

**Лідія Петрушинець<sup>1</sup>, Олег Новомлинець<sup>2</sup>, Юрій Фальченко<sup>3</sup>,  
Тетяна Мельниченко<sup>4</sup>, Леонід Радченко<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
Інститут електрозварювання ім. С.О. Патона НАН України (Київ, Україна)  
E-mail: [petrushynets@paton.kiev.ua](mailto:petrushynets@paton.kiev.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>  
ResearcherID: [G-2891-2016](https://orcid.org/0000-0001-7946-3056). Scopus Author ID: [55521777800](https://orcid.org/0000-0001-7946-3056)

<sup>2</sup>доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технологій зварювання та будівництва, ректор  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [oon1@ukr.net](mailto:oon1@ukr.net). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>  
ResearcherID: [F-8166-2014](http://orcid.org/0000-0002-0774-434X). Scopus Author ID: [56938958300](http://orcid.org/0000-0002-0774-434X)

<sup>3</sup>доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувачий відділом,  
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України (Київ, Україна)  
E-mail: [falchenko@paton.kiev.ua](mailto:falchenko@paton.kiev.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3028-2964>  
ResearcherID: [W-2793-2017](http://orcid.org/0000-0002-3028-2964). Scopus Author ID: [7801687476](http://orcid.org/0000-0002-3028-2964)

<sup>4</sup>доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України (м. Київ, Україна)  
E-mail: [melnynchenko21@ukr.net](mailto:melnynchenko21@ukr.net). Scopus Author ID: [12802654100](https://orcid.org/0000-0002-4235-2413)

<sup>5</sup>інженер  
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України (Київ, Україна)  
E-mail: [leonid190@gmail.com](mailto:leonid190@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4235-2413>

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОМІЖНИХ ПРОШАРКІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ОРТОАЛЮМІНІДУ ТИТАНУ З НІКЕЛЕВИМ СПЛАВОМ

Проведено огляд стану проблеми зварювання жароміцного сплаву ЭИ437Б на основі нікелю та ортоалюмініду титану  $Ti_2AlNb$ . Оцінено можливість використання при дифузійному зварюванні у вакуумі багатошарової та градієнтної фольги на основі систем Al-Ni і Ni-Ti. Фольги отримували методом електронно-променевого випаровування та конденсації у вакуумі. Процес осадження полягає в пошаровій конденсації елементів на горизонтальну підкладку. Показано, що при безпосередньому зварюванні ортоалюмініду титану зі сплавом ЭИ437Б внаслідок сильної схильності матеріалів до утворення крихких фаз у стикі, у зоні з'єднання спостерігається суттєве підвищення мікротвердості до 2...4 разів у порівнянні з основним матеріалом (до 11,94 ГПа). Встановлено, що використання як проміжних прошарків шаруватої фольги (Ni/Ti, Al/Ni) дозволяє суттєво знизити перепад значень мікротвердості у стикі. При цьому мікротвердість у центральній частині зони з'єднання досягає 6,69...8,79 ГПа, що близько до значень мікротвердості  $Ti_2AlNb$ .

**Ключові слова:** ортоалюмінід титану; нікелевий сплав; шарувата фольга; проміжний прошарок; дифузійне зварювання у вакуумі; мікроструктура; мікротвердість.

Табл.: 2. Рис.: 12. Бібл.: 11.

**Актуальність теми дослідження.** Алюмініди титану являють собою важливий клас сплавів, що володіють низькою щільністю та зберігають високу міцність при підвищених температурах. Це робить їх перспективними для виготовлення елементів авіадвигунів. Одним із типів таких сплавів є орторомбічні алюмініди титану на основі інтерметалідної сполуки  $Ti_2AlNb$ , які можуть застосовуватись при підвищених температурах, наприклад, у реактивних двигунах [1]. Значний вміст Nb зумовлює суттєво вищу питому вагу в  $Ti_2AlNb$ , ніж у титанових сплавах та TiAl, проте вона майже на 40 % нижча ніж у сплавів на основі Ni, що забезпечує перевагу ортосплавів перед сталлями та сплавами на основі нікелю в питанні заощадження ваги [2]. Очевидно, що для застосування сплавів на основі  $Ti_2AlNb$  необхідно розробити технологію їх зварювання з іншими матеріалами, такими як сплави на основі Ni.

**Постановка проблеми.** Враховуючи суттєву різницю в хімічному складі та властивостях сплавів на основі  $Ti_2AlNb$  і Ni, з'єднання цих двох матеріалів є складним завданням. Наприклад, тільки титан із нікелем відповідно до фазової діаграми можуть взаємодіяти з утворенням ряду інтерметалідів, таких як  $Ti_2Ni$ ,  $TiNi$  та  $TiNi_3$  [3]. З чого випливає, що основною проблемою при зварюванні сплаву  $Ti_2AlNb$  з нікелевим сплавом є сильна схильність до утворення крихких фаз у зоні з'єднання, які можуть негативно вплинути на механічні

властивості. Існуючі технології зварювання плавленням цих матеріалів не дозволяють отримувати якісні зварні з'єднання через формування крихких фаз на границі оплавлення [4–6]. Перспективним методом з'єднання цієї групи сплавів є дифузійне зварювання [7].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанню з'єднання алюмінідів титану легованих ніобієм із нікелевими сплавами присвячено незначну кількість публікацій.

Автори [8] розглядали можливість з'єднання сплаву на основі  $Ti_{12}AlNb$  ( $Ti-24Al-15Nb-1Mo$ , ат. %) зі сплавом GH536 методом паяння, з використанням як припою сплаву  $NiCrFeSiB$  ( $Ni-7Cr-3Fe-4,5Si-3B$ , ваг. %). Показано, що оптимальним режимом паяння є температура  $1010\text{ }^{\circ}C$  і витримка 5 хв. Міцність зразків на розрив при кімнатній температурі в цьому випадку дорівнює 425 МПа. Зона з'єднання з боку  $Ti_{12}AlNb$  складається з шарів  $Ti_2Ni(Al,Nb)$ ,  $AlNi_2Ti$  і  $TiB_2$  з твердістю, яка в чотири рази перевищує значення притаманні основному матеріалу; центральна ділянка являє собою твердий розчин  $\gamma$ , у матриці якого випадають дисперсні частинки  $Ni_3Si$ ; з боку нікелевого сплаву утворюється дифузійний шар з окремими частинками боридів.

У роботі [9] паяння інтерметалідного сплаву  $Ti-13Al-28Nb-2Mo$ , ваг. % з нікелевим сплавом GH536 проводили через припій  $Au-17,5Ni$ , ваг. %. Максимальну міцність на розрив при кімнатній температурі ( $\sigma_B = 434$  МПа) вдалося отримати для зразків, які були спаяні при температурі  $980\text{ }^{\circ}C$  і тривалості процесу 15 хв. Вказується, що зона з'єднання являє собою окремі шари, типовий фазовий склад яких від сплаву  $Ti_3Al$  до GH536 змінюється таким чином:  $Ti_2AlNb$ ,  $NiTi(Au)$ ,  $AlNi_2Ti$ ,  $TiAu$ ,  $(Ni, Au)_{ss}$ ,  $Ni_3Nb$ , евтектика  $(Ni,Au)$  і фаза збагачена  $Ni$ . З боку інтерметалідного сплаву формується зона з мікротвердістю в 2,5 рази вищою ніж у основного металу, що пояснюється утворенням суцільного шару фаз  $AlNi_2Ti$  і  $NiTi$ .

Авторами [10] був використаний припій  $Ag-21Cu-25Pd$ , ваг. % для паяння алюмініду титану  $Ti-24Al-15Nb-1Mo$ , ат. % з нікелевим сплавом GH536. Підкреслюється, що  $Pd$  з припою переважно взаємодіє з  $Ti$  та  $Al$ , що своєю чергою пригнічує утворення крихких сполук систем  $Al-Ni-Ti$ ,  $Al-Cu-Ti$ ,  $Ti-Cu$ , а також фази  $Ni_3Ti$ . Типовий паяний шов має шаруватий характер і в основному складається з фаз  $B_2$ ,  $Ti_2AlNb$ ,  $TiPd$ ,  $AlPd$ ,  $(Cu, Pd)_{ss}$ ,  $Ni_3Ti$ ,  $Ti_3Pd_5$ ,  $(Ag, Cu)_{ss}$ , а також комплексних фаз  $(Cu, Fe, Cr, Ni)$  і  $(Ag, Fe, Cr, Ni)$ . Як і в попередніх публікаціях, відмічається значне зростання мікротвердості до 2,5 рази в зоні з'єднання поблизу інтерметалідного сплаву. З'єднання, отримані при температурі паяння  $980\text{ }^{\circ}C$  з витримкою протягом 10 хв, показали максимальну міцність на розрив при кімнатній температурі  $\sigma_B = 404$  МПа.

