

ОТРИМАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДІВ ТИТАНУ ДЛЯ СУЧАСНОГО АВІАМОТОРОБУДУВАННЯ

О.В. Овчинников¹, С.В. Ахонін², В.О. Березос², А.Ю. Северин², О.Б. Галєнкова³, В.Г. Шевченко⁴

¹АТ «Інститут титану». 69035, м. Запоріжжя, просп. Соборний, 180. E-mail: common@timag.org

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: titan.paton@gmail.com

³ДП «Івченко-Прогрес». 69068, м. Запоріжжя, вул. Іванова, 2.

⁴Національний університет «Запорізька політехніка».

69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64. E-mail: rector@zp.edu.ua

Проведено роботи по відпрацюванню технологічної схеми отримання зливків для витратних електродів зі стабільним хімічним складом і властивостями. Представлено результати досліджень зливка діаметром 195 мм сплаву на основі алюмініду титану системи Ti–28Al–7Nb–2Mo, виготовленого шляхом подвійного електронно-променевого переплаву. Реалізовано подальший переплав зливка в дуговій печі, завдяки чому отримано однорідний та бездефектний зливоч оптиміального складу Ti–28Al–7Nb–2Mo–0,3 (Y, Re, B). Досліджено вплив модифікування на структуру та властивості. Визначено, що введення поверхнево-активних елементів сприяє подібненню структурних складових, а також підвищенню механічних властивостей сплаву. Бібліогр. 17, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: електронно-променева плавка, вакуумно-дугова плавка, зливоч, алюмінід титану, модифікування, структура, механічні властивості

Вступ. Розвиток сучасного авіамоторобудування вимагає використання нових матеріалів з підвищеними властивостями і функціональними характеристиками, що забезпечуються стабільністю хімічного складу та структури і залежать від технології отримання [1]. Технологічні аспекти, що включають в себе відпрацювання параметрів технології, повторюваність отриманих результатів і формоутворення взаємопов'язані між собою. Вплив технології на властивості авіаційних матеріалів потребує регламентації процесів, наприклад, використання вакуумно-дугового переплаву при виробництві титанових сплавів [2, 3].

До числа перспективних матеріалів для авіаційної промисловості, властивості яких залежать від параметрів технологічних процесів, відносяться сплави на основі алюмініду титану. Ці сплави є важливим класом конструкційних матеріалів з унікальним набором фізико-механічних властивостей. Інтерметалідні сплави на основі алюмінідів титану характеризуються низькою щільністю, високою жароміцністю, жаростійкістю, термічною стабільністю. Вони мають високий потенціал для заміни сплавів на основі нікелю, що призначені для експлуатації при температурах до 850 °C [4].

Жароміцні сплави на основі алюмініду титану характеризуються багатокомпонентним хімічним складом. Окремі легуючі елементи цих сплавів

суттєво відрізняються теплофізичними властивостями та щільністю. Тому необхідним є забезпечення рівномірного розподілу компонентів сплаву на номінальному рівні по всьому об'єму зливка, оскільки макросегрегації можуть призводити до виникнення різних мікроструктур і, відповідно, високої анізотропії механічних властивостей.

Промислове освоєння сплавів на основі алюмініду титану передбачає отримання якісних зливків-напівфабрикатів з рівномірним розподілом елементів й однорідною структурою зі стабільними фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками.

Механічні властивості багато в чому залежать від кінцевої формоутворюючої технології, для якої розроблений оптимальний хімічний склад.

При розробці складу сплаву необхідно орієнтуватися на особливості технологічного процесу отримання статорних і роторних деталей двигуна, таких як, наприклад, лопатки турбіни. На підприємстві «Мотор Січ» для виробництва фасонних відливок з титанових сплавів використовуються витратні електроди власного виробництва для ливарної вакуумно-дугової печі [5–7].

