

ВВЕДЕННЯ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ВИПЛАВЛЕНІ ЗЛИВКІВ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ЛОПАТОК АВІАДВИГУНІВ 5-ГО ПОКОЛІННЯ

В.О. Березос¹, О.Б. Галенкова², Т.О. Мітіна³, А.М. Іванів⁴

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

²АТ «Івченко-Прогрес». 69068, м. Запоріжжя, вул. Іванова, 2

³АТ «Інститут титану». 69035, м. Запоріжжя, просп. Соборний, 180

⁴Український державний університет науки і технологій. 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2

РЕФЕРАТ

Досліджено технологічні особливості отримання інтерметалідних сплавів на основі алюмініду титану, перспективних для використання в деталях газотурбінних двигунів. Особливу увагу приділено застосуванню рідкісноземельних металів, зокрема ітрію, як ефективної модифікуючої добавки при виплавці сплавів. Розглянуто технологічні особливості отримання інтерметалідних сплавів на основі алюмініду титану, призначених для використання у сучасному авіаційному двигунобудуванні. Представлено результати виплавки зливка діаметром 195 мм сплаву системи Ti–29Al–7Nb–2Mo методом подвійного електронно-променевого переплаву. Для формування оптимального хімічного складу та підвищення експлуатаційних характеристик було проведено подальший переплав у вакуумно-дуговій печі з контрольованою атмосферою із введенням модифікувального елемента ітрію. Вивчено вплив модифікування на макро- та мікроструктуру сплаву, а також на його механічні властивості. Встановлено, що введення поверхнево-активного елемента сприяє подрібненню зеренної структури та підвищенню міцності матеріалу. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 2.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: алюмінід, титан, електронно-променева плавка, вакуумно-дуговий переплав, модифікування, ітрій, структура, механічні властивості

ВСТУП

Рідкісноземельні метали (РЗМ) широко використовуються в металургії при виплавці різних сплавів як ефективні модифікуючі добавки. Їх введення в склад металів сприяє очищенню розплаву від шкідливих домішок, подрібненню зеренної структури та підвищенню механічних і експлуатаційних властивостей матеріалів. Завдяки цьому рідкісноземельні елементи застосовуються при виробництві різних конструкційних і жароміцних сплавів, що використовуються у сучасному машинобудуванні.

Розробка технологій видобутку та переробки рідкісноземельних металів є складним науково-технічним завданням, яким займається обмежена кількість спеціалізованих наукових установ. Серед них провідне місце у розробці технологій переробки мінеральної сировини та вилучення рідкісних і рідкісноземельних елементів виконано фахівцями Інституту титану (м. Запоріжжя). У межах науково-дослідних робіт Інститутом опрацьовані технологічні схеми комплексної переробки рудної та техногенної сировини, спрямовані на підвищення ступеня вилучення цінних компо-

нентів і раціональне використання мінеральних ресурсів.

Отримані РЗМ знаходять застосування як модифікуючі елементи при виплавці, зокрема, сплавів на основі алюмініду титану, що розглядаються в якості перспективних жароміцних матеріалів деталей газотурбінних двигунів з робочими температурами 600...700 °С. Додавання окремих рідкісноземельних елементів сприяє підвищенню пластичності з одночасним забезпеченням високих характеристик міцності та жароміцності сплавів на основі алюмінідів титану завдяки зміні морфології та подрібненню зерна литої структури.

Головною формуютьвою технологією виробництва деталей з алюмініду титану є технологія лиття [1, 2], в результаті якої формується мікроструктура з крупнозернистою будовою.

Отримання якісних зливок з титанових сплавів забезпечується використанням декількох переплавів — електронно-променевої плавки та подальшого вакуумно-дугового переплаву. Ця технологія забезпечує високу чистоту металу та дозволяє контролювати процеси кристалізації.

Метою даної роботи є розробка технологічної схеми отримання зливок сплаву системи Ti–28Al–7Nb–2Mo та дослідження впливу рідкоземельного елемента ітрію на формування структури і механічних властивостей матеріалу.

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026.

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ, УСТАТКУВАННЯ І МАТЕРІАЛИ

Алюмініди титану мають область ефективного температурного використання 600...800 °С. Для підтвердження та визначення цієї області важливим є проведення досліджень для конкретних авіаційних виробів, що працюють у високотемпературній області двигуна, наприклад, в турбінній частині. Аналіз номенклатури деталей турбіни показав необхідність проведення досліджень для лопаток, що обґрунтовано складністю умов їх роботи, температурного та напруженого стану.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси отримання зливків алюмінідів титану для використання заготовок для виготовлення лопаток турбінної частини двигуна наземних установок, що використовуються на підприємствах ДП «Івченко-Прогрес» та АТ «МОТОР СІЧ».

Виплавка зливків включає в себе операції отримання витратного крупнобаритного електрода методом електронно-променевої плавки, його дошихтовку РЗМ та переплав з використанням вакуумно-дугової печі в тигель з подальшим литтям металу у кокіль.

В якості базового складу обрано сплав на основі алюмініду титану IV покоління системи Ti–29Al–7Nb–2Mo. На основі аналізу впливу різних модифікуючих елементів на структуру та

властивості γ -сплавів [3–6], елементом-модифікатором в роботі обрано Y. Ітрій — рідкісноземельний елемент, атомний радіус складає 187 пм ($187 \cdot 10^{-12}$ м), густина 4,47 г/см³. Ітрій не розчиняється у титані внаслідок великої відмінності атомних радіусів. Ітрій має сприятливі термодинамічні характеристики, що дозволяє впливати на розмір та морфологію структури титанових сплавів [7], найбільш суттєво при вмісті ітрію не більше 0,2 %.

У даному дослідженні використано раніше розроблену технологічну схему отримання зливків сплаву Ti–29Al–7Nb–2Mo, реалізовану методом подвійного електронно-променевого переплаву, що забезпечує стабільність хімічного складу [8, 9]. Виплавку зливку базового сплаву у вигляді витратного електрода діаметром 195 мм здійснювали методом електронно-променевого переплаву на установці УЭ-208М. Для забезпечення стабільного хімічного складу використовували технологію подвійного переплаву. При першому переплаві до сплаву вводили тугоплавкі легуючі елементи — ніобій та молібден. При другому переплаві до отриманого зливка додавали алюміній з урахуванням втрат на випаровування. Це дає змогу мінімізувати втрати алюмінію та забезпечити гарантоване розчинення тугоплавких легуючих елементів та рівномірний їх розподіл за довжиною та поперечним перерізом зливка.



Рис. 1. Обладнання для отримання зливка: вакуумно-дугова піч (а), тигель (б), кокіль (в); зовнішній вигляд отриманого зливка (г)

Для отримання сплаву з модифікатором відризалася частина зливка діаметром 195 мм, дошхтовувалась модифікатором Y і переплавлялась з використанням вакуумно-дугової печі у графітовий тигель (рис. 1, б), розливку металу проводили в кокіль (рис. 1, в). Така піч використовується для пілотного та напівпромислового виробництва литих виробів, виробництва ремонтних виливків, лабораторних дослідницьких цілей.

Лігатуру Ti–Al–5%Y отримано шляхом плавки шматочків титану губчастого та алюмінію з ітрієм у вигляді порошку у вакуумі в мідному кристалізаторі з використанням невитратного вольфрамового електрода. Розмір виплавленої заготовки відповідає габаритам готового виробу, в даному випадку висоті лопатки, і складає діаметром 70 мм і висотою 90 мм.

Для підтвердження рівномірності хімічного складу базового сплаву, отриманого ЕПП, проведено аналіз хімічного складу за довжиною зливка. Хімічний склад сплаву з ітрієм, виплавленого методом ВДП, виконано за висотою зливка з верхньої, середньої та нижньої його частин.

Аналіз хімічного складу сплаву виконували спектральним безеталонним методом на енергодисперсійному рентгенофлуорисцентному аналізаторі «Expert 3L». Вміст газових домішок (O, N, H) аналізували за допомогою газоаналізатора фірми «ELTRA».