Автори [7] проводили дифузійне зварювання у вакуумі алюмініду титану  $Ti-24Al-15Nb-1Mo$ , ат. % зі сплавом GH536 через прошарки з нікелевої фольги та сплаву  $TiNiNb$  ( $Ti-33-43Ni-16-25Nb$ , ваг. %). У з'єднаннях, отриманих через нікель, відсутня взаємодія між прошарком і сплавом GH536. Проте з боку алюмініду титану іде активна реакція з утворенням кількох реакційних шарів. У зоні з'єднання відбувається формування крихких фаз  $Ni_2Ti$ ,  $AlNi_2Ti$  і  $Ni_3Ti$ . Максимальна міцність на зріз  $\tau_{zp} = 207$  МПа була отримана при температурі  $980\text{ }^{\circ}C$ , тиску 20 МПа, тривалості зварювання 20 хв. Використання прошарку  $TiNiNb$  сприяє зниженню дифузії  $Ti$  і  $Ni$  та формуванню меншого обсягу фаз системи  $Ni-Ti$ , проте сприяло утворенню багатокомпонентної крихкої фази  $(Ni, Ti, Nb, Fe, Cr)$ . Найвищою міцністю  $\tau_{zp} = 209$  МПа володіли зразки, що були отримані при температурі  $980\text{ }^{\circ}C$ , тиску 20 МПа, витримці 10 хв.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Із наведених робіт можна зробити висновок, що для отримання якісних з'єднань  $Ti_2AlNb$  з нікелевими сплавами необхідно обмежити дифузію  $Ni$  і  $Ti$ , що може бути забезпечено шляхом використання методів зварювання в твердій фазі із застосуванням багатощарових проміжних прошарків. Також варто знизити температуру та тривалість зварювання, що має сприяти зменшенню товщини шарів крихких фаз.

**Метою статті** є дослідження впливу багат шарових фольг на особливості формування з'єднань ортоалюмініду титану зі сплавом на нікелевій основі при дифузійному зварюванні у вакуумі. Дослідження проводилось з метою отримання розуміння поведінки компонентів сплавів при зварюванні різнорідних жароміцних матеріалів.

#### Виклад основного матеріалу.

**Методики досліджень, матеріали та підготовка зразків для зварювання.** У роботі досліджували можливість дифузійного зварювання у вакуумі ортоалюмініду титану з нікелевим сплавом. Хімічний склад сплавів приведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сплавів  $Ti_2AlNb$  і ЭИ437Б

Сплав	Елемент %, ваг.							
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W
$Ti_2AlNb$	10,83 – 13,61	–	43,11 – 47,00	–	–	–	38,42 – 43,85	0,82 – 1,80
ЭИ437Б	0,57 – 0,88	0,37 – 0,55	2,49 – 2,63	20,62 – 21,19	0,62 – 0,73	74,72 – 75,55	–	–

Різання пластин із жароміцних матеріалів на зразки для зварювання проводили на електроерозійному верстаті. Поверхні, що підлягали з'єднанню, шліфували на алмазному крузі та знежирювали спиртом.

Зварювання алюмініду титану з нікелевим сплавом проводили на установці для дифузійної зварювання У-394М, принципова схема якої наведена на рис. 1. Рівномірність нагріву зразків забезпечували за рахунок використання електронно-променевого нагрівача кільцевої форми, який встановлювали на рівні стика. Температуру зварювання вимірювали за допомогою хромель-алюмелевої термопари. Зварювальний тиск прикладали через механізм статичного навантаження. Параметри процесу зварювання були наступні: температура зварювання  $T_{зв} = 950$  °С, зварювальний тиск  $P_{зв} = 5$  МПа, тривалість зварювання  $t_{зв} = 5...20$  хв., вакуум в робочій камері підтримували на рівні  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па.

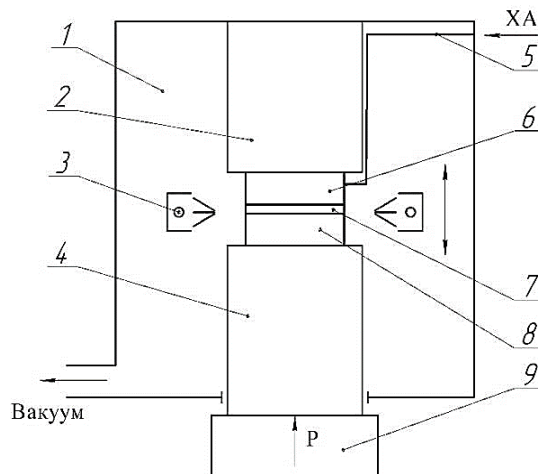


Рис. 1. Схема процесу дифузійного зварювання у вакуумі:

1 – вакуумна камера установки; 2 – верхній пуансон; 3 – електронно-променевий нагрівач; 4 – нижній пуансон; 5 – хромель-алюмелева термопара; 6, 8 – зразки, що зварюються; 7 – проміжний прошарок; 9 – механізм статичного навантаження

У роботі були використані багат шарові фольги на основі основних елементів, що входять до сплавів, які зварювались, а саме систем Al-Ni і Ni-Ti. Також досліджували можливість застосування градієнтних фольг згаданих систем, які починались і закінчувались шарами з інших елементів товщиною 3...7 мкм: Al-Ni (прошарки Cu), Al-Ni (прошарки Ti), Ni-Ti (прошарки Cu). Фольги були отримані 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 UE204.

Багатошарові фольги (табл. 2) для використання як проміжних прошарків при зварюванні вибирали виходячи зі складу матеріалів, що з'єднувалися таким чином, щоб компоненти прошарку виступали легуючими елементами основного матеріалу.

Таблиця 2 – Хімічний склад нанощаруватих фольг

№	Хімічний склад фольги, % ваг.				Товщина фольги, мкм
	Ti	Cu	Ni	Al	
1	67,25	–	32,75	–	30
2	78,7	100	21,3	–	35
3	–	–	86,78	13,32	35
4	–	100	87,97	12,03	20
5	100	–	84,83	15,17	25

Фольги характеризуються рівномірним розподілом елементів за товщиною. Мікροструктура фольги, що використовувалась у дослідженнях, показана на рис. 2.

Аналіз мікροструктури зварних з'єднань проводили за допомогою електронного мікроскопа CAMSCAN 4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу Oxford Inca Energy 200 для визначення хімічного складу на плоских зразках. Для цього за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального обладнання фірми Struers були приготовані шліфи поперечного перерізу фольг та зварних з'єднань.

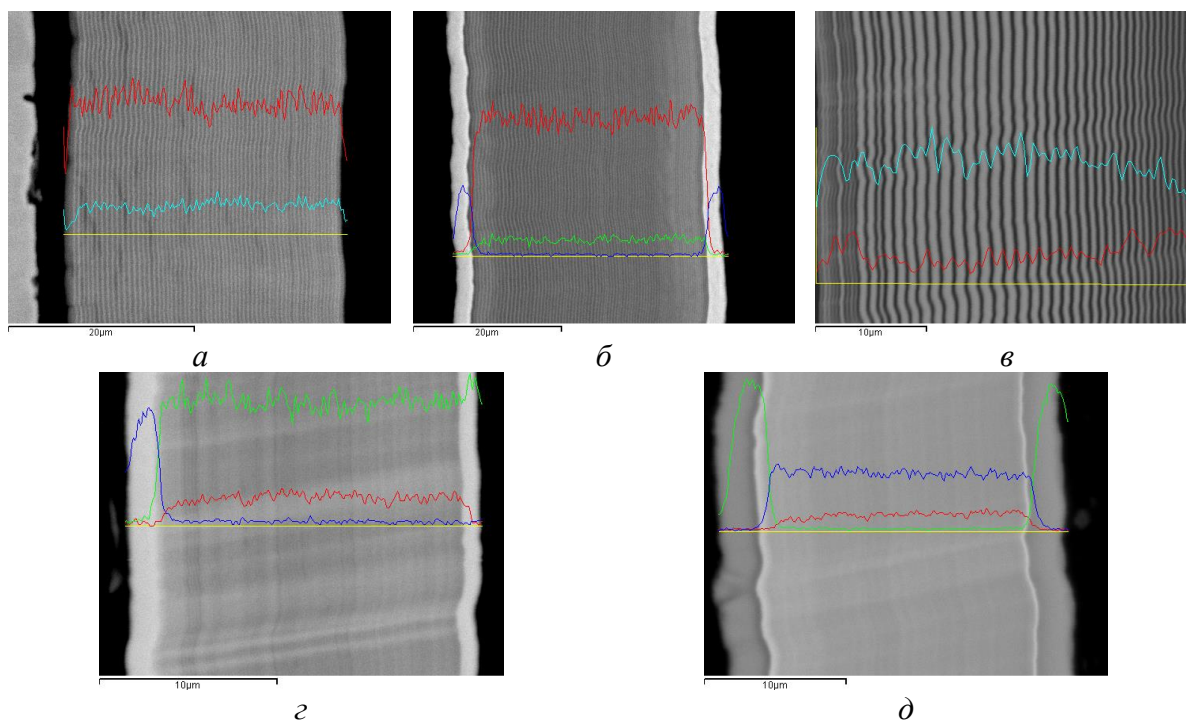


Рис. 2. Електронно-мікроскопічне зображення поперечного перерізу зразків багатошарових фольг: а – Ni-Ti, б – Cu-Ni/Ti-Cu, в – Al/Ni, г – Cu-Al/Ni-Cu, д – Ti-Al/Ni-Ti

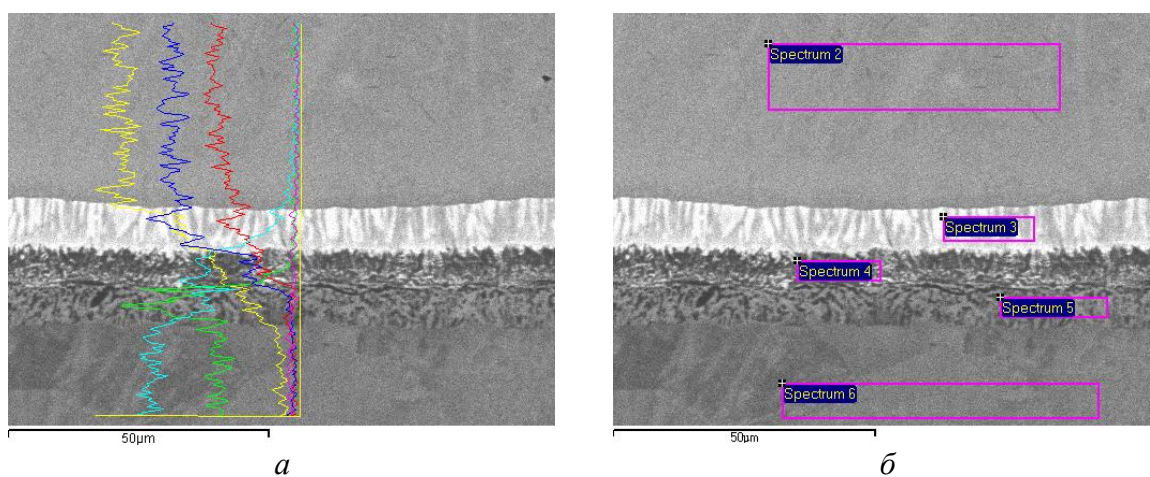
Оцінювання мікромеханічних властивостей зварних з'єднань проводили з використанням установки «Мікрон-гама» методом автоматичного індентування алмазною пірамідою Берковича ( $\alpha = 65^\circ$ ) при навантаженні 0,4 Н і швидкості навантаження 0,04 Н/с, з автоматично виконуваними навантаженням та розвантаженням протягом 20 с і записом діаграми в координатах Р (навантаження) – h (глибина впровадження індентора). Показники діаграми  $P_{max}$ ,  $h_{max}$  та інші фіксувалися автоматично за даними двох тисяч точок на діаграмі індентування і проводилося автоматичне обчислення таких характеристик матеріалу, як твердість,



модуль Юнга, коефіцієнт пластичності [11]. З метою збільшення діапазону вимірювань дослідження проводили під кутом 15–30° до зони з'єднання. У таблицях результатів досліджень використовували такі позначення: Р – навантаження, Н; Н – значення мікротвердості за Мейером, ГПа; Е – модуль Юнга, ГПа,  $K_{\text{пласт}}$  – коефіцієнт пластичності.

**Дифузійне зварювання без проміжних прошарків.** У роботі досліджували здатність до дифузійного зварювання у вакуумі сплаву на основі Ti2AlNb системи Ti-Al-Nb з нікелевим сплавом ЭИ437Б. За базовий варіант було прийнято зварне з'єднання без використання проміжних прошарків. Зварювання відбувалося при температурі  $T_{зв} = 950$  °С, зварювальному тиску  $P_{зв} = 5$  МПа, тривалості процесу  $t_{зв} = 20$  хв.

У процесі дослідження мікроструктури званого з'єднання виявлено 3 зони, які відрізняються за структурою та хімічним складом (рис. 3). Перша зона (7–10 мкм) характеризується стовбчастими кристалами білого та світло-сірого кольорів. Друга та третя зони (5–6 мкм кожна) відзначається рівномірно розташованими кристалами сірого та темного кольорів зі слабо вираженою стовбчастою структурою. Вони візуально мають схожу структуру, але відрізняються за хімічним складом (рис. 3, б, в).



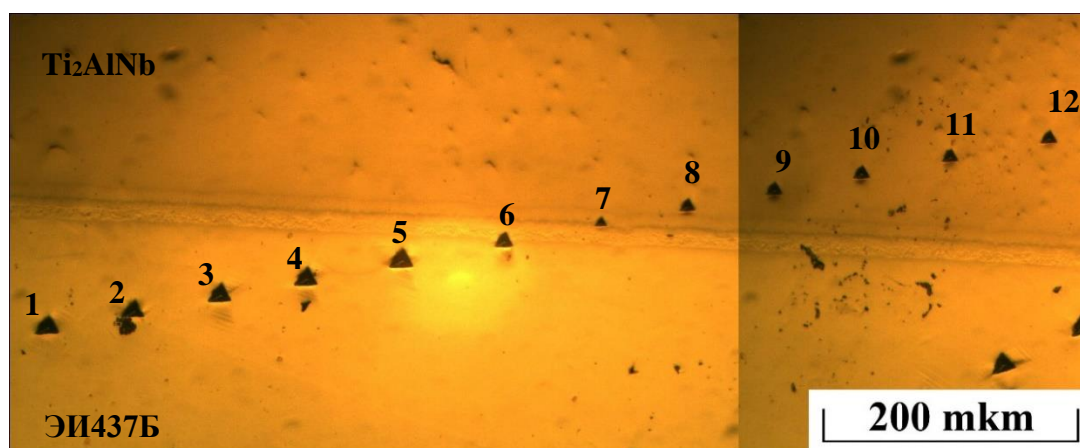
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W
Spectrum 2	13,29	45,81	–	–	–	40,08	0,82
Spectrum 3	10,42	30,93	0,69	–	18,77	37,44	1,74
Spectrum 4	9,19	21,42	4,35	0,42	52,30	12,32	–
Spectrum 5	1,66	11,78	24,92	–	60,23	1,41	–
Spectrum 6	0,88	2,61	20,89	0,74	74,88	–	–

в

Рис. 3. Мікроструктура (а, б) і вміст основних елементів (в) у зварному з'єднанні Ti2AlNb + ЭИ437Б, отриманого на режимі:  $T_{зв} = 950$  °С,  $P_{зв} = 5$  МПа,  $t_{зв} = 20$  хв

У стикі спостерігається активна зустрічна дифузія Al, Ti і Nb у напрямку ЭИ437Б та Ni і Cr в бік алюмініду титану. При цьому W накопичується в першій зоні, де його обсяг більш ніж вдвічі перевищує значення вмісту для вихідного матеріалу. В окремих ділянках зварного з'єднання спостерігаються тріщини, які поширюються вздовж лінії з'єднання. Переважна більшість тріщин спостерігається в першому (світлому) прошарку, причому тріщини розповсюджуються тільки в межах перехідних шарів.

У зоні з'єднання спостерігається суттєве підвищення мікротвердості (з 2,31...2,96 ГПа для ЭИ437Б і 6,84...7,70 ГПа для Ti2AlNb) до 11,94 ГПа (рис. 4). Це може бути результатом як інтенсивної дифузії вольфраму до границі розділу сплавів (його вміст у перехідному прошарку вдвічі більший ніж у вихідному металі), так і результатом утворення інтерметалідів Ni3Nb та Ni6Nb7. Суттєве зниження коефіцієнта пластичності може вказувати саме на формування в зоні з'єднання прошарку крихких фаз.



*a*

№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	K <sub>пласт</sub>
1	40	2,58	200,2	0,941
2	40	2,96	214,6	0,937
3	40	2,57	216,3	0,945
4	40	2,53	235,7	0,950
5	40	2,31	188,8	0,944
6	40	4,27	205,5	0,907

*б*

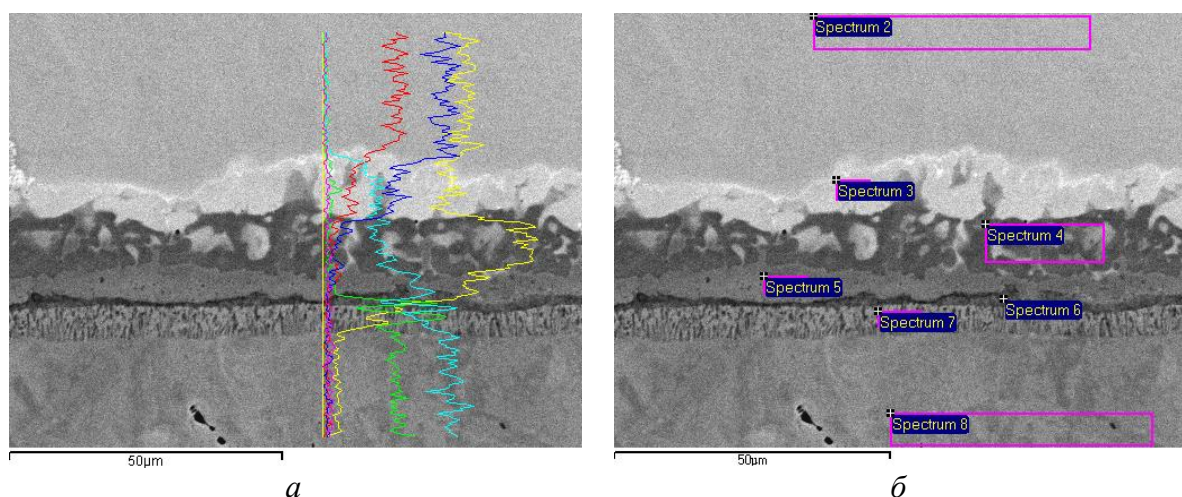
№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	K <sub>пласт</sub>
<b>7</b>	<b>40</b>	<b>11,94</b>	<b>213,0</b>	<b>0,772</b>
8	40	7,21	167,0	0,819
9	40	6,84	167,2	0,828
10	40	7,14	163,8	0,820
11	40	7,09	163,4	0,818
12	40	7,70	161,4	0,803

Рис. 4. Результати автоматичного інденування з'єднання  $Ti_2AlNb + ЭИ437Б$ , отриманого на режимі:  $T_{зв} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 5 \text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 20 \text{ хв.}$ :  
*a* – відбитки, отримані при інденуванні; *б* – таблиця розрахунків

Поліпшенню умов формування зварних з'єднань може сприяти використання як проміжних прошарків багатошарової фольги.

Дифузійне зварювання з використанням багатошарових прошарків Ni/Ti. Досліджували можливість використання як проміжного прошарку багатошарової фольги системи Ni-Ti (фольга № 1, табл. 2) при зварюванні сплаву на основі  $Ti_2AlNb$  з жароміцним сплавом ЭИ437Б. Параметри процесу дифузійного зварювання у вакуумі були наступні:  $T_{зв} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 5 \text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 5 \text{ хв.}$

Аналіз мікроструктури показав, що під час зварювання відбувається повна перекристалізація фольги Ni/Ti (рис. 5) з утворенням рідкої фази та її подальшим видаленням за межі зварного з'єднання. Кількість перехідних шарів, які візуально можна виділити на мікроструктурі з'єднань, збільшилася до п'яти, а їх загальна товщина становить 25-30 мкм, що трохи менше від товщини вихідної фольги. Зміна концентрації елементів в зоні з'єднання відбувається плавно. За рахунок складу фольги, у перехідних прошарках спостерігається підвищена концентрація титану та нікелю. Проміжний прошарок виступає бар'єром для дифузії хрому та вольфраму. Хром накопичується на границі прошарок/ЭИ437Б, де його концентрація сягає 33,98, % ваг., що на 60 % вище, ніж у вихідному металі. W взагалі не дифундує в проміжний прошарок. В окремих ділянках зварного з'єднання спостерігаються тріщини, які починаються в проміжному прошарку та розповсюджуються в  $Ti_2AlNb$ .



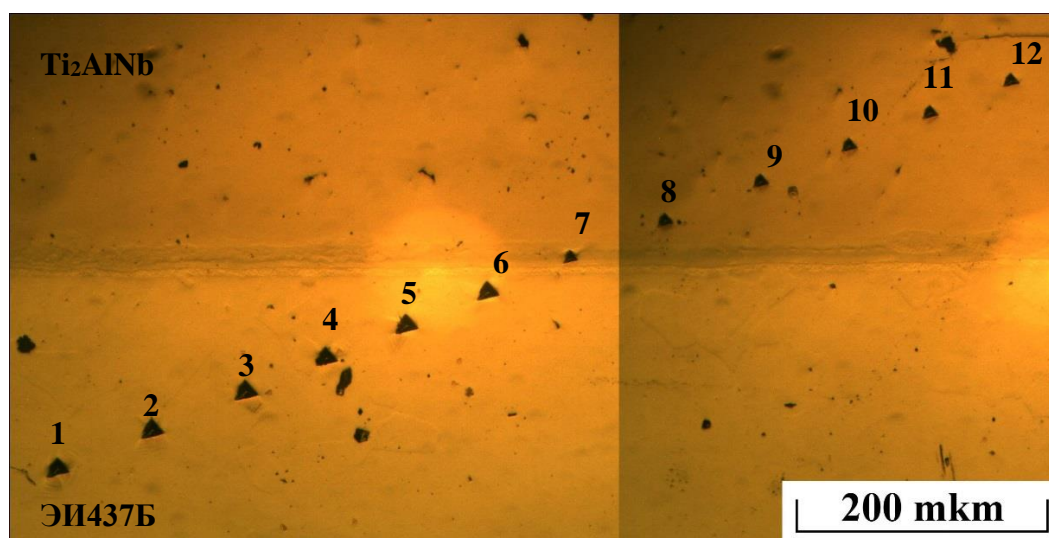
	Al	Ti	Cr	Ni	Nb	W
Spectrum 2	13,38	43,11	–	–	42,64	0,87
Spectrum 3	6,78	34,88	2,07	28,13	27,38	0,76
Spectrum 4	3,92	50,32	1,19	35,93	8,64	–
Spectrum 5	1,62	39,22	2,83	56,33	–	–
Spectrum 6	1,88	23,9	33,98	40,23	–	–
Spectrum 7	0,96	14,10	27,21	57,74	–	–
Spectrum 8	0,63	2,63	21,19	75,55	–	–

б

Рис. 5. Мікроструктура (а, б) і вміст основних елементів (в) у зварному з'єднанні  $Ti_2AlNb + ЭИ437Б$ , отриманого через багатошарову фольгу Ni/Ti на режимі:

$$T_{зв} = 950 \text{ } ^\circ\text{C}, P_{зв} = 5 \text{ МПа}, t_{зв} = 5 \text{ хв}$$

Дослідження мікромеханічних властивостей з'єднання показує (рис. 6), що поряд з незначним ростом мікротвердості зони з'єднання (з 4,44...5,24 ГПа для  $Ti_2AlNb$  до 6,69 ГПа в центральній ділянці стику), спостерігається зниження значень коефіцієнту пластичності до  $K_{пласт} = 0,765$ . Це може вказувати на наявність значних напружень, а також формування шарів крихких інтерметалідів. Значення модуля Юнга знаходяться на рівні основного матеріалу.



а



№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	K <sub>пласт</sub>
1	40	2,25	147,3	0,931
2	40	2,08	149,6	0,937
3	40	1,77	126,8	0,936
4	40	2,14	112,1	0,914
5	40	2,16	118,7	0,918
6	40	2,27	132,0	0,922

№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	K <sub>пласт</sub>
7	40	6,69	113,7	0,765
8	40	4,44	111,1	0,831
9	40	4,50	115,4	0,835
10	40	4,45	103,4	0,818
11	40	4,92	101,8	0,799
12	40	5,24	103,7	0,791

б

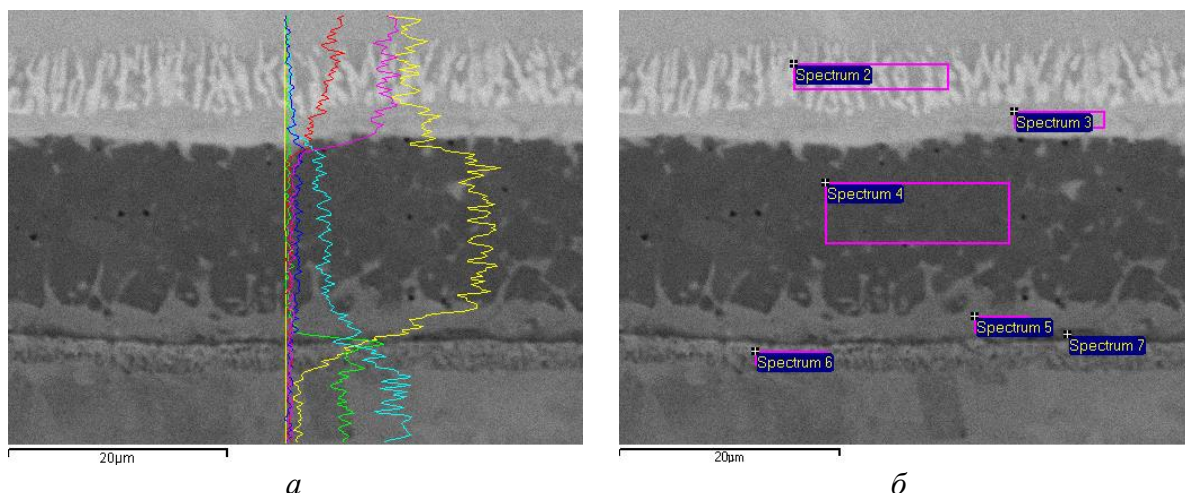
Рис. 6. Результати автоматичного інденування з'єднання Ti<sub>2</sub>AlNb + ЭИ437Б, отриманого через наношарувату фольгу Ni/Ti на режимі:

$$T_{зв} = 950 \text{ }^\circ\text{C}, P_{зв} = 5 \text{ МПа}, t_{зв} = 20 \text{ хв.}$$

а – відбитки, отримані при інденуванні; б – таблиця розрахунків

**Дифузійне зварювання з використанням багат шарових градієнтних прошарків Cu-Ni/Ti-Cu.** Дифузійне зварювання зразків Ti<sub>2</sub>AlNb і ЭИ437Б через багат шарову градієнтну фольгу Cu-Ni/Ti-Cu (фольга № 2, табл. 2) проводили при наступних параметрах: T<sub>зв</sub> = 950 °С, P<sub>зв</sub> = 5 МПа, t<sub>зв</sub> = 5 хв.

Використання як проміжного прошарку фольги Cu-Ni/Ti-Cu забезпечує формування з'єднання без несучільностей і тріщин (рис. 7).



	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu	Nb	W
Spectrum 2	9,73	41,01	–	–	2,92	3,36	42,09	0,89
Spectrum 3	5,80	42,82	0,58	–	9,40	9,66	31,32	0,41
Spectrum 4	0,98	59,37	0,38	0,64	27,02	9,90	1,71	–
Spectrum 5	1,76	37,50	2,91	0,53	51,08	5,20	1,01	–
Spectrum 6	1,13	15,14	23,10	0,45	60,19	–	–	–
Spectrum 7	1,33	22,80	39,60	0,74	32,90	2,62	–	–

в

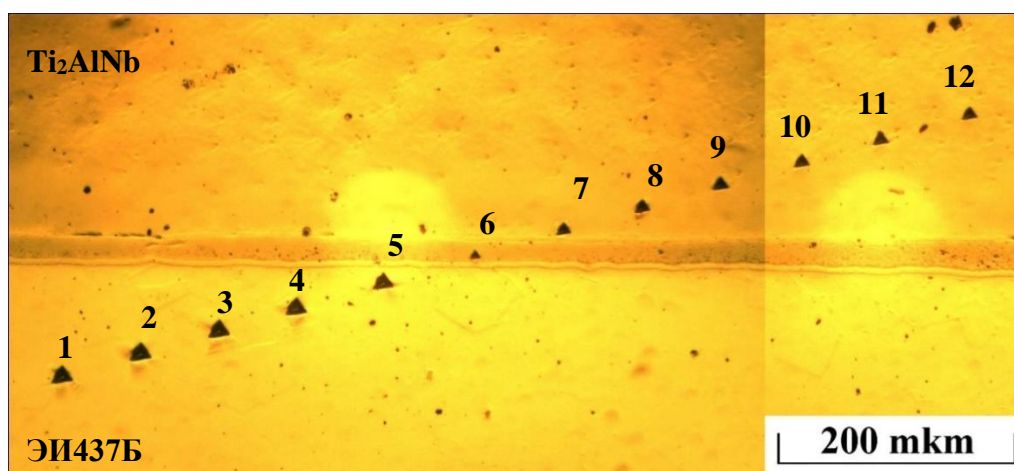
Рис. 7. Мікроструктура (а, б) і вміст основних елементів (в) у зварному з'єднанні Ti<sub>2</sub>AlNb + ЭИ437Б, отриманого через наношарувату фольгу Cu-Ni/Ti-Cu на режимі:

$$T_{зв} = 950 \text{ }^\circ\text{C}, P_{зв} = 5 \text{ МПа}, t_{зв} = 5 \text{ хв}$$

Спостерігається повна перекристалізація фольги з формуванням шести шарів. Загальна товщина шарів між сплавами, що зварюються становить 29 мкм. Зменшення сумарної товщини перехідних шарів у порівнянні з вихідною товщиною багат шарової фольги свідчить про утворення в зоні з'єднання евтектики та видалення надлишків рідкої фази зі стику під час зварювання. Мідь, що міститься на поверхні фольги, виступає надійним бар'єром проти дифузії легуючих елементів зі сплавів в напрямку один до одного.



Так вольфрам взагалі не дифундує в проміжний прошарок. Хром накопичується в приповерхневому шарі жароміцного сплаву (39,6, % ваг.) і до поверхні  $Ti_2AlNb$  він доходить в обсязі лише 0,38...0,58, % ваг. Ніобій також повністю проходить через стик, проте на границі проміжний прошарок/ЭИ437Б його концентрація падає більш ніж у 40 разів порівняно з вихідним алюмінідом титану (з 42,09 до 1,01, % ваг.). Можна припустити, що з фольги утворилася низка сплавів системи Ni-Ti з різною концентрацією нікелю і титану легованих іншими елементами, що входять до складу вихідних матеріалів. Значення модуля Юнга має середнє значення щодо сплавів, що зварюються (рис. 8). Значне падіння коефіцієнта пластичності вказує на формування в стикі шарів з низькою пластичністю у порівнянні з вихідними сплавами. У центральному найтовщому перехідному шарі з'єднання відбувається суттєве підвищення мікротвердості до 13,21 ГПа. Причиною цього є утворення крихкої інтерметалідної фази на основі системи Cu-Ni-Ti з домішками алюмінію (0,98, % ваг), хрому (0,38, % ваг), ніобію (1,71, % ваг.) і заліза (0,64, % ваг).



а

№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	K <sub>пласт</sub>
1	40	2,87	242,7	0,945
2	40	2,88	241,0	0,945
3	40	2,87	290,9	0,954
4	40	3,05	228,3	0,939
5	40	3,16	265,0	0,945
<b>6</b>	<b>40</b>	<b>13,21</b>	<b>197,8</b>	<b>0,736</b>

№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	K <sub>пласт</sub>
7	40	7,31	171,2	0,821
8	40	6,57	173,5	0,839
9	40	6,31	182,3	0,851
10	40	6,46	165,8	0,834
11	40	6,93	164,2	0,824
12	40	7,11	173,2	0,828

б

Рис. 8. Результати автоматичного індентування з'єднання  $Ti_2AlNb + ЭИ437Б$ , отриманого через нанощарувату фольгу Cu-Ni/Ti-Cu на режимі:

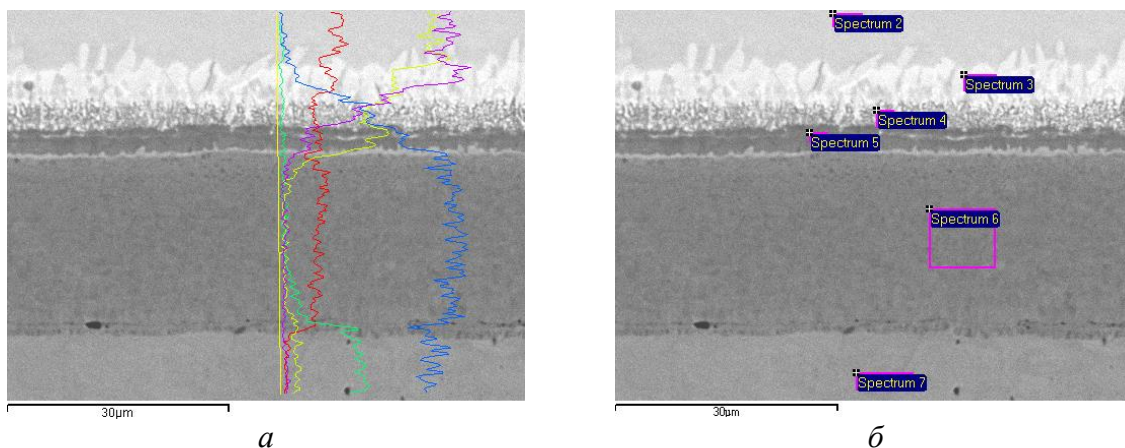
$$T_{зв} = 950 \text{ }^\circ\text{C}, P_{зв} = 5 \text{ МПа}, t_{зв} = 20 \text{ хв.}.$$

а – відбитки, отримані при індентуванні; б – таблиця розрахунків

**Дифузійне зварювання з використанням нанощаруватих прошарків системи Al-Ni.** Досліджували можливість використання як проміжного прошарку багатощарової фольги системи Al-Ni (фольга № 3, табл. 2) при зварюванні  $Ti_2AlNb$  із жароміцним нікелевим сплавом ЭИ437Б. Параметри процесу дифузійного зварювання у вакуумі були такі:  $T_{зв} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 5 \text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 5 \text{ хв}$ .

У зоні з'єднання, отриманого через прошарок Al/Ni, спостерігається утворення серії з чотирьох перехідних шарів загальною товщиною 36 мкм. Мікроструктура, а також розподіл хімічних елементів в зоні з'єднання представлені на рис. 9. З боку жароміцного ніхромового сплаву утворився прошарок зі сплаву нікелю з інтерметалідом  $AlNi_3$ , що

виступає бар'єром для дифузії легуючих елементів з боку  $Ti_2AlNb$  (спектр 6, рис. 9, б). У деяких ділянках з'єднання, що прилягають до  $Ti_2AlNb$  спостерігаються ланцюги пор вздовж границь проміжний прошарок/основний матеріал, а також тріщини по границі проміжний прошарок/алюмінід титану.



	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W
Spectrum 2	9,19	39,17	–	–	0,60	48,96	2,08
Spectrum 3	8,14	30,41	–	–	9,00	50,57	1,88
Spectrum 4	6,69	20,42	–	–	37,16	34,17	1,55
Spectrum 5	9,59	24,07	–	–	53,31	12,07	0,95
Spectrum 6	12,74	–	–	–	87,26	–	–
Spectrum 7	0,72	2,67	20,31	0,88	75,42	–	–

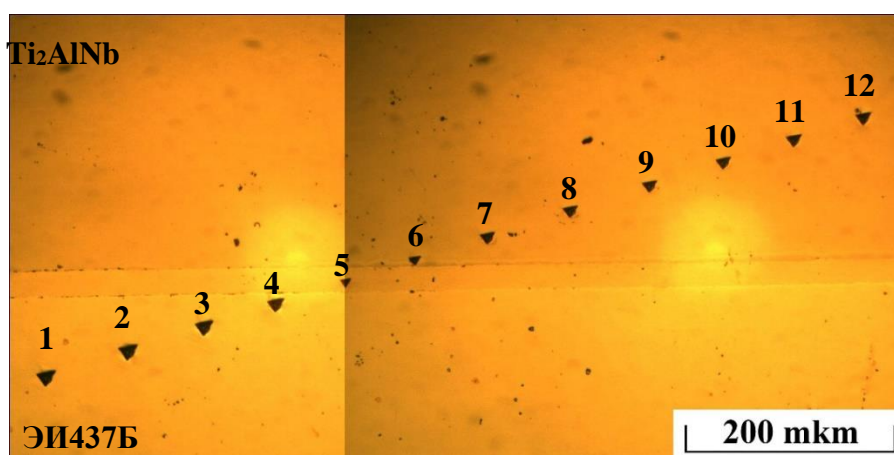
в

Рис. 9. Мікроструктура (а, б) і вміст основних елементів (в) у зварному з'єднанні  $Ti_2AlNb + EI437B$ , отриманого через наношарувату фольгу Al/Ni на режимі:

$$T_{зв} = 950 \text{ }^\circ\text{C}, P_{зв} = 5 \text{ МПа}, t_{зв} = 5 \text{ хв}$$

Ймовірно, для фольги такого складу тривалість зварювання в 5 хв не дозволяє повністю пройти дифузійним процесам і сформувати якісне з'єднання. В результаті фольга Al/Ni виступає надійним бар'єром для дифузії в проміжний прошарок, таких елементів як Cr, Fe, W і Ti. Мікротвердість центральної частини зони з'єднання в 1,5–2 рази перевищує значення для вихідних матеріалів (8,79 ГПа проти 2,96...5,23 ГПа), коефіцієнт пластичності знаходиться на рівні сплаву  $Ti_2AlNb$  (рис. 10). Низька дифузійна активність в фользі системи Al/Ni призвела до активного утворення багатокомпонентної фази (Ti, Ni, Nb, Al, W) в приповерхневому шарі з боку алюмініду титану. У результаті цього відбулось підвищення мікротвердості даної ділянки до 9,27 ГПа і падіння коефіцієнта пластичності до 0,778.

Виходом з цієї ситуації могло б стати використання фольг системи Al-Ni з бар'єрними шарами по боках. Проте, як показали дослідження, отримати на запропонованому режимі з'єднання через градієнтну багатшарову фольгу Ti-Al/Ni-Ti (фольга № 5, табл. 2) взагалі не вдається. У випадку фольги Cu-Al/Ni-Cu (фольга № 4, табл. 2), через високий рівень дефектності (рис. 11) зразки зазвичай розпадалися при механічній обробці. З результатів проведених експериментів можна зробити висновок, що фольги системи Al-Ni з чи безбар'єрних прошарків не придатні для зварювання сплавів  $Ti_2AlNb$  і EI437B при заданому режимі зварювання ( $T_{зв} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 5 \text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 5 \text{ хв}$ ).



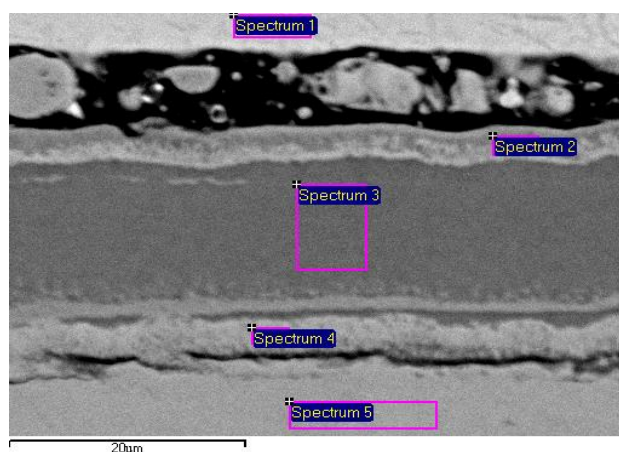
а

№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	K <sub>пласт</sub>
1	40	2,96	168,7	0,921
2	40	3,00	174,2	0,922
3	40	3,22	204,7	0,929
4	40	4,18	212,1	0,911
<b>5</b>	<b>40</b>	<b>8,79</b>	<b>225,0</b>	<b>0,833</b>
6	40	9,27	172,6	0,778

№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	K <sub>пласт</sub>
7	40	5,83	150,6	0,836
8	40	5,58	150,2	0,842
9	40	5,33	153,7	0,850
10	40	5,23	132,6	0,833
11	40	5,25	141,3	0,842
12	40	5,26	144,7	0,845

б

Рис. 10. Результати автоматичного інтендування з'єднання  $Ti_2AlNb + ЭИ437Б$ , отриманого через наношарувату фольгу  $Al/Ni$  на режимі:  $T_{зв} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 5 \text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 20 \text{ хв}$   
а – відбитки, отримані при інтендуванні; б – таблиця розрахунків



а

	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W
Spectrum 1	10,91	43,31	–	–	0,66	44,57	0,55
Spectrum 2	1,74	32,3	–	–	65,96	–	–
Spectrum 3	21,32	2,25	–	–	76,43	–	–
Spectrum 4	0,86	24,83	0,39	–	73,92	–	–
Spectrum 5	0,6	2,84	20,69	0,66	75,21	–	–

б

Рис. 11. Мікроструктура (а) і вміст основних елементів (б) в зварному з'єднанні  $Ti_2AlNb + ЭИ437Б$ , отриманого через наношарувату фольгу  $Cu-Al/Ni-Cu$  на режимі:  $T_{зв} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 5 \text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 5 \text{ хв}$

На рис. 12 показано значення мікротвердості в зоні з'єднання в залежності від хімічного складу проміжного прошарку. З гістограми випливає, що при зварюванні  $Ti_2AlNb$  з ЭИ437Б без застосування проміжних прошарків в стику утворюються інтеметалідні з'єднання з мікротвердістю на рівні 11,94 ГПа. Застосування при дифузійному зварюванні багатошарових трикомпонентних фольг  $Cu-Ni/Ti-Cu$  не призводить до зниження рівня мікротвердості. Її значення в цьому випадку становить 13,21 ГПа. Використання як проміжних прошарків двоелементних фольг ( $Ni/Ti$ ,  $Al/Ni$ ) дозволяє суттєво знизити перепад мікротвердості в стику. При цьому значення мікротвердості в центральній частині зони з'єднання досягають значень 6,69...8,79 ГПа.

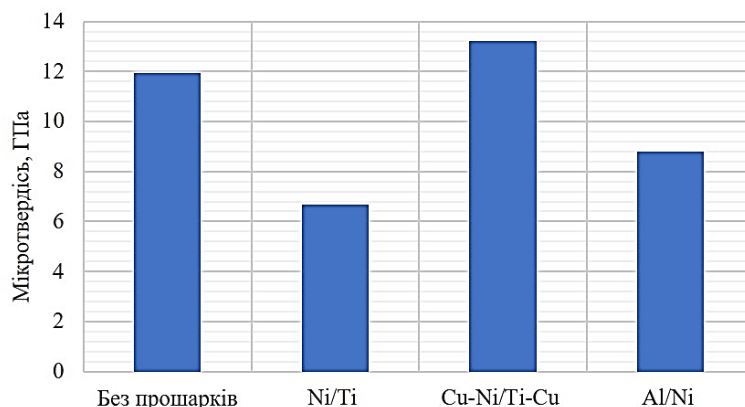


Рис. 12. Значення мікротвердості в зоні з'єднання  $Ti_2AlNb + ЭИ437Б$  залежно від хімічного складу проміжного прошарку

**Висновки.** Основною складністю при дифузійному зварюванні ортоалюмініду титану зі сплавом ЭИ437Б є сильна схильність матеріалів до утворення крихких фаз у стику, які можуть негативно вплинути на властивості з'єднань.

1. Встановлено, що при зварюванні без проміжних прошарків в зоні з'єднання спостерігається суттєве підвищення мікротвердості до 2...4 разів у порівнянні з основним матеріалом (до 11,94 ГПа).

2. Застосування при дифузійному зварюванні багатошарової градієнтної фольги  $Cu-Ni/Ti-Cu$  не дозволяє знизити мікротвердість зони з'єднання. Її значення знаходиться на рівні 13,21 ГПа. Причиною цього є утворення крихкої інтерметалідної фази на основі системи  $Cu-Ni-Ti$ .

3. Показано, що використання в якості проміжних прошарків двоелементної фольги ( $Ni/Ti$ ,  $Al/Ni$ ) дозволяє суттєво знизити перепад значень мікротвердості в стику. При цьому мікротвердість в центральній частині зони з'єднання досягає 6,69...8,79 ГПа, що близько до значень мікротвердості  $Ti_2AlNb$ .

#### Список використаних джерел

1. Jörg Kumpfert. Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide / Jörg Kumpfert // Advanced Engineering Materials. – 2001. – Vol. 11(3). – Pp. 851–864. – DOI: [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(200111\)3:11%3C851::AID-ADEM851%3E3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200111)3:11%3C851::AID-ADEM851%3E3.0.CO;2-G).
2. Alan Partridge. Processing and mechanical property studies of orthorhombic titanium-aluminide-based alloys / Alan Partridge, Edward F.J. Shelton // Air & Space Europe. – 2001. – Vol. 3-4(3). – Pp. 170–173. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1290-0958\(01\)90085-1](https://doi.org/10.1016/S1290-0958(01)90085-1).
3. Барабаш О. М. Структура и свойства металлов и сплавов: Справочник: Кристаллическая структура металлов и сплавов / О. М. Барабаш, Ю. Н. Коваль. – К. : Наукова думка, 1986. – 599 с.
4. Microstructures and mechanical properties of  $Ti_3Al/Ni$ -based superalloy joints arc welded with  $Ti-Nb$  and  $Ti-Ni-Nb$  filler alloys / Bingqing Chen, Huaping Xiong, Bingbing Sun, Siyi Tang, Borui Du, Neng Li // Progress in Natural Science: Materials International. – 2014. – Vol. 4(24). – Pp. 313–320. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.06.003>.



5. Microstructure Evolution and Tensile Properties of Ti3Al/Ni-based Superalloy Welded Joint / Bingqing Chen, Huaping Xiong, Bingbing Sun, Siyi Tang, Shaoqing Guo, Xuejun Zhang // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2014. – Vol. 7(30). – Pp. 715–721. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.06.004>.

6. Laser Joining of Ti3Al-Based Alloy to Ni-Based Superalloy using a Titanium Interlayer / Xiao-Long Cai, Da-Qian Sun, Hong-Mei Li, Hong-Ling Guo, Yan Zhang, Ying-ying Che // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2018. – Vol. 1. – Pp. 1163–1169. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-018-0137-5>.

7. Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints diffusion bonded with Ni and TiNiNb foils / Ren H.S., Wu X., Chen B., Xiong H.P., Cheng Y.Y. // *Welding in the World March*. – 2017. – Vol. 61, № 2. – Pp. 375–381.

8. Formation mechanism of interfacial microstructures and mechanical properties of Ti2AlNb/Ni-based superalloy joints brazed with NiCrFeSiB filler metal / Haishui Ren, Xinyu Ren, Weimin Long, Bo Chen, Shujie Pang, Huaping Xiong // *Progress in Natural Science: Materials International*. – 2021. – Vol. 2(31). – Pp. 310–318. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.12.009>.

9. Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints brazed with AuNi filler metal / Ren H.S., Xiong H.P., Long W.M., Chen B., Shen Y.X., Pang S.J. // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2019. – Vol. 9(35). – Pp. 2070–2078. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.04.015>.

10. Interfacial diffusion reactions and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints brazed with AgCuPd filler metal / Ren H.S., Xiong H.P., Long W.M., Shen Y.X., Pang S.J., Chen B., Cheng Y.Y. // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 144. – Pp. 316–324. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.07.024>.

11. Уравнение индентирования / С. А. Фирстов, Н.А. Мамека, В.Ф. Горбань, Э. П. Печковский // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2007. – № 12. – С. 100–106.

### Reference

1. Jörg Kumpfert (2001). Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide. *Advanced Engineering Materials*, 11(3), 851–864. [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(200111\)3:11%3C851::AID-ADEM851%3E3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200111)3:11%3C851::AID-ADEM851%3E3.0.CO;2-G).

2. Alan Partridge, & Edward F.J. Shelton. (2001). Processing and mechanical property studies of orthorhombic titanium-aluminide-based alloys. *Air & Space Europe*, 3–4(3), 170–173. [https://doi.org/10.1016/S1290-0958\(01\)90085-1](https://doi.org/10.1016/S1290-0958(01)90085-1).

3. Barabash, O.M., & Koval, Yu.N. (1986). *Struktura i svoystva metallov i splavov [Structure and Properties of Metals and Alloys]*. Naukova Dumka.

4. Bingqing Chen, Huaping Xiong, Bingbing Sun, Siyi Tang, Borui Du, & Neng Li (2014). Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints arc welded with Ti–Nb and Ti–Ni–Nb filler alloys. *Progress in Natural Science: Materials International*, 4(24), 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.06.003>.

5. Bingqing Chen, Huaping Xiong, Bingbing Sun, Siyi Tang, Shaoqing Guo, & Xuejun Zhang (2014). Microstructure Evolution and Tensile Properties of Ti3Al/Ni-based Superalloy Welded Joint. *Journal of Materials Science & Technology*, 7(30), 715–721. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.06.004>.

6. Xiao-Long Cai, Da-Qian Sun, Hong-Mei Li, Hong-Ling Guo, Yan Zhang, & Ying-ying Che (2018). Laser Joining of Ti3Al-Based Alloy to Ni-Based Superalloy using a Titanium Interlayer. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19, 1163–1169. <https://doi.org/10.1007/s12541-018-0137-5>.

7. Ren, H.S., Wu, X., Chen, B., Xiong, H.P., & Cheng, Y.Y. (2017). Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints diffusion bonded with Ni and TiNiNb foils. *Welding in the World March*, 61(2), 375–381.

8. Haishui Ren, Xinyu Ren, Weimin Long, Bo Chen, Shujie Pang, & Huaping Xiong (2021). Formation mechanism of interfacial microstructures and mechanical properties of Ti2AlNb/Ni-based superalloy joints brazed with NiCrFeSiB filler metal. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2(31), 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.12.009>.

9. Ren, H.S., Xiong, H.P., Long, W.M., Chen, B., Shen, Y.X., & Pang, S.J. (2019). Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints brazed with AuNi filler metal. *Journal of Materials Science & Technology*, 9(35), 2070–2078. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.04.015>.

10. Ren, H.S., Xiong, H.P., Long, W.M., Shen, Y.X., Pang, S.J., Chen, B., & Cheng, Y.Y. (2018). Interfacial diffusion reactions and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints brazed with AgCuPd filler metal. *Materials Characterization*, 144, 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.07.024>.

11. Firstov, S.A., Mameka, N.A., Gorban, V.F., & Pechkovsky, E.P. (2007). Uravnenie indentirovaniia [Equation of indentation]. *Dopovidi Nats. Akademii Nauk Ukrainy*, (12), 100–106.

Отримано 20.08.2022

UDC 621.791

**Lidiia Petrushynets<sup>1</sup>, Oleh Novomlynets<sup>2</sup>, Iurii Falchenko<sup>3</sup>,  
Tetyana Melnychenko<sup>4</sup>, Leonid Radchenko<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Researcher  
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [petrushynets@paton.kiev.ua](mailto:petrushynets@paton.kiev.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>  
ResearcherID: [G-2891-2016](https://orcid.org/0000-0001-7946-3056). Scopus Author ID: [55521777800](https://orcid.org/0000-0001-7946-3056)

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Rector  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
E-mail: [oon1@ukr.net](mailto:oon1@ukr.net). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>  
ResearcherID: [F-8166-2014](http://orcid.org/0000-0002-0774-434X). Scopus Author ID: [56938958300](http://orcid.org/0000-0002-0774-434X)

<sup>3</sup>Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department  
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [falchenko@paton.kiev.ua](mailto:falchenko@paton.kiev.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3028-2964>  
ResearcherID: [W-2793-2017](http://orcid.org/0000-0002-3028-2964). Scopus Author ID: [7801687476](http://orcid.org/0000-0002-3028-2964)

<sup>4</sup>Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher  
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [melnychenko21@ukr.net](mailto:melnychenko21@ukr.net). Scopus Author ID: [12802654100](https://orcid.org/0000-0002-4235-2413)

<sup>5</sup>engineer, Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [leonid190@gmail.com](mailto:leonid190@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4235-2413>

## STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING NICKEL-BASED INTERMEDIATE LAYERS WHEN WELDING TITANIUM ORTHOALUMINIDE WITH A NICKEL ALLOY

*Titanium aluminides have a low density and maintain high strength at elevated temperatures, which makes them promising for the manufacture of aircraft engine elements. In the presented work, the problem of welding in the solid phase orthorhombic titanium aluminide based on the intermetallic compound Ti<sub>2</sub>AlNb and heat-resistant alloy ЭИ437Б on a nickel base is considered. A review of the state of the problem of welding heat-resistant alloy ЭИ437Б based on nickel and titanium orthoaluminide Ti<sub>2</sub>AlNb was carried out. It was established that the main problem in welding Ti<sub>2</sub>AlNb alloy with nickel alloy is a strong tendency to the formation of brittle phases in the joint zone, which negatively affect the mechanical properties. A promising method of joining this group of alloys is diffusion welding in a vacuum.*

*The purpose of the work is to study the influence of multilayer and gradient foil on the formation of the zone of titanium orthoaluminide joints with a nickel-based alloy during vacuum diffusion welding.*

*In the work, multilayer and gradient foil based on Al-Ni and Ni-Ti systems were used according to the original structure. The foils were obtained by electron beam evaporation and condensation in a vacuum. The deposition process consists in the layer-by-layer condensation of elements on a horizontal substrate.*

*The work presents the method of conducting experiments, welding modes, chemical composition of materials and foil.*

*The work shows for the first time that during the direct welding of titanium orthoaluminide with the ЭИ437Б alloy, as a result of the strong tendency of the materials to form brittle phases at the joint, a significant increase in microhardness is observed in the joint zone up to 2...4 times compared to the base material (up to 11.94 GPa). It was established that the use of layered foil (Ni/Ti, Al/Ni) as intermediate layers allows to significantly reduce the difference in microhardness values in the joint. At the same time, the microhardness in the central part of the joint zone reaches 6.69...8.79 GPa, which is close to the microhardness values of Ti<sub>2</sub>AlNb.*

*The presented materials can be used as a basis for the development of welding technologies in the solid phase of heterogeneous titanium orthoaluminide materials with nickel-based alloys.*

**Key words:** titanium orthoaluminide; nickel alloy; layered foil; intermediate layer; diffusion welding in vacuum; microstructure; microhardness.

Table: 2. Fig.: 12. References: 11.