

ОСОБЛИВОСТІ ВИПЛАВКИ ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ ТИТАНУ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ Ti–Nb–Al–Mo–Zr СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ З ПРОМІЖНОЮ ЄМНІСТЮ

С.В. Ахонін¹, В.О. Березос¹, А.Ю. Северин¹, О.Г. Єрохін¹, В.В. Пашинський²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: titan.paton@gmail.com

²ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка». 69008, м. Запоріжжя, Південне шосе, 80

З метою відпрацювання техніки і технології виплавки зливків жароміцних сплавів на основі титану з вмістом орто-фази Ti_2AlNb були проведені дослідні роботи з одержання експериментального сплаву Ti–39Nb–16Al–2,6Mo–1,4Zr. Представлені результати досліджень одержаного зливка, виготовленого шляхом подвійного електронно-променевого переплаву. Розроблена технологія і проведені дослідні плавки зливка діаметром 110 мм Ti–39Nb–16Al–2,6Mo–1,4Zr способом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю показали перспективність використання методу ЕПП для одержання зливків жароміцних сплавів на основі титану з вмістом орто-фази Ti_2AlNb . Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: електронно-променева плавка, проміжна ємність, зливки, тугоплавкі елементи, хімічний склад, алюміній титану, орто-фаза

Вступ. Перспективним напрямом, що розвивається в світі в області нових металевих матеріалів з високим рівнем жароміцності, жаростійкості і термічної стабільності є створення інтерметалідних сплавів системи Ti–Al–Nb і технології їх отримання [1–3]. Орто-сплави цілком можуть замінити жароміцні сталі та нікелеві сплави, що використовуються в роторі та статорі КВД, однак, незважаючи на переваги цих сплавів, за кордоном досі не використовується будь-який орто-сплав. Очевидно, це пов'язано з тим, що такі сплави виявилися досить складними у металургійному виробництві. Необхідність використання для легування більш дорогих і тугоплавких елементів (ніобію, молібдену та ін.), забезпечення високої однорідності складу зливків, застосування обладнання із захисною атмосферою, жорсткий контроль макро- та мікроструктури у напівфабрикатах — це головні причини гальмування промислового освоєння цього класу сплавів. Тим не менш існують реальні передумови та технічні можливості подолання багатьох із зазначених труднощів.

Найбільший інтерес становлять орто-сплави, що знаходяться в межах легування Ti–(22...25) Al–(25...30)Nb (ат. %), і в яких наявні виділення орто-фази Ti_2AlNb . Слід зазначити, що збільшення вмісту алюмінію понад 25 ат. % хоч і підвищує жароміцність матеріалу, але призводить до падіння в'язкості [4, 5]. Крім алюмінію та ніобію орто-сплави можуть містити додаткові легуючі елементи. Так, макролегування таким елементом як

Mo призводить до розширення області існування β -фази, яка виступає в ролі пластичної матриці і уповільнення дифузійних процесів в об'ємі та на міжфазних границях матеріалу, підвищуючи його температуру плавлення та послаблюючи розміщення при робочих температурах. Цирконій, виступаючи по відношенню до титанових та інтерметалідних титанових сплавів нейтральним зміцнювачем, забезпечує твердорозчинне зміцнення основних фаз та підвищує опір повзучості.

Одним з методів одержання зливків інтерметалідів є технологія плавки, що базуються на незалежних джерелах нагрівання. Необхідно враховувати, що до складу жароміцних сплавів на основі титану входять легуючі елементи — Nb, Zr, Mo, які, як і титан, мають високу хімічну активність до газів при підвищених температурах, що викликає необхідність проведення процесу плавки цих матеріалів у захисній атмосфері або в умовах вакууму [6]. Серед сучасних способів спеціальної електрометалургії електронно-променева плавка є найбільш ефективним методом вакуумної металургії [7, 8].