Оцінку мікроструктури темплету проводили неозброєним оком за перетином зливка. Металграфічні дослідження виконували на оптичному мікроскопі «AxioObserver 5» після травлення

зразків у реактиві для титанових сплавів складу $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O} = 1:2:6$.

Механічні властивості визначали під час випробувань на розтяг відповідно до стандарту ДСТУ ISO 6892–1.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У результаті досліджень методом ЕПП отримано зливок сплаву базового складу Ti–28Al–7Nb–2Mo діаметром 195 мм масою понад 100 кг. Зовнішній огляд показав відсутність грубих дефектів, таких як тріщини або незлитини. Для усунення поверхневих нерівностей виконано механічну обробку на глибину близько 5 мм. Детальне дослідження хімічного складу, макро- і мікроструктури сплаву базового складу виконано в роботі [10].

Зовнішній вигляд зливка Ti–29Al–7Nb–2Mo–0,2Y, отриманого шляхом ВДП, приведено на рис. 1, г. Геометрія зливка відповідає габаритним розмірам заготовок лопаток.

Аналіз хімічного складу (табл. 1) показав досить рівномірний розподіл легувальних та модифікуючих елементів у всьому об’ємі металу.

Дослідження макро- та мікроструктури зливка виконано за поперечним його перерізом. Мікроструктура сплаву з Y характеризується витягнутими зернами (рис. 2, а). При додаванні 0,2%Y β -зерна набувають поліедричної форми та спостерігається скорочення довжини пластин ($\alpha_2+\gamma$)-фаз до 100...150 мкм порівняно із базовим сплавом з товщиною пластин 100...400 мкм (рис. 2, б).

Завдяки введенню ітрію у кількості 0,2 % як поверхнево-активного елемента вдалося досягти

Таблиця 1. Хімічний склад зливка Ti–29Al–7Nb–2Mo–0,2Y

Сплав	Місце відбору проб	Ti	Al	Nb	Mo	Y
Ti–29Al–7Nb–2Mo–0,2Y	Верх	Основа	28,6	7,6	1,9	0,20
	Середня частина		27,3	→→	2,1	0,16
	Низ		30,4	7,3	2,0	0,21

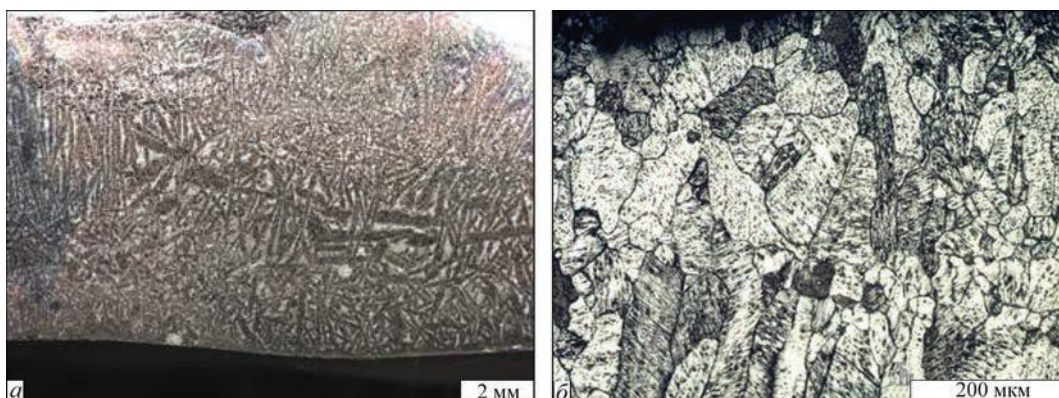


Рис. 2. Макро- (а) та мікроструктура (б) зливка Ti–29Al–7Nb–2Mo–0,2Y після травлення

Таблиця 2. Механічні властивості дослідних сплавів

Сплав	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %
Ti-29Al-7Nb-2Mo	285	0,4
Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2Y	507	0,6

підвищення механічних властивостей сплаву порівняно із базовим сплавом. Так, границя міцності сплаву збільшилася на 80 %, подовження — на 50 % (табл. 2).

Підвищення механічних властивостей при введенні ітрію пов'язане зі зміною морфології зерна литої структури шляхом зміни міжфазної енергії на межах зерен і фаз. До того ж ітрію сприяє рафінуванню меж зерен завдяки високій хімічній активності з домішками кисню, сірки та азоту, утворюючи стабільні сполуки (оксиди, сульфід, нітриди).

За результатами проведених досліджень сформовано технологічну схему, адаптовану до умов промислового виробництва. Вона включає отримання витратного електроду методом подвійного переплаву з подальшим введенням модифікатора для підвищення механічних властивостей базового сплаву. Плавлення здійснюється в дуговій печі з контрольованим газовим середовищем з подальшою розливкою металу у кокиль.

У межах запропонованої схеми встановлено раціональні режими плавки, що експериментально підтверджують забезпечення ізотропності властивостей матеріалу як при легуванні тугоплавкими елементами, так і при виплавці витратного електроду модифікованого складу.

Подальші роботи будуть спрямовані на легування сплаву базового складу додатковими модифікуючими елементами з метою досягнення комплексу властивостей, що відповідає вимогам до матеріалів деталей турбінної частини двигуна.

ВИСНОВКИ

1. Відтворено та експериментально підтверджено ефективність розробленої технологічної схеми отримання злиwkів сплаву Ti-29Al-7Nb-2Mo методом подвійного електронно-променевого переплаву для стабілізації хімічного складу.

2. Подальший вакуумно-дуговий переплав із введенням рідкоземельного елемента ітрію забезпечив формування однорідного зливка складу Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2Y.

3. Встановлено, що додавання ітрію призводить до утворення полідричної форми β -зерна та збільшення дисперсності структурних складових ($\alpha_2 + \gamma$)-фаз у середньому в 2 рази порівняно з базовим сплавом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

1. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (1999) *Electron beam melting of titanium*. Titanium'99: Science and Technology, 1372–1384.
2. Chen, B., Ma, Y., Gao, M., Liu, K. (2010) Changes of oxygen content in molten TiAl alloys as a function of superheat during vacuum induction melting. *J. of Materials Science & Technology*, 26(10), 900–903. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1005-0302\(10\)60144-2](https://doi.org/10.1016/s1005-0302(10)60144-2)
3. Goltvyanitsya, V.S., Tsvirko, E.I., Goltvyanitsya, S.K. (2013) Structure and properties of alloys based on titanium aluminides with boron and rare earth elements. *Visnyk Dvygunobuduvannya*, 1, 88–94 [in Ukrainian].
4. Markovsky, P.E. (1995) Improvement of structure and mechanical properties of cast titanium alloys using rapid heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 190(1–2), 9–12.
5. Khorev, A.I. (1979) Microalloying of titanium alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 21, 927–931. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00706629>
6. Nochovnaya, N.A., Khorev, A.I., Yakovlev, A.L. (2013) Perspectives of alloying titanium alloys with rare earth elements. *Metal Science and Heat Treatment*, 55, 415–418. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-013-9646-0>
7. Horna, I., Yablokova, G.V., Tinkov, V.O. et al. (2010) Influence of Y on the structure and properties of cast intermetallic alloy Ti-36Al. *Suchasni Problemy Fizychnogo Materialoznavstva*, 19, 122–127.
8. Akhonyn, S.V., Severyn, A.Yu., Berezos, V.O. et al. (2020) Obtaining large-sized ingots of titanium aluminides by the EPP method. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 2, 18–22. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.03>
9. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O. et al. (2022) Producing ingots of Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr titanium aluminide by electron beam melting. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 1, 11–15 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.01.01>
10. Ovchinnikov, O.V., Akhonin, S.V., Berezos, V.O. et al. (2024) Producing advanced alloys based on titanium aluminides for modern aircraft engine manufacturing. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 1, 9–16 [in Ukrainian].

INTRODUCTION OF RARE EARTH ELEMENTS IN ELECTRON BEAM MELTING OF TITANIUM ALUMINIDE INGOTS USED FOR 5th GENERATION AIRCRAFT ENGINE BLADES

V.O. Beresos¹, O.B. Halienkova², T.O. Mitina³, A.M. Ivaniv⁴

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

²JSC «Ivchenko-Progress». 2 Ivanova Str., 69068, Zaporizhzhia, Ukraine

³JSC «Titanium Institute». 180 Sobornyyu Prosp., 69035, Zaporizhzhia, Ukraine

⁴Ukrainian State University of Science and Technology, 2 Lazaryana Str., 49010, Dnipro, Ukraine

ABSTRACT

The paper investigates the technological features of obtaining intermetallic alloys based on titanium aluminide, promising for use in gas turbine engine parts. Particular attention is paid to the use of rare earth metals, in particular yttrium, as an effective modifying additive in alloy smelting. The technological features of obtaining intermetallic alloys based on titanium aluminide, intended for use in modern aircraft engine manufacturing, are considered. The results of smelting an ingot with a diameter of 195 mm of the Ti–29Al–7Nb–2Mo system alloy by the double electron beam remelting method are presented. To form the optimal chemical composition and improve the operational characteristics, further remelting was carried out in a vacuum arc furnace with a controlled atmosphere with the introduction of yttrium modifying element. The effect of modification on the macro- and microstructure of the alloy, as well as on its mechanical properties, was studied. It has been established that the introduction of a surfactant contributes to the refinement of the grain structure and the increase in the strength of the material. 10 Ref., 2 Tabl., 2 Fig.

KEYWORDS: aluminides, titanium, electron beam melting, vacuum arc remelting, modification, yttrium, structure, mechanical properties

ORCID

В.О. Березос – <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>, О.Б. Галенкова – <https://orcid.org/0009-0008-6007-1931>, Т.О. Мітіна – <https://orcid.org/0009-0005-3254-826X>, А.М. Іванів – <https://orcid.org/0009-0006-2252-1124>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

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

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

В.О. Березос, О.Б. Галенкова, Т.О. Мітіна, А.М. Іванів (2026) Введення рідкісноземельних елементів при електронно-променевому виплавленні зливків алюмініду титану, що застосовуються для лопаток авіадвигунів 5-го покоління. *Сучасна електрометалургія*, **02**, 14–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.02.02>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Отримано 05.05.2026

Отримано у переглянутому вигляді 06.05.2026

Затверджено до друку 20.05.2026

Оприлюднено 27.05.2026

НОВА КНИГА



ЗВАРЮВАННЯ. МЕТАЛУРГІЯ. МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
Серія книг та монографій за редакцією академіка НАН України І.В. Кривцуна

Максимов С.Ю., Винничук С.Д., Прилипко О.О. Розробка технологічних основ та устаткування при застосуванні зовнішнього електромагнітного впливу при зварюванні під водою. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2025. — 128 с.

У монографії розглянуто технологічні особливості реалізації процесу зварювання із застосуванням зовнішнього електромагнітного впливу (ЗЕВ) при зварюванні під водою. Наведено математичні моделі для обчислення електродинамічних сил і вихрових струмів у рідкометалевій ванні. Розроблені моделі можуть бути застосовані для зварювання під водою та на повітрі. З урахуванням теоретичних положень зроблено вибір технологічних режимів. Запропоновано оригінальні конструкції індукторів з різними конфігураціями електромагнітних полів. Зварювання з ЗЕВ призводить до зменшення розмірів пор, які утворюються в металі швів, що покращує їх фізико-механічні характеристики. Структура матеріалу наплавлення вирізняється рівновісними зернами невисокої дисперсності. При застосуванні ЗЕВ середні значення мікротвердості в зонах наплавлення та термічного впливу зменшуються, що свідчить про покращення пластичності. Проведені дослідження підтверджують, що при зварюванні з ЗЕВ у металі зони термічного впливу не спостерігаються гартівні структури й тріщини. ЗЕВ при підводному зварюванні допомагає гомогенізувати структуру, зменшити різницю фізико-механічних властивостей як між зонами зварного з'єднання, так і між зварним з'єднанням і основним металом.