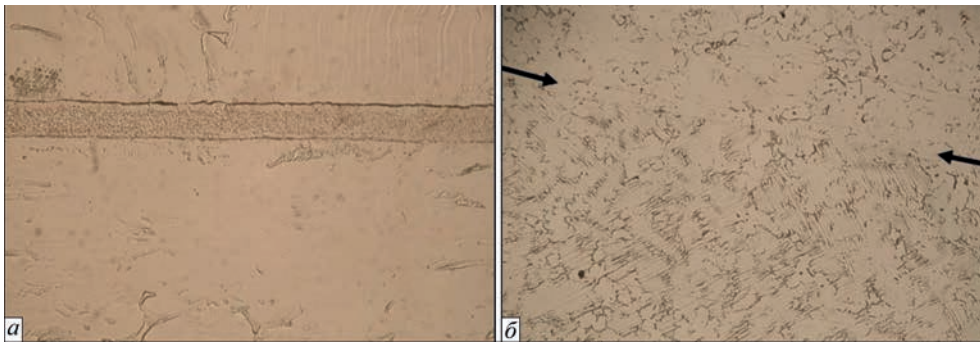
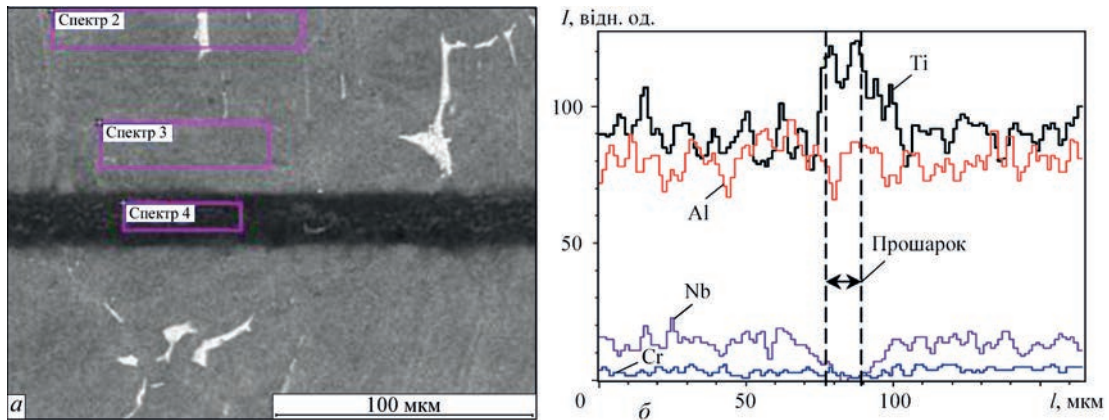


Рис. 6. Мікроструктура зони з'єднання сплаву TiAlNb при зварюванні з використанням наносаруватого прошарку системи Al-Ti на режимі: а –  $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 30\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв.}$  ( $\times 500$ ); б –  $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 цикли тиску  $P_{зв} = 30\text{ МПа}$ ;  $t = 30\text{ хв.}$  ( $\times 50$ )



Спектр	Хімічний склад, мас. %			
	Al	Ti	Cr	Nb
2	32,83	55,84	3,28	8,05
3	35,14	55,93	2,88	6,05
4	31,31	67,12	1,57	-

Рис. 7. Мікроструктура зони з'єднання сплаву TiAlNb, отриманого з використанням наносаруватого прошарку системи Al-Ti на режимі:  $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ , 3 цикли тиску  $P_{зв} = 30\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв.}$  (а); розподіл хімічних елементів в стикі (б) та вміст хімічних елементів в окремих ділянках в зоні з'єднання

15...20 мкм (рис. 7, а), за хімічним складом близько до хімічного складу інтерметалідного сплаву.

Хімічний склад елементів в зоні з'єднання становить: 67,12Ti – 31,31Al – 1,57 Cr, мас. %. Тобто, після зварювання інтерметалідного сплаву з використанням наносаруватого прошарку в стикі формується дифузійна зона, в якій спостерігається підвищений вміст титану (67,12 %), алюмінію (31,31 %), незначний вміст хрому на рівні 1,57 мас. % (рис. 7, б).

Як показують результати досліджень, в дифузійній зоні відбувається підвищення значень мікротвердості до  $HV = 5160...5400\text{ МПа}$ . Значення мікротвердості в інтерметалідному сплаві становить  $HV 4370\text{ МПа}$ .

Таблиця 2. Параметри зразків та результати випробувань зразків на стиснення

Номер зразка	Тип з'єднання	Площа зразка $F$ , мм	Тимчасовий опір $\sigma_{ст}$ , МПа	Межа течучості $\sigma_{ст02}$ , МПа	Відносне скорочення при максимальному зусиллі $\delta^{(ст)}$ , %	Модуль пружності $E_1$ , МПа
1-1	Зварювання з прошарком зі сплаву NbTi	15,52	1021,2	637,0	10,5	71893,0
1-2		16,10	1044,4	608,0	11,8	87872,0
1-3		15,54	898,8	600,0	9,7	84306,0
2-1	Зварювання з наносаруватим прошарком	16,28	1153,1	605,0	12,3	90327,0
2-2		16,34	1435,3	628,0	19,1	84784,0
2-3		16,92	1250,9	615,0	13,6	95480,0

**Дослідження механічних властивостей зварних з'єднань.** Дослідження міцності зварних з'єднань на стиснення проводили згідно стандарту ASTM D695. Механічні властивості сплавів при кімнатній температурі досліджували шляхом одновісного стиснення з використанням випробувальної машини INSTRON 8802 та екстензометра 2620-601. Швидкість деформації складала  $2 \cdot 10^{-4}\text{ с}^{-1}$ . Використання методу стиснення найбільш ефективно тоді, коли зразки мають невеликі розміри. Реалізується діаграма в координатах  $\sigma$ - $\epsilon$ . В табл. 2 наведено параметри зразків та результати випробувань зразків на стиснення.

За результатами випробувань отримано серію діаграм в координатах  $\sigma$ - $\epsilon$ , які наведено на рис. 8.

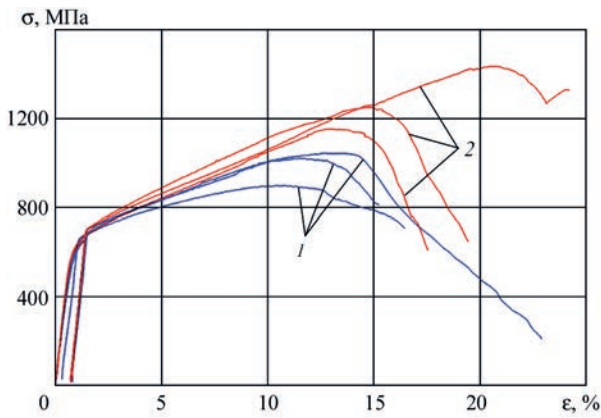


Рис. 8. Діаграми випробувань зразків зі сплаву TiAlNb, отриманих при зварюванні з прошарком зі сплаву NbTi (1) та при зварювання з нанощаруватим прошарком (2)

Механічні випробування з'єднань на стиснення дозволили встановити, що середня міцність з'єднань з інтерметалідного сплаву TiAlNb, отриманих з використанням прошарку зі сплаву NbTi, становить 988,2 МПа, а середня міцність зразків, отриманих з нанощаруватим прошарком системи Al–Ti, відповідно, 1279,8 МПа.

## Висновки

1. Зварювання інтерметалідного сплаву TiAlNb способом дифузійного зварювання в вакуумі при температурі  $T_{зв} = 1050$  °С, тиску  $P_{зв} = 10$  МПа, протягом 20 хв. не забезпечує отримання бездефектних з'єднань. Після зварювання в стику спостерігається лінія контакту, вздовж якої знаходиться значна кількість дефектів у вигляді ланцюжка пор.

2. Підвищення параметрів режиму зварювання до: температура  $T_{зв} = 1200$  °С, тиск  $P_{зв} = 30$  МПа, тривалість витримки  $t = 30$  хв., та використання пластичного прошарку з NbTi сплаву товщиною 1 мм дозволяє покращити умови формування зварного з'єднання та значно зменшити кількість дефектів в стику. Вдвоє границі прошарок–інтерметалічний сплав в процесі зварювання між матеріалом прошарку та інтерметалічним сплавом відбувається утворення загальних зерен та дифузійної зони товщиною 25...35 мкм.

3. Використання при зварюванні інтерметалідного сплаву TiAlNb нанощаруватих проміжних прошарків системи Al–Ti загальною товщиною 25 мкм та циклічного навантаження у вигляді 3 циклів навантаження–розвантаження призводить до зміни характеру структури в зоні з'єднання. На мікроструктурі зварних з'єднань, отриманих за допомогою оптичної металографії, лінія з'єднання не спостерігається. Застосування електронної мікроскопії дозволяє виявити в стику дифузійну зону товщиною 15...20 мкм за хімічним складом близькою до хімічного складу інтерметалідного сплаву.

4. Дослідження міцності зварних з'єднань на стиснення дозволили встановити, що середня міцність

з'єднань з інтерметалідного сплаву TiAlNb, отриманих з використанням прошарку зі сплаву NbTi, становить 988,2 МПа, а використання при зварюванні нанощаруватого прошарку системи Al–Ti дозволяє збільшити середню міцність зразків до 1279,8 МПа.

## Список літератури/References

1. Бочвар Г.А., Саленков В.А. (2004) Исследование сплавов на основе алюминидов титана с орторомбической структурой. *Технология легких сплавов*, **4**, 44–46.
2. Bochvar, G.A., Salenkov, V.A. (2004) Investigation of alloys based on titanium aluminide with orthorhombic structure. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **4**, 44–46 [in Russian].
3. Clemens H., Mayer S. (2013) Design, Processing, Microstructure, Properties, and Applications of Advanced Intermetallic TiAl Alloys. *Advanced Engineering Materials*, **4**, 191–215.
4. Huber D., Werner R., Clemens H., Stockinger M. (2015) Influence of process parameter variation during thermo-mechanical processing of an intermetallic  $\beta$ -stabilized  $\gamma$ -TiAl based alloy. *Materials Characterization*, **109**, 116–121.
5. Godor F., Werner R., Lindemann J., Clemens H. (2015) Characterization of the high temperature deformation behavior of two intermetallic TiAl–Mo. *Materials Science and Engineering: A*, **648**, 208–216.
6. Appel F. Paul J.D.H., Oering M. (2011) Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology. Weinheim, WILEY-VCH.
7. Huang Z.W., Cong T. (2010) Microstructural instability and embrittlement behaviour of an Al-lean, high-Nb  $\gamma$ -TiAl-based alloy subjected to a long-term thermal exposure in air. *Intermetallics*, **18**, 161–172.
8. Schwaighofer E., Clemens H., Mayer S. et al. (2014) Microstructural design and mechanical properties of a cast and heat-treated intermetallic multi-phase  $\gamma$ -TiAl based alloy. *Ibid*, **44**, 128–140.
9. Cam G., Ipekoglu G., Bohm K.-H., Kocak M. (2006) Investigation into the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded TiAl alloys. *J. of Materials Science*, **16**, 5273–5282.
10. Lei Zhu, Xiang-Yi Xue, Bin Tang et al. (2016) The Influence of Surface Roughness on Diffusion Bonding of High Nb Containing TiAl Alloy. Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Advanced Material Engineering (AME 2016), 635–643.
11. Kun Zhao, Yong Liu, Lan Huang et al. (2016) Diffusion bonding of Ti–45Al–7Nb–0.3W alloy by spark plasma sintering. *J. of Materials Processing Technology*, **230**, 272–279.
12. Bin Tang, Xian Sheng Qi, Hong Chao Kou et al. (2016) Recrystallization Behavior at Diffusion Bonding Interface of High Nb Containing TiAl Alloy. *Advanced Engineering Materials*, **4**, 657–664.
13. Cao J., Feng J.C., Li Z.R. (2007) Effect of reaction heat on reactive joining of TiAl intermetallics using Ti–Al–C interlayers. *Scripta Materialia*, **5**, 421–424.
14. Ustinov A.I., Falchenko Yu.V., Ishchenko A.Ya. et al. (2008) Diffusion welding of  $\gamma$ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **8**, 1043–1045.
15. Pflumma R., Donchev A., Mayer S. et al. (2014) High-temperature oxidation behavior of multi-phase Mo-containing  $\gamma$ -TiAl-based alloys. *Ibid*, **53**, 45–55.
16. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties control of c-TiAl(Nb, Cr, Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. *J. of Alloy and Compounds*, **643**, 182–166.
17. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V. et al. (2017) Room-temperature tensile properties of float-zone processed  $\beta$ -stabilized  $\gamma$ -TiAl(Nb,Cr,Zr) intermetallic. *J. Materials Letters*, **188**, 88–91.

## FORMATION OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF JOINTS OF INTERMETALLIC ALLOY TiAlNb IN DIFFUSION WELDING

N.V. Piskun, Yu.V. Falchenko, L.V. Petrushynets, A.I. Ustinov, T.V. Melnichenko, I.I. Statkevych

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

The impact of technological measures in vacuum diffusion welding on formation of the structure and mechanical properties of joints of TiAlNb intermetallic alloy was studied in the work. It is shown that welding of intermetallic alloy by the method of vacuum diffusion welding at temperature  $T_w = 1050$  °C, pressure  $P_w = 10$  MPa, for 20 min does not ensure producing sound joints. After welding, the joint line is visible in the butt, along which there is a considerable number of defects in the form of pore lines. Increase of welding parameters up to the temperature  $T_w = 1200$  C, pressure  $P_w = 30$  MPa, welding time of 30 min, as well as application of a ductile interlayer from NbTi alloy 1 mm thick allows improving the conditions of welded joint formation and greatly reducing the number of defects in the butt joint. During welding, common grains and diffusion zone 25 – 35 ~m thick form between the interlayer material and intermetallic alloy. Application of nanolayered interlayer of Al-Ti system of the total thickness of 25 ~m in welding of TiAlNb intermetallic alloy, combined with cyclic loading in the form of 3 cycles of loading-unloading leads to a change of the nature of the structure in the joint zone. In the microstructures of welded joints obtained by optical metallography, the joint line is not visible. Application of electron microscopy allows detecting in the butt joint a diffusion zone 15 to 20 ~m thick, close by its chemical composition to that of the intermetallic alloy. Investigation of the compressive strength of welded joints demonstrated that the average strength of joints of TiAlNb intermetallic alloy, produced using an interlayer from NbTi alloy, is equal to 988.2 MPa, and application of a nanolayered insert of Al-Ti system in welding allows increasing the average strength of the samples up to 1279.8 MPa. 16 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

*Keywords: TiAlNb intermetallic alloy, diffusion welding, interlayers, joint microstructure*

Надійшла до редакції 20.12.2019

### VI Міжнародна конференція

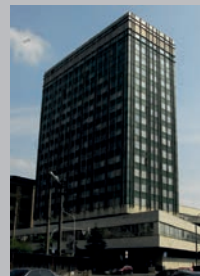
## ТИТАН 2020: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
1–3 червня 2020 р.

Голова програмного комітету  
академік Б.Є. Патон



Национальна академія наук України  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ  
Запорізький титано-магнієвий комбінат  
Інститут титану  
Национальний університет «Запорізька політехніка»  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»



#### Тематика конференції

- Технології та обладнання для отримання губки, злитків та відливок з титану та його сплавів
- Адитивні технології в виробництві виробів з титанових сплавів
- Деформаційна обробка титану
- Виробництво та використання порошоків титану
- Структура та властивості титанових сплавів
- Нові сплави на основі титану та інтерметалідів титану
- Інженерія поверхні титанових сплавів
- Технології зварювання та пайки титанових сплавів
- Застосування виробів та конструкцій з титану та сплавів на його основі в промисловості

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ  
вул. Казимира Малевича, 11,  
м. Київ, 03150, Україна  
Тел./факс: (38044) 200-82-77  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.pwi-scientists.com/ukr/titan2020



Інформаційна підтримка:  
«Сучасна електрометалургія»  
«Автоматичне зварювання»  
«Biuletyn Instytutu Spawalnictwa»



Титан 2018. Производство и применение в Украине: Сб. докл. межд. конф. / под ред. проф. С.В. Ахонина. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 168 с.  
В сборнике представлен 41 доклад международной конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине» (11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины), в которых отражены научные достижения и практические результаты в области производства, сварки, обработки и применения титана и его сплавов. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты из Австралии, Польши и Украины.