Як показано в роботі [6] при виплавці способом електронно-променевої плавки орто-сплавів з підвищеним вмістом тугоплавких легуючих елементів (ніобій, молібден, вольфрам) значно ускладнюється забезпечення рівномірного хімічного складу в об'ємі зливка. Особливо складно забезпечити рівномірний вміст елементів із високою пружністю пари — алюмінію та хрому. Тому, в роботі [9] було розроблено математичну модель

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>,

А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>, О.Г. Єрохін — <http://orcid.org/0000-0003-2105-5783>,

В.В. Пашинський — <https://orcid.org/0000-0003-0118-4748>

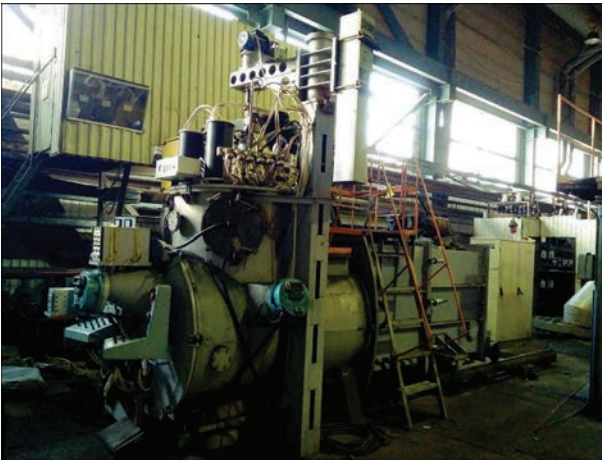


Рис. 1. Лабораторна електронно-променева установка UE-208M процесів випаровування легуючих елементів з титанових сплавів при електронно-променевій плавці з проміжною ємністю та на прикладі процесу отримання зливка сплаву алюмінію титану $Ti-29Al-12Nb-3Cr-3Zr$ встановлено залежності концентрації легуючих елементів у зливку від технологічних параметрів плавки та вмісту легуючих елементів у вихідній шихті.

В проведенні раніше дослідженнях показано, що забезпечення заданого хімічного складу інтерметалідних сплавів титану забезпечується лише при проведенні щонайменше подвійного електронно-променевого переплаву. Крім цього, для полегшення введення легуючих в склад сплаву було застосовано різні лігатури, які є достатньо дефіцитними та вартісними. Тому, особливий інтерес представляє розробка технології, що дозволяє використовувати чисті компоненти для одержання матеріалів подібного класу.



Рис. 2. Шихтова заготовка для одержання сплаву ортоалюмініду титану $Ti-39Nb-16Al-2,6Mo-1,4Zr$

Методика досліджень. З метою відпрацювання техніки та технології виплавки зливків жароміцних сплавів на основі титану з вмістом орто-фази Ti_2AlNb були проведені дослідні роботи з одержання експериментального сплаву $Ti-39Nb-16Al-2,6Mo-1,4Zr$ (мас. %).

Для проведення експериментальних досліджень була використана багатоцільова лабораторна електронно-променева установка UE-208M [10] (рис. 1).

Технологічна послідовність виплавки зливків складалася з наступних етапів: розрахунок кількості компонентів вихідної шихти з урахуванням витрат на випаровування; підготовка устаткування і технологічного оснащення до плавки; формування витратних заготовок; процес плавки; відбір проб для хімічного й газового аналізу виплавленого зливка.

Перед проведенням дослідних плавок по виплавці зливків здійснювали підготовку устаткування, що полягала в чищенні камери плавки, плити електронно-променевої гармат, проміжної ємності та кристалізатора, піддона від конденсату, пилу і залишків металу попередніх плавок.

Дослідні плавки проводили в кристалізатор діаметром 110 мм. Роботи щодо одержання зливка жароміцного титанового сплаву $Ti-39Nb-16Al-2,6Mo-1,4Zr$ проводили в два етапи. При виплавці сплавів на основі титану способом електронно-променевої плавки основна проблема розподілу легуючих виникає саме з елементами, які мають високу пружність пари [11, 12]. Тому, з метою забезпечення більш рівномірного розподілу алюмінію в кінцевому зливку, на першому етапі виплавляли проміжну заготовку чистого алюмініду титану без додавання тугоплавких легуючих елементів. Було підготовлено шихтову заготовку, яка включала в себе брикети титанової губки ТГ-120 та технічно чистий алюміній (рис. 2).

На другому етапі до одержаного зливка чистого алюмініду титану додавали легуючі елементи у вигляді електролітичного ніобію, технічно чистого молібдену та подрібненого йодидного цирконію.

Після завантаження шихти установку вакуумували до рівня залишкового тиску в камері плавки до 10^{-2} Па. Потім заготовку сплавляли в проміжну ємність до її заповнення та періодично зливали рідкий метал в мідний водоохолоджуваний кристалізатор. Першими порціями зливу формували затравку майбутнього зливка. Потім, на досягнутому технологічному режимі, виплавляли зливок необхідної висоти (рис. 3).

Під час проведення експериментальних плавок проводили контроль наступних технологічних параметрів: швидкість плавки, струм електронних променів, величину прискорювальної напруги.



Рис. 3. Процес плавки зливка діаметром 110 мм сплаву ортоалюмініду титану Ti-39Nb-16Al-2,6Mo-1,4Zr

Чисельні значення прискорювальної напруги й струму променів виміряли і регулювали за допомогою призначених для цього приладів. Швидкість плавки регулювали швидкістю подачі заготовки, що витрачається, у зону плавки.

Технологічні параметри плавки зливка діаметром 110 мм сплаву ортоалюмініду титану Ti-39Nb-16Al-2,6Mo-1,4Zr

Загальна потужність ЕП нагріву, кВт	130
Потужність в кристалізаторі, кВт	30
Швидкість плавки, кг/год.	30

Після плавки зливков знаходився в камері в умовах вакууму до повного його охолодження. Отримано зливков діаметром 110 мм, масою приблизно 40 кг (рис. 4).

Від отриманого зливка було відрізано головну частину з усадковою раковиною та проведено відбір проб для хімічного аналізу. Проби відбирали в трьох точках у вигляді стружки способом свердління. Причому спочатку знімали верхній шар зливка на глибину не менше ніж 5 мм, після чого проводили відбір стружки для аналізу на глибину до 10 мм від поверхні зливка.

Для точного аналізу вмісту легуючих елементів в одержаному зливку використовували метод індуктивно зв'язаної плазми/оптичної емісійної спектроскопії (ICP-OES) на ICP-спектроскопі ICAP 6500 DUO. Як показали дослідження, після двократного електронно-променевого переплаву розподіл легуючих задовільний та не виходить за межі технічного завдання (таблиця). Вміст кисню склав 0,04 мас. %, що відповідало даним сертифікату вмісту кисню в титановій губці ТГ-120.

Для дослідження методом оптичної металографії мікроструктури матеріалу в литому стані з Хімічний склад зливка діаметром 110 мм сплаву ортоалюмініду титану Ti-39Nb-16Al-2,6Mo-1,4Zr, одержаного ЕПП, мас. %

Частина зливка	Nb	Al	Mo	Zr	Ti	O
Верх	39,2	16,4	2,62	1,37	Основа	0,04
Середина	39,2	15,3	2,76	1,36		
Низ	39,7	14,9	2,63	1,35		



Рис. 4. Зливков діаметром 110 мм сплаву ортоалюмініду титану Ti-39Nb-16Al-2,6Mo-1,4Zr

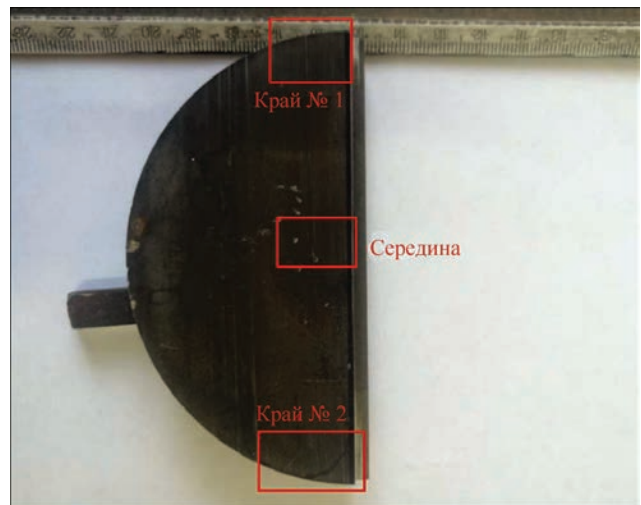


Рис. 5. Схема відбору зразків для дослідження мікроструктури отриманого зливка відібрано зразки згідно схеми, приведеної на рис. 5.

Загальний вигляд мікроструктури при збільшеннях $\times 50$, 500 і 1000 приведено на рис. 6. При аналізі зображень (рис. 6, а-в, $\times 50$) видно, що структура

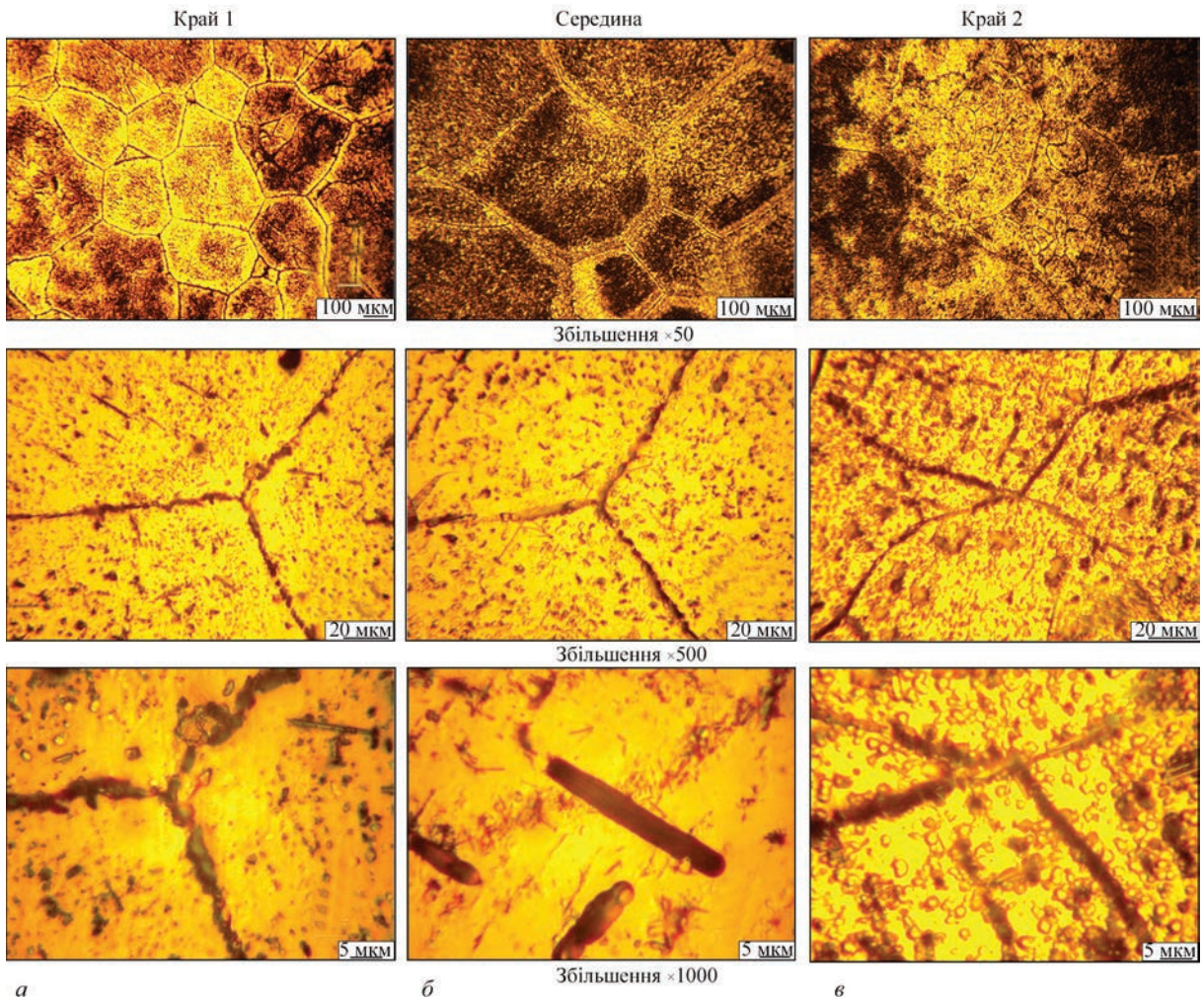


Рис. 6. Загальний вигляд мікроструктури литого металу: *а* — місце відбору відповідає зоні край 1; *б* — середина; *в* — край 2

утворена рівновісними зернами ОЦК β -фази з дисперсними виділеннями в тілі зерен. З порівняння рис. 6, *б* з рис. 6, *а*, *в* видно, що в середній зоні розмір зерна більший, ніж у периферійних зонах зливка. Це пояснюється різницею в швидкості охолодження периферії та центру зливка.

З метою дослідження морфології фаз, що виділяються в тілі зерна, проведено дослідження мікроструктури матеріалу при збільшеннях $\times 500$ та $\times 1000$ (рис. 6). З аналізу мікроструктур видно, що основна кількість виділень — це дисперсні частинки приблизно рівновісної форми, які локалізовані в тілі зерна. Границі зерен є чистими від виділень (рис. 6, *а–в*, $\times 500$). В той же час, в середній зоні спостерігаються окремі пластиноподібні виділення довжиною 20...30 мкм (рис. 6, *б*, $\times 1000$). Виходячи з морфології частинок, можна зробити припущення, що дисперсні — це α_2 -фаза (Ti_3Al), а пластиноподібні — це кристали θ -фази (ортогональна фаза Ti_2AlNb).

Таким чином, розроблена технологія і проведені дослідні плавки зливка діаметром 110 мм $Ti-39Nb-16Al-2,6Mo-1,4Zr$ способом електрон-

но-променевої плавки з проміжною ємністю показали перспективність використання методу ЕПП для одержання зливок жароміцних сплавів на основі титану з вмістом орто-фази Ti_2AlNb .

Висновки

1. Для проведення дослідних плавок обрано систему легування $Ti-39Nb-16Al-2,6Mo-1,4Zr$ з вмістом інтерметалідних фаз Ti_3Al та Ti_2AlNb .

2. Розроблено новий спосіб введення в сплав легуючих елементів і проведена експериментальна плавка зливка діаметром 110 мм.

3. Показано, що електронно-променева плавка дозволяє отримати зливки сплавів на основі титану з високим вмістом алюмінію і ніобію та достатньо рівномірним розподілом легуючих елементів.

4. Дослідження мікроструктури литого металу показало, що структура утворена рівновісними зернами β -фази з дисперсними виділеннями в тілі зерен. Виходячи з морфології частинок можна зробити припущення, що дисперсні виділення — це α_2 -фаза, а пластиноподібні виділення — це кристали θ -фази (ортогональна фаза Ti_2AlNb).

Список літератури/References

1. Kumpfert, J. (2001) Intermetallic alloys based on orthorhombic titanium aluminide. *Adv. Eng. Mater.*, **3**, 851–864. DOI: [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(200111\)3:113.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200111)3:113.0.CO;2-G)
2. Partridge, A., Shelton, E.F.J. (2001) Processing and mechanical property studies of orthorhombic titanium-aluminide-based alloys. *Air Space Eur.*, **3**, 170–173. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1290-0958\(01\)90085-1](https://doi.org/10.1016/S1290-0958(01)90085-1)
3. Gogia, A.K. (2005) High-temperature titanium alloys. *Defence Sci. J.*, **55**, 49–173. DOI: <https://doi.org/10.14429/dsj.55.1979>
4. Chen, Y., Niu, H., Kong, F., Xiao, S. (2011) Microstructure and fracture toughness of a β phase containing TiAl alloy. *Intermetallics*, **19**, 1405–1410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.05.006>
5. Emura, S., Araoka, A., Hagiwara, M. (2003) B2 grain size refinement and its effect on room temperature tensile properties of a Ti–22Al–27Nb orthorhombic intermetallic alloy. *Scripta Mater.*, **48**, 629–634. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1359-6462\(02\)00462-1](https://doi.org/10.1016/s1359-6462(02)00462-1)
6. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.A. (2015) Development of technology of adding the refractory alloying elements into alloys on the base of Ti_2AlNb intermetallic in electron beam melting. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, **3**, 12–15 [in Russian].
7. Vutova, K., Vassileva, V., Stefanova, V. et al. (2019). Effect of electron beam method on processing of titanium technogenic material. *Metals*, **9**(6), 683. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9060683>
8. Liu, Q.L., Li, X.M., Jiang, Y.H. (2016) Research progress of electron beam cold hearth melting for titanium and titanium alloys. *Hot Work. Technol.*, **45**, 9–14.
9. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.A., Erokhin A.G. (2013) Mathematical modelling of evaporation processes in melting of ingots of multicomponent titanium alloys in electron beam equipment with a cold hearth. *Advances in Electrometallurgy*, **4**, 288–295.
10. Akhonin, S.V., Pikulin, A.N., Berezos, V.A. et al. (2019) Laboratory electron beam unit UE-208M. *Suchasna Elektrometallurgiya*, **3**, 15–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.03.03>
11. Wang, Y., Gao, L., Xin, Y. et al. (2024) Numerical modeling of electron beam cold hearth melting for the cold hearth. *Minerals*, **14**(6), 601. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14060601>
12. Bellot, J.-P., Hess, E., Hitzer, D. (2000) Aluminum volatilization and inclusion removal in the electron beam melting and refining of titanium alloys. *Metallurgical, Materials Transact.*, **31B**(8), 845–859.

FEATURES OF SMELTING OF HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOY
OF THE Ti–Nb–Al–Mo–Zr ALLOYING SYSTEM
BY ELECTRON BEAM MELTING WITH A COLD HEARTH

S.V. Akhonin¹, V.O. Berezos¹, A.Yu. Severyn¹, O.H. Yerokhin¹, V.V. Pashynskiy²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: titan.paton@gmail.com

²Technical University «Metinvest Polytechnic» LLC. 80 Southern Highway, 69008, Zaporizhzhia, Ukraine

In order to develop the technique and technology of smelting ingots of heat-resistant alloys based on titanium with the content of the Ti_2AlNb ortho-phase, experimental works were carried out to produce the experimental Ti–39Nb–16Al–2.6Mo–1.4Zr alloy. The results of studies of the produced ingot made by double electron beam remelting are presented. The developed technology and experimental melting of the 110 mm diameter Ti–39Nb–16Al–2.6Mo–1.4Zr ingot by the electron beam melting method with a cold hearth showed the prospects of using the EBM method for producing ingots of heat-resistant alloys based on titanium containing the Ti_2AlNb ortho-phase. 12 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: electron beam melting, cold hearth, ingot, refractory elements, chemical composition, titanium aluminide, ortho-phase

Отримано 07.04.2025

Отримано у переглянутому вигляді 11.04.2025

Прийнято 07.05.2025

5th Symposium on Materials and Additive Manufacturing

Additive 2026

24 - 26 MARCH 2026
HYBRID SYMPOSIUM - KASSEL & ONLINE

The 5th Symposium on Materials and Additive Manufacturing combines manufacturing and materials-related aspects, focusing on both the current state of science and implementation in practical applications.

ABSTRACT SUBMISSION:
DEADLINE 01 SEPTEMBER 2025