Для впровадження нових сплавів на основі алюмініду титану для перспективних двигунів необхідне відпрацювання усього технологічного процесу з урахуванням кінцевої формоутворюючої

О.В. Овчинников — <https://orcid.org/0000-0002-5649-1094>, 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.Б. Галєнкова — <https://orcid.org/0009-0008-6007-1931>, В.Г. Шевченко — <https://orcid.org/0000-0001-9037-6367>

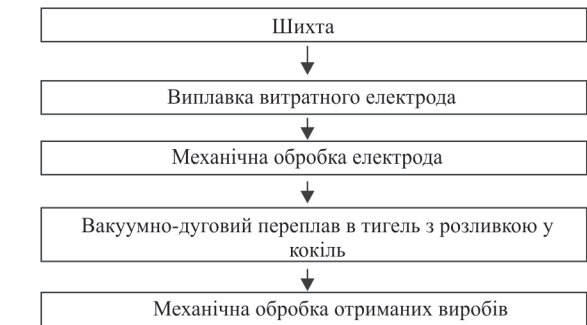


Рис. 1. Схема технологічного процесу отримання виробів з алюмініду титану

ючої технології лиття і забезпечення хімічного складу та механічних властивостей сплаву.

Маючи на увазі серійний технологічний процес лиття з витратного електрода діаметром більше 200 мм, метою роботи є отримання промислових зливоків для витратних електродів з алюмініду титану зі стабільним хімічним складом та властивостями.

Методика досліджень, устаткування і матеріали. Об’єктом досліджень обрані технологічні процеси лиття, що включали в себе операції отримання витратного електрода, переплав електрода в тигель і розливку металу з тигля в кокіль (рис. 1). В якості виробу обрана лопатка турбіни останнього ступеня, що виготовлена зі сплаву на нікелевій основі ВЖЛ12С-ВІ. З урахуванням раніше проведених досліджень [8, 9] щодо забезпечення службових властивостей обґрунтовано наступний склад сплаву на основі алюмініду титану — Ti–28Al–7Nb–2Mo–0,3 (Y, Re, B).

Для виплавки зливоків з шихти використовували добре відпрацьовані технології [10–12] отримання авіаційних матеріалів способом електронно-променевого переплаву (ЕПП) шихти на установці УЭ-208М [13] (рис. 2).

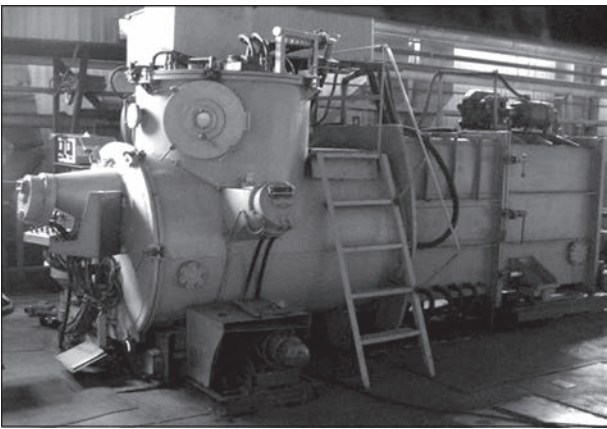


Рис. 2. Зовнішній вигляд електронно-променевої установки УЭ-208М

Для досліджень проведена плавка зливка базового складу Ti–28Al–7Nb–2Mo з використанням способу ЕПП, що давало можливість корегування хімічного складу та дошихтовки.

Стабільність хімічного складу базового сплаву досягали шляхом подвійного переплаву. При першому переплаві до сплаву вводили тугоплавкі легуючі елементи — ніобій і молібден. При другому переплаві до отриманого зливка додавали алюміній з урахуванням втрат на випаровування. Це дало змогу мінімізувати втрати алюмінію і забезпечило гарантоване розчинення тугоплавких легуючих елементів та рівномірний їх розподіл по довжині й поперечному перерізу зливка.

Виплавку зливоків проводили відповідно до розрахованих в рамках побудованих математичних моделей [14], потужностей і конфігурації нагрівання поверхні зливка в кристалізаторі.

Параметри плавки зливка діаметром 195 мм алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo наступні:

загальна потужність ЕП нагріву, кВт	60
потужність в кристалізаторі, кВт	18
швидкість плавки, кг/ч	60



Рис. 3. Шихтова заготовка (а) і процес електронно-променевої плавки (б) зливка алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo

Після завантаження шихти (рис. 3, а) установку вакуумували до залишкового тиску в камері гармат 10^{-2} Па, в камері плавки — 10^{-1} Па. Потім заготовку сплавляли в проміжну ємність до її заповнення і періодично зливали рідкий метал в мідний водоохолоджуваний кристалізатор (рис. 3, б). Першими порціями зливу формували затравку майбутнього зливка до висоти, що дорівнює внутрішньому діаметру кристалізатора, на якій, згідно з математичними розрахунками, плавка переходить у квазістаціонарний режим. На досягнутому технологічному режимі виплавляли зливки необхідