

PACS numbers: 06.60.Vz, 64.70.dj, 68.37.Hk, 81.20.Vj, 81.30.Bx, 81.30.Fb, 81.40.Wx

Визначення структур литого металу та зварного з'єднання після електронно-променевого зварювання інтерметалідного титанового стопу Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr, одержаного методом електронно-променевого топлення

С. В. Ахонін, А. Ю. Северин, В. Ю. Білоус, В. А. Костін, В. О. Березос

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

Проведено дослідження структури основного металу та металу шва після електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) інтерметалідного титанового стопу Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr (ваг.%), одержаного методом електронно-променевого перетоплення (ЕПП). Макроструктура виливка ЕПП стопу Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr характеризується зернами, близькими до рівновісних з величиною зерна у 8–9 балів. Показано, що мікроструктура литого металу стопу Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr складається з матричної світлої γ -фази, що чергується з ділянками двофазної ($\gamma + \alpha_2$)-лямельної структури розміром до 50 мкм, з товщиною лямелей близько 1 мкм, та впорядкованої β -фази, яка утворює сітчастий візерунок на тлі матриці. Встановлено, що внутрішньозеренна структура металу зварного з'єднання після ЕПЗ з локальним термічним обробленням (ЛТО) відрізняється від структури основного металу та складається з невеликих (до 20 мкм) ділянок з ($\gamma + \alpha_2$)-лямельною структурою на тлі світлої матричної γ -фази із сіткою з витягнутих частинок довжиною у 30–80 мкм і товщиною у 1–3 мкм.

Ключові слова: інтерметалідний титановий стоп, структура, фаза, електронно-променеве топлення, електронно-променеве зварювання.

Corresponding author: Andrii Yuriiievych Severyn
E-mail: tim.severin72@gmail.com

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: S. V. Akhonin, A. Yu. Severyn, V. Yu. Belous, V. A. Kostin, and V. O. Berезos, Determination of Cast-Metal Structures and Welded Joints After Electron-Beam Welding of the Intermetallic Titanium Alloys Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr Obtained by Electron-Beam Melting Method, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 5: 415–429 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.05.0415](https://doi.org/10.15407/mfint.46.05.0415)

The structure of the base metal and weld metal after electron-beam welding (EBW) of the intermetallic titanium alloy Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr (wt.%) obtained by the electron-beam melting method is studied. The macrostructure of the Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr alloy ingot is characterized by grains close to equiaxed with a grain size of 8–9 points. As shown, the microstructure of the cast metal of the Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr alloy consists of a matrix bright γ -phase alternating with sections of a two-phase ($\gamma + \alpha_2$) lamellar structure up to 50 μm in size, with a lamellae thickness of about 1 μm , and of the ordered β -phase, which forms a mesh pattern against the background of the matrix. As established, the intragranular structure of the metal of the welded joint after EBW with local heat treatment (LHT) differs from the structure of the base metal and consists of small (up to 20 μm) areas with a ($\gamma + \alpha_2$) lamellar structure against the background of a light matrix γ -phase with a network of elongated particles of 30–80 μm long and 1–3 μm thick.

Key words: intermetallic titanium alloy, structure, phase, electron-beam melting, electron-beam welding.

(Отримано 17 жовтня 2023 р.; остаточн. варіант — 28 листопада 2023 р.)

1. ВСТУП

В Україні, в умовах воєнного стану, наразі виникає велика потреба в одержанні та застосуванні нового класу матеріалів для авіаційного й енергетичного машинобудування. В даний час до числа найбільш перспективних матеріалів для двигунобудівної області промисловості відносяться інтерметалідні стопи на основі системи Ti-Al з робочими температурами вище 650°C, що мають високі показники жароміцних властивостей. Використання стопів на основі інтерметалідів титану для виготовлення лопаток турбін, а також деталей гарячого газового тракту (камери згорання, дифузори, вихлопні системи) газотурбінних двигунів (ГТД) авіаційного й іншого призначень дасть змогу підвищити робочу температуру ГТД на 100–150°C, зменшити вагу двигуна на 20–40%, підвищити ресурс двигуна у 2–3 рази. На теперішній час на підприємствах України (ПАТ «Мотор Січ», ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект») освоєно виробництво лопаток газотурбінних двигунів з титанових стопів методами фасонного лиття у вакуумно-дугових печах і штампування. Це ж обладнання може бути використане для виробництва виробів із алюмінідів титану. Але в ливарних вакуумно-дугових печах різних типів діаметер витратної електроди складає від 200 до 350 мм, що зумовлює можливість створення виробництва виливків-заготовок з інтерметалідів на основі алюмініду титану. На відміну від звичайних жароміцних титанових стопів, сучасні інтерметалідні титанові стопи мають підвищений вміст Алюмінію та Ніобію, що викликає певні труднощі, пов'язані з великим вмістом крихкої

складової шихти, які можуть призвести до обриву електрод під час вакуумно-дугового перетоплення (ВДП) і формування неоднорідного хемічного складу зливка. Також в Україні відсутні потужності для одержання якісних електрод великого діаметра методом ВДП, але є можливість задіяти для цих цілей установки електронно-променевого перетоплення (ЕПП). Для виробництва деталей з алюмінідів титану методами штампування та прокатування також необхідні крупногабаритні виливки. Так, наприклад, на ДП «КБ «Південне» планують використовувати у виробництві БПЛА листи з інтерметалідів Ti–Al розмірами до 1,5×3500×6000 мм, а необхідна маса заготовок для одержання листів такого сортаменту складає 200–400 кг.

Електронно-променево зварювання (ЕПЗ) широко застосовується для виробництва конструкцій з легованих титанових стопів. В даний час це — найбільш поширений метод одержання зварних з'єднань жароміцних стопів на основі алюмініду титану.

Вищезазначене зумовлює нагальну потребу в створенні інтерметалідних стопів системи титан–алюміній з найліпшим поєднанням властивостей, розробці технології одержання виливків цих інтерметалідних стопів і розробці технології зварювання цих матеріалів.

2. АНАЛІЗА ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Інтерметаліди — клас легких, жароміцних і жаростійких матеріалів, які призначені для роботи в різних конструкціях за температур у 600–900°C [1, 2]. Промислові жароміцні титанові стопи мають робочу температуру не вище 600°C (BT18У, BT-25, ТІМЕТАЛ1100, ТІМЕТАЛ-15-3, ІМІ 834), оскільки за більш високих температур в титанових стопах розвиваються характерні для них процеси міжзеренного руйнування, що призводить до різкого погіршення властивостей. В роботах [3, 4] показано, що інтерметалід TiAl вигідно відрізняється від інших сполук тим, що його межа плинності зростає з підвищенням температури до 600–800°C. Сильні ковалентні зв'язки між атомами інтерметаліду TiAl забезпечують підвищення енергії активації дифузії, що уповільнює розвиток процесів плазучості за температур до 900°C і забезпечує високу жорсткість в широкому інтервалі температур. Однак інтерметалід TiAl дуже сильно поступається промисловим суперстопам за пластичністю, але перевершує кераміки за характеристиками низькотемпературної пластичності, в'язкості руйнування й опору термоудару, має більш високу теплопровідність і кращу технологічність, ніж кераміка [5].

Топлення інтерметалідних титанових стопів пов'язане з певними технологічними труднощами через велику кількість Алюмінію, що входить до складу стопу, та його високу летючість у вакуумі, знач-

ну різницю в температурах топлення титану й алюмінію, високу хемічну активність розтопу, необхідність одержати гомогенний розтоп. Стопи на основі алюмініду титану мають малий інтервал кристалізації та мають гарні ливарні властивості [6, 7]. Виливки алюмініду титану або розтоп рідкого металу для подальшої заливки у форму одержують тими ж способами, що і промислові титанові стопи. В даний час основною метою одержання виливків жароміцних стопів титану є вакуумно-дугове перетоплення (ВДП). Але в роботах [8, 9] доведено, що технологія ВДП не дає змоги вирішити одну з найважливіших проблем якості матеріалу, який використовуються в деталях відповідального призначення, а саме, гарантувати відсутність в ньому дефектів у вигляді включень з низькою щільністю (так звані тверді α -включення) та тяжкотопких включень з високою щільністю. А в роботі [10] припускається, що нерівномірний розподіл легувальних елементів у титанових стопах, одержаних методом ВДП, призводить до руйнування виробів. Але в роботах [11–13] доведено, що технологія ЕПП уможлиблює уникнути цих недоліків. У підсумку: доцільним є проведення експериментів з одержання жароміцних інтерметалідних титанових стопів саме методом ЕПП й дослідження якості та властивостей одержаних виливків.

Однією з причин, що обмежує використання алюмінідів титану, є їхня низька технологічність, у тому числі складність зварювання, зумовлена надзвичайно низькою пластичністю, високою чутливістю до напружень у зварному з'єднанні, які з'являються в умовах нерівномірного нагріву з'єднання під час зварювання, що в свою чергу, призводить до утворення поперечних і поздовжніх тріщин у зварному з'єднанні [14]. Процес електронно-променевого зварювання має істотні переваги під час зварювання стопів на основі алюмінідів титану: універсальність, гнучкість, висока питома погонна енергія та швидкість зварювання, а також надійний захист зони зварювання та можливість здійснювати локальне термічне оброблення у вакуумній камері, що дає змогу одержувати зварні з'єднання найвищої якості [15, 16]. Параметри процесу електронно-променевого зварювання та локального термічного оброблення можуть забезпечити формування сприятливої ($\gamma + \alpha_2$)-структури у металі зварного шва [17]. Для пониження ймовірності появи у зварних з'єднаннях алюмінідів титану тріщин під час зварювання топленням необхідний попередній підігрів з'єднань, що зварюються до значних температур (у 200–500°C). В роботах [18, 19] проаналізовано розвиток пружньо-пластичних деформацій під час зварювального нагрівання й охолодження зразків на основі алюмінідів титану. Тому доцільно оцінити вплив зварювання із застосуванням попереднього підігріву та локального термічного оброблення на структуру з'єднань зі стопу на основі алюмініду титану.

3. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є визначення структури литого металу та визначення структурно-фазових перетворень під час проведення ЕПЗ в металі зварного з'єднання інтерметалідного титанового стопу, одержаного методом ЕПП, що дасть можливість показати перспективу застосування ЕПП для одержання якісних виливків і використання ЕПЗ для можливості зварювання складнолегованого інтерметалідного стопу.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- одержати методом ЕПП бездефектний інтерметалідний титановий стоп;
- дослідити структуру та хемічний склад фазових складових одержаного металу ЕПП;
- дослідити структуру металу зварного з'єднання інтерметалідного титанового стопу, одержаного методом електронно-променевого топлення після електронно-променевого зварювання.

4. МАТЕРІЯЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В якості вихідних шихтових матеріалів використовувалися титан, ніобій, молібден і хром у чистому вигляді й алюміній марки А7 у вигляді чушок. Елементи з високою пружністю пари додавали з урахуванням втрат їх на випаровування.

Виливки інтерметалідного стопу $Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr$ (ваг.%) одержували за розробленою в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України технологією електронно-променевого топлення з проміжною місткістю [12, 13]. Дослідні топлення проводили на електронно-променевій установці УЕ-121, оснащених 3 електронно-променевими гарматами «Патон 300» (Україна) потужністю у 300 кВт кожна. Процес топлення здійснювали у вакуумі 0,1–0,01 Па, що створювало найбільш сприятливі умови для видалення Гідрогену з металу й унеможливило забруднення титану Нітрогеном і Оксигеном.

Для аналізу вмісту легувальних елементів у виливках одержаних стопів використовувався метод оптичної емісійної спектроскопії (ICP-OES) з використанням ICP-спектрометра ICAP 6500 DUO з індуктивно зв'язаною плазмою виробництва фірми Thermo Electron Corporation (США).

Для дослідження наявності або відсутності в титанових виливках внутрішніх дефектів у вигляді неметалевих включень, а також пор і нещільностей використовувалася метода ультразвукової дефектоскопії. Дослідження проводилися з використанням дефектоскопа ультразвукового УД4-76 (Україна) відлуння-імпульсною ме-

тодою із контактним варіантом контролю.

Для виявлення мікроструктури зразків здійснювали щавлення в реактиві, який складається з суміші плавикової й азотної кислот у співвідношенні: 5% плавикової кислоти (HF), 30% азотної кислоти (HNO₃) та дистильованої води.

Огляд структури зразків здійснювали на світловому мікроскопі «Neophot-32» (Німеччина) за різних збільшень. Також на растровому електронному мікроскопі JEOL JSM-840 (JEOL Ltd, Японія) проведено мікроструктурні дослідження структурних складових, одержаних методом ЕПП стопу, а методом мікрорентгеноспектральної аналізи на приладі INCAPentaFET-x3 фірми «Oxford Instruments» (Англія) з Si(Li)-детектором встановлювався хемічний склад фаз і неметалевих включень, що утворилися.

Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) проводили на модернізованій установці УЛ-144, оснащеної джерелом живлення ЕЛА 60/60, зварювальною гарматою ЦФ-19 і приладом керування променем СУ-220. ЕПЗ виконували за один прохід без оброблення кромок і без присадного матеріялу; тому властивості зварних з'єднань визначалися хемічним складом основного металу, кількістю легувальних елементів і домішок, режимом зварювання та характером термічного циклу.

5. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЛИТОГО ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО ТИТАНОВОГО СТОПУ, ОДЕРЖАНОГО МЕТОДОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ТОПЛЕННЯ, ТА СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ШВА ПІСЛЯ ЕПЗ

5.1. Хемічний склад виливка інтерметалідного титанового стопу, одержаного методом електронно-променевого топлення

На електронно-променевій установці УЕ-121 одержано виливок стопу Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr (ваг.%) діаметром у 200 мм і довжиною у 500 мм. Відбір проб проводили вздовж виливка на глибині у 10 мм від поверхні виливка. Досліджувалися три зони — верхня, нижня та середина виливка. Результати досліджень хемічного складу металу показали достатньо рівномірний розподіл легувальних елементів по довжині витопленого виливка (табл. 1).

Ультразвуковий контроль одержаного виливка не виявив внутрішніх дефектів.

5.2. Дослідження структури інтерметалідного титанового стопу, одержаного методом електронно-променевого топлення

Макроструктура інтерметалідного стопу Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr

ТАБЛИЦЯ 1. Хемічний склад вилівка ЕПП \varnothing 200 мм.

TABLE 1. Chemical composition of EBM ingot \varnothing 200 mm.

Місце відбору зразків	Вміст елементів, мас.%				
	Al	Nb	Mo	Cr	Ti
Верх	27,6	7,6	2,0	1,5	
Середина	28,7	7,5	2,1	1,8	осн.
Низ	29,5	7,2	2,2	1,7	

характеризується зернами, близькими до рівновісних (рис. 1). Величина зерна, що визначається за 10-бальною шкалою макроструктур Інструкції № 1054-76, відповідає 8–9 балам (присутні ділянки з балом зерна у 6–7). Істотної різниці у характері кристалізації по довжині вилівка не спостерігається.

У процесі вивчення мікроструктури металу вилівка методом оптичної мікроскопії виявлено кілька фазових складових: 1 — світла матрична фаза; 2 — ділянки з лямелярною структурою на тлі матриці (рис. 2, *в*); 3 — темна фаза, яка утворює сітчастий візерунок на тлі матриці (рис. 2, *а, б*); 4 — світла фаза, частинки якої мають різну форму та примикають до фази, що утворює сітку (рис. 2, *г*).

На растровому електронному мікроскопі проведено дослідження структурних складових одержаного методом ЕПП ступу Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr та встановлено хемічний склад фаз і включень, що утворилися (рис. 3).

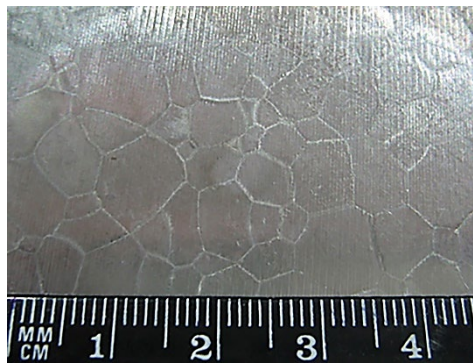


Рис. 1. Макроструктура поперечного перерізу вилівка алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr (ваг.%) \varnothing 200 мм.

Fig. 1. Macrostructure of the cross-section of titanium-aluminide ingot Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr (wt.%) \varnothing 200 mm.

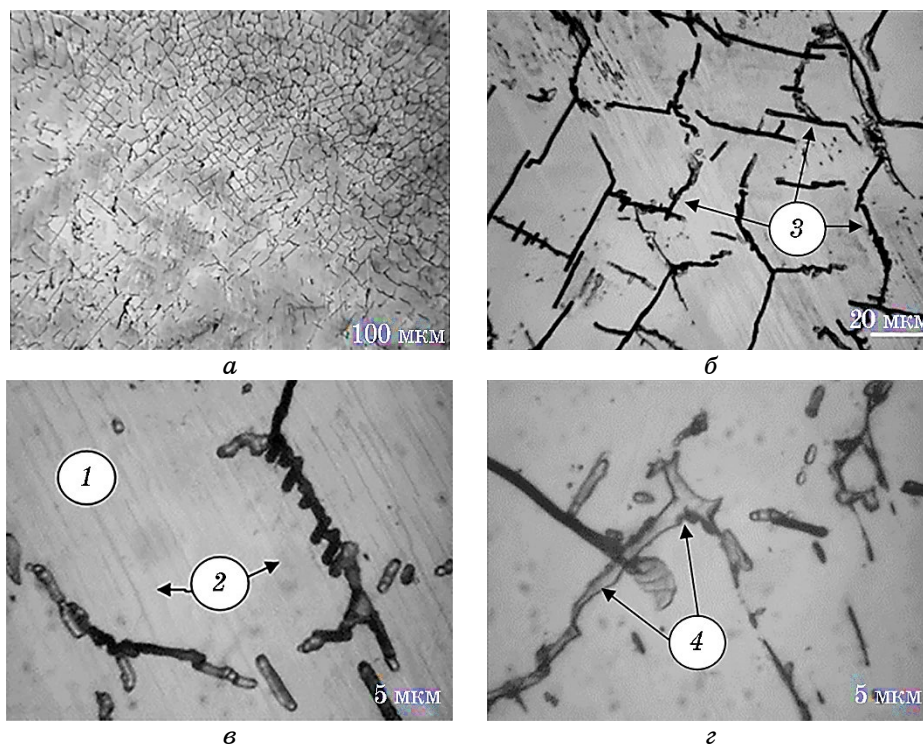


Рис. 2. Мікроструктура зразків виливка алюмініду титану.

Fig. 2. Microstructure of titanium-aluminide samples.

Рентгеноспектральні дослідження видовжених фаз по межах первинних зерен (рис. 3, *a*) показали, що вони збагачені Хромом (5,69%) і Молібденом (12,16%), але мають понижений вміст Алюмінію (23,04%) порівняно з матрицею. Це вказує на те, що це, ймовірно, — впорядкована кубічна β -фаза. Відомо, що легування Ніобієм, Хромом і Молібденом, які є сильними β -стабілізаторами, приводить до утворення $\beta(B2) + \alpha_2$ -структури, яка завдяки наявності $B2$ -фази забезпечує більш високу пластичність матеріалу (понад 10%). Аналіза включень (рис. 3, *б*) вказує на підвищений вміст Молібдену (6,48%) і Ніобію (8,84%), що вказує на утворення складних фаз, які, ймовірно, уможливають підвищити жароміцні властивості матеріалу.

Аналіза області, яку наведено на рис. 3, *в*, показує, що це — пластинчата структура з по чергових α_2 - та γ -фаз, яка притаманна двофазним ($\alpha_2 + \gamma$)-алюмінідам титану. Аналіза включення на рис. 3, *г* вказує на те, що це, як і включення на рис. 3, *а*, — ймовірно, також є $\beta/B2$ -фазою, яка має понижений вміст Алюмінію (18,64%) і під-

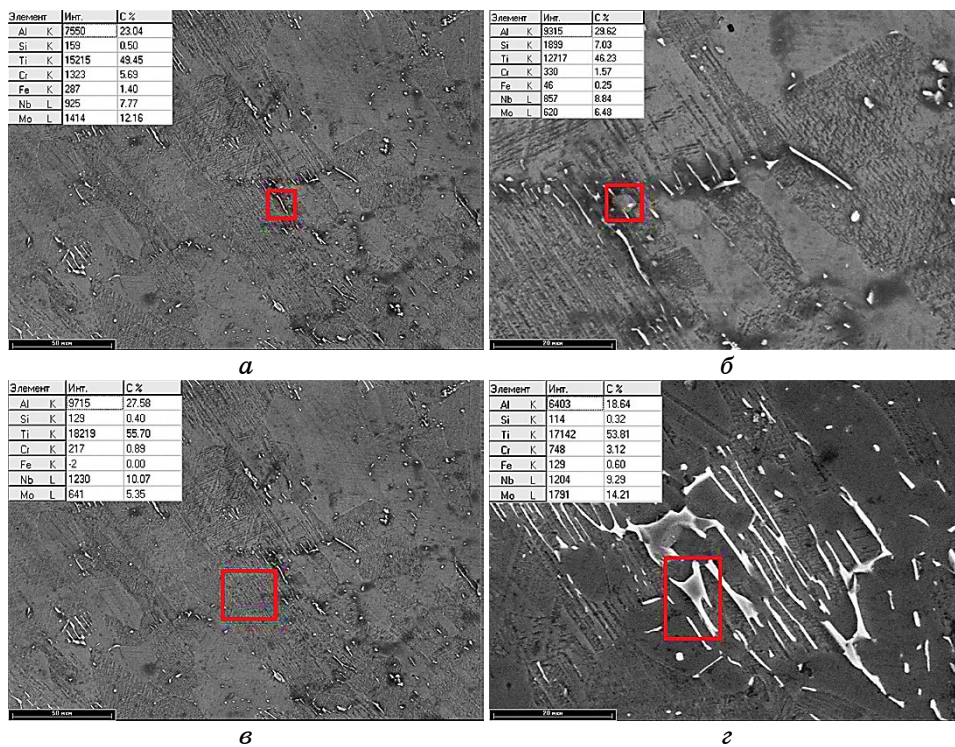


Рис. 3. Електронне зображення та локальна хемічна аналіза фаз, що утворилися за кристалізації вилівка ЕПП Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr Ø 200 мм.

Fig. 3. Electronic image and local chemical analysis of the phases formed during the crystallization of the EBM ingot of Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr Ø 200 mm.

вищений вміст Молибдену (14,21%) і Ніобію (9,29%).

Методом рентгеноспектральної аналізи було визначено розподіл елементів по полю зразка. Встановлено, що розподіл основних легувальних елементів по полю зразка у межах сусідніх зерен є достатньо рівномірним. Є деякі неістотні відхилення за складом із переходом меж від одного зерна до іншого. Відхилення в хемічному складі спостерігаються тільки із переходом через світлі вclusions. Таким чином, проведена фазова аналіза мікроструктури стопу Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr, одержаного методом ЕПП, показала, що вона складається з матричної світлої однофазної структури γ -TiAl (фаза 1 рис. 2), що чергується з ділянками двофазної ($\gamma + \alpha_2$)-лямельної структури (фаза 2 рис. 2) розміром до 50 мкм із товщиною лямель близько 1 мкм, та β /B2-фази (фаза 4 рис. 2), яка утворює сітчастий візерунок на тлі матриці.

6. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО ТИТАНОВОГО СТОПУ, ОДЕРЖАНОГО МЕТОДОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ТОПЛЕННЯ

Зварювання зразків зі стопу $\text{Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr}$ на основі алюмініду титану товщиною у 8 мм, попередньо підігрітого до 400°C , виконували зі швидкостями зварювання у 7 мм/с. Після зварювання зварні з'єднання піддавалися локальному термообробленню у вакуумній камері за температури у 750°C протягом 10 хвилин [20]. Зображення поперечного макрошліфа зварного з'єднання стопу $\text{Ti-28Al-7Nb-2Cr-2Mo}$, виконаного ЕПЗ з попереднім підігрівом і післязварювальним локальним термічним обробленням (ЛТО), наведено на рис. 4.

Формування швів під час ЕПЗ з попереднім підігрівом і післязварювальним ЛТО добре: подрізів, пор і тріщин не виявлено. Не виявлено тріщин ні в зварному шві, ні в зоні термічного впливу. Таким чином, попередній підігрів за 400°C та післязварювальне ЛТО за температури у 750°C ефективно запобігають утворенню тріщин у з'єднаннях алюмініду титану $\text{Ti-28Al-7Nb-2Cr-2Mo}$.

Мікроструктуру металу шва, виконаного ЕПЗ, представлено на рис. 5. Метал шва складається переважно з великих, витягнутих у напрямку тепловідведення зерен; тільки вздовж осі шва утворюються дрібніші рівновісні зерна розміром у 100–200 мкм (рис. 5, а, б). Лінійна темна фаза, що утворює сітку, розташована у вигляді поперечних щодо осі шва смуг у середній по висоті частині шва (рис. 5, а). У верхній і кореневій (рис. 5, б) частинах шва структурні складові у вигляді сітки не спостерігаються. Внутрішньозеренна структура металу середньої частини шва складається з невеликих (до 20 мкм) ділянок з ламельною структурою із товщиною ламелей

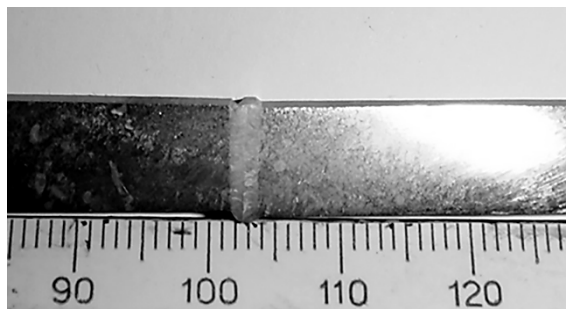


Рис. 4. Макрошліф зварного з'єднання стопу на основі алюмініду титану $\text{Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr}$, виконаного ЕПЗ.

Fig. 4. Macrosample of a welded joint of the alloy based on titanium-aluminide $\text{Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr}$ produced by means of EBW.

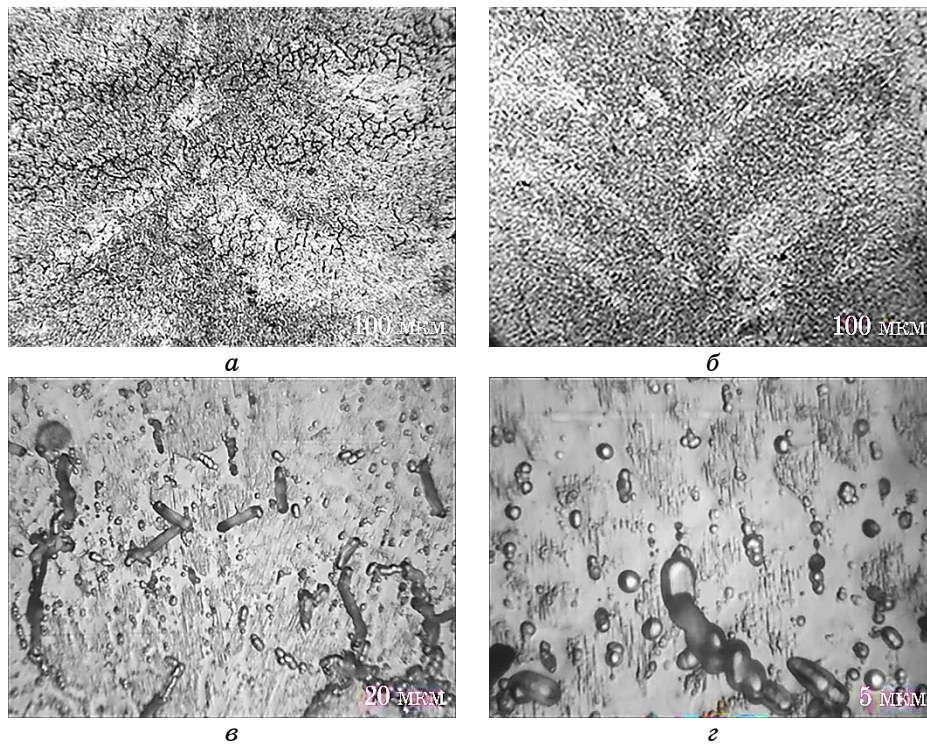


Рис. 5. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання, виконаного ЕПЗ алюмініду титану Ti-28Al-7Nb-2Cr-2Mo.

Fig. 5. The microstructure of the metal of the welded joint of titanium-aluminide Ti-28Al-7Nb-2Cr-2Mo produced by means of EBW.

близько 1 мкм на тлі світлої матричної фази. Крім того, в структурі присутні лінійні частинки, що утворюють сітку довжиною у 3–80 мкм, завтовшки у 1–3 мкм (рис. 5, в), яка буває як однорідною (рис. 5, а), так і фрагментованою (рис. 5, г). На багатьох лінійних частинках концентруються дисперсні фазові виділення, що розташовуються і на тлі матричної фази. У структурі металу шва також присутні округлі елементи, які є мікропорами; їхній розмір становить 1–2 мкм.

Так було досліджено мікроструктуру зони термічного впливу (ЗТВ), яку зображено на рис. 6. На відміну від основного металу, в ЗТВ спостерігається лямелярна структура із достатньо невеликою довжиною лямелей (до 10 мкм) і товщиною близько 1 мкм (рис. 6, б). Також метал ЗТВ відрізняється значно меншою щільністю розташування ділянок із лямелярною структурою (рис. 6, в). Інші структурні складові ЗТВ ідентичні аналогічним елементам

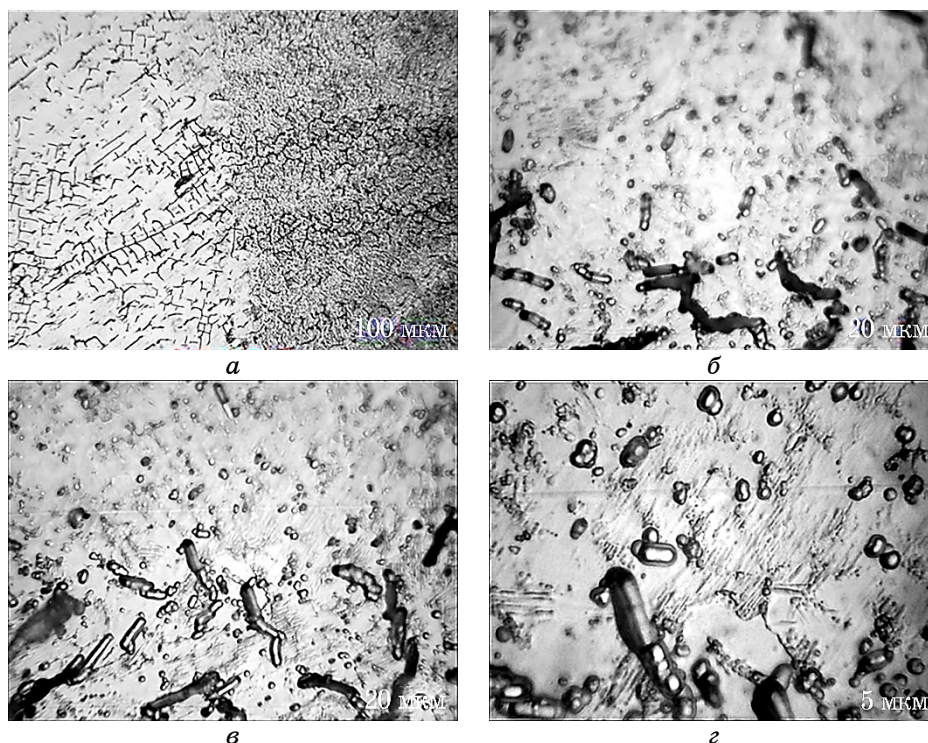


Рис. 6. Мікροструктура металу ЗТВ зварного з'єднання алюмініду титану Ti-28Al-7Nb-2Cr-2Mo, виконаного ЕПЗ.

Fig. 6. The microstructure of the metal of the heat-affected zone of the welded joint of titanium-aluminide Ti-28Al-7Nb-2Cr-2Mo produced means of EBW.

структури металу шва, за винятком того, що фаза, що утворює сітчасту структуру, в ЗТВ не утворює поперечних щодо осі шва смуг, а, швидше за все, успадковує характер розташування фази основного металу, що утворює сітку (рис. 6, г).

7. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЛИТОГО МЕТАЛУ ТА МЕТАЛУ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО ТИТАНОВОГО СТОПУ, ОДЕРЖАНОГО МЕТОДОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ТОПЛЕННЯ

Результати дослідження інтерметалідного титанового ступу Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr, одержаного за технологією ЕПП, показало, що в об'ємі виливку відсутні дефекти, неметалеві включення, а також щільні скупчення більш дрібних включень. Структура одержаного металу ЕПП є щільною, кристалічна неоднорідність і зона-

льна ліквіація відсутні. Характерної для виливків ВДП сегрегації легувальних елементів не виявлено. Розподіл легувальних елементів по довжині виливка є достатньо рівномірним (табл. 1). Макроструктура металу виливка є рівномірною по усьому перетину та характеризується кристалами, за формою близькими до рівновісної (рис. 1). Ділянки стовбчастої структури відсутні.

Досліджена мікроструктура стопу $Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr$ є типовою для двофазних алюмінідів титану і складається з матричної світлої однофазної γ -фази, що чергується з ділянками двофазної $(\gamma + \alpha_2)$ -лямельної структури, але завдяки великій кількості β -стабілізуювальних легувальних елементів має достатньо великий об'єм $\beta(B2)$ -фази, яка утворює сітчастий візерунок на тлі матриці (рис. 2 та рис. 3).

Встановлено, що литий метал виливків алюмініду титану $Ti-28Al-7Nb-2Cr-2Mo$ задовільно зварюється ЕПЗ. Під час ЕПЗ без попереднього підігріву та ЛТО в з'єднаннях утворюються поперечні та повздовжні холодні тріщини. Для попередження утворення тріщин потрібно застосовувати попередній підігрів і ЛТО. Температуру попереднього підігріву обрано у $400^\circ C$ згідно з досвідом зварювання стопу на основі алюмініду титану 47XD. Формування швів під час ЕПЗ з попереднім підігрівом і після зварювального ЛТО є добрим: подрізів, пор і тріщин не виявлено. Внутрішньозеренна структура металу середньої частини шва складається з невеликих (до 20 мкм) ділянок з лямельною структурою на тлі світлої матричної фази; товщина лямелей у металі шва — близько 1 мкм.

Таким чином, проведені дослідження показали, що електронно-променеве топлення є ефективною метою одержання якісних складнолегованих виливків інтерметалідних титанових стопів, а електронно-променеве зварювання уможливорює одержати якісне зварне з'єднання цих матеріалів.

8. ВИСНОВКИ

1. Електронно-променеве топлення є ефективною метою одержання якісних складнолегованих виливків інтерметалідних титанових стопів, а електронно-променеве зварювання уможливорює одержати якісне зварне з'єднання цих матеріалів. Методом ЕПП одержано виливки інтерметалідного титанового стопу $Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr$, які характеризуються достатньою хемічною однорідністю та відсутністю дефектів литого походження.

2. Показано, що макроструктура стопу $Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr$, одержаного методом ЕПП, є однорідною по усьому перетину виливка та характеризується кристалами, за формою близькими до рівновісної, а його мікроструктура складається з матричної світлої γ -фази, що чергується з ділянками двофазної $(\gamma + \alpha_2)$ -лямельної структури

розміром до 50 мкм із товщиною лямелей близько 1 мкм, та кубічної β -фази, яка утворює сітчастий візерунок на тлі матриці.

3. Внутрішньозеренна структура металу шва після ЕПЗ з ЛТО відрізняється від структури основного металу та складається з невеликих (до 20 мкм) ділянок із $(\gamma + \alpha_2)$ -лямельною структурою на тлі світлої матричної γ -фази із сіткою з лінійних частинок довжиною у 3–80 мкм і товщиною у 1–3 мкм.

4. Розроблено технологію зварювання виливків на основі алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Cr–2Mo, одержаних методом ЕПП. В умовах застосування додаткових технологічних прийомів, а саме, попереднього підігріву (за 400°C) та локального післязварювального термічного оброблення (за 750°C) уможливило одержати метал без підрізів, пор та ефективно запобігти утворенню тріщин у зварних з'єднаннях алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Cr–2Mo.

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. F. Appel, J. D. H. Paul, and M. Oehring, *Gamma Titanium Aluminide Alloys – Science and Technology* (Weinheim: Wiley-VCH: 2011).
2. H. Clemens and S. Mayer, *Adv. Eng. Mater.*, **15**: 191 (2013).
3. H. Clemens, M. Schloffer, E. Schwaighofer, R. Werner, A. Gaitzenauer, V. Rashkova, T. Schmoelzer, R. Pippan, and S. Mayer, *MRS Online Proc. Libr.*, **1516**: 3 (2013).
4. B. P. Bewlay, M. Weimer, T. Kelly, A. Suzuki, and P. R. Subramanian, *MRS Online Proc. Libr.*, **1516**: 49 (2013).
5. А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин, *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник* (Москва: ВИЛС–МАТИ: 2009).
6. O. Genc and R. Unal, *J. Alloys and Compd.*, **929**: 167262 (2022).
7. С. В. Ладохин, *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве* (Київ: Сталь: 2007).
8. J. C. Williams and R. R. Boyer, *Metals*, **10**, Iss. 6: 705 (2020).
9. H. Mizukami, T. Kitaura, and Y. Shirai, *MATEC Web Conf. The 14th World Conference on Titanium (Ti 2019)*, **321**: 10005 (2020).
10. Е. П. Бабенко, Е. В. Долженкова, *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **3**: 82 (2014).
11. S. Akhoniin, O. Pikulin, V. Berezos, A. Severyn, O. Erokhin, and V. Kryzhanovskiy, *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, **5**, No. 12: 6 (2022).
12. Г. В. Жук, Н. П. Тригуб, В. Н. Замков, *Современная электрометаллургия*, **4**: 20 (2003).
13. С. В. Ахонін, А. Ю. Северин, В. О. Березос, О. М. Пікулін, О. Г. Єрохін, *Сучасна електрометалургія*, **1**: 11 (2022).
14. G. Q. Chen, B. G. Zhang, W. Liu, and J. C. Feng, *Intermetallics*, **19**, Iss. 12:

- 1857 (2011).
15. M. C. Chaturvedi, Q. Xu, and N. L. Richards, *J. Mater. Process. Technol.*, **118**, No. 1: 74 (2001).
 16. U. Reisgen, S. Olschok, and A. Backhaus, *Mater. Werkst.*, **41**, Iss. 11: 897 (2010).
 17. J. Cao, J. Qi, X. Song, and J. Feng, *Materials*, **7**: 4930 (2014).
 18. В. Н. Замков, А. Е. Великоиваненко, В. К. Сабокарь, Э. Л. Вржижевский, *Автоматическая сварка*, **11**: 20 (2001).
 19. J. Cao, J. Qi, X. Song, and J. Feng, *Materials*, **7**: 4930 (2014).
 20. S. V. Akhonin, V. Y. Belous, and R. V. Selin, *Mater. Sci. Forum*, **1059**: 15 (2022).

REFERENCES

1. F. Appel, J. D. H. Paul, and M. Oehring, *Gamma Titanium Aluminide Alloys – Science and Technology* (Weinheim: Wiley-VCH: 2011).
2. H. Clemens and S. Mayer, *Adv. Eng. Mater.*, **15**: 191 (2013).
3. H. Clemens, M. Schloffer, E. Schwaighofer, R. Werner, A. Gaitzenauer, B. Rashkova, T. Schmoelzer, R. Pippan, and S. Mayer, *MRS Online Proc. Libr.*, **1516**: 3 (2013).
4. B. P. Bewlay, M. Weimer, T. Kelly, A. Suzuki, and P. R. Subramanian, *MRS Online Proc. Libr.*, **1516**: 49 (2013).
5. А. А. Ил'ин, В. А. Колачев, and И. С. Пол'кин, *Titanovyye Splavy. Sostav, Struktura, Svoistva: Spravochnik* [Titanium Alloys. Composition, Structure, Properties: Handbook] (Moscow: VILS-MATI: 2009) (in Russian).
6. O. Genc and R. Unal, *J. Alloys and Compd.*, **929**: 167262 (2022).
7. S. V. Ladokhin, *Elektronno-Luchevaya Plavka v Liteynom Proizvodstve* [Electron Beam Melting in Foundries] (Kiev: Stal': 2007) (in Russian).
8. J. C. Williams and R. R. Boyer, *Metals*, **10**, Iss. 6: 705 (2020).
9. H. Mizukami, T. Kitaura, and Y. Shirai, *MATEC Web Conf. The 14th World Conference on Titanium (Ti 2019)*, **321**: 10005 (2020).
10. E. P. Babenko and E. V. Dolzhenkova, *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost'*, **3**: 82 (2014) (in Russian).
11. S. Akhonin, O. Pikulin, V. Berezos, A. Severyn, O. Erokhin, and V. Kryzhanovskiy, *East-Eur. J. Enterp. Technol.*, **5**, No. 12: 6 (2022).
12. G. V. Zhuk, N. P. Trigub, and V. N. Zamkov, *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, **4**: 20 (2003) (in Russian).
13. S. V. Ahonin, A. Yu. Severyn, V. O. Berezos, O. M. Pikulin, and O. G. Jerohin, *Suchasna Elektrometallurgiya*, **1**: 11 (2022) (in Ukrainian).
14. G. Q. Chen, B. G. Zhang, W. Liu, and J. C. Feng, *Intermetallics*, **19**, Iss. 12: 1857 (2011).
15. M. C. Chaturvedi, Q. Xu, and N. L. Richards, *J. Mater. Process. Technol.*, **118**, No. 1: 74 (2001).
16. U. Reisgen, S. Olschok, and A. Backhaus, *Mater. Werkst.*, **41**, Iss. 11: 897 (2010).
17. J. Cao, J. Qi, X. Song, and J. Feng, *Materials*, **7**: 4930 (2014).
18. В. Н. Замков, А. Е. Великоиваненко, В. К. Сабокарь, Ye. L. Vrzhyzhevskyy, *Автоматическая Сварка*, **11**: 20 (2001) (in Russian).
19. J. Cao, J. Qi, X. Song, and J. Feng, *Materials*, **7**: 4930 (2014).
20. S. V. Akhonin, V. Y. Belous, and R. V. Selin, *Mater. Sci. Forum*, **1059**: 15 (2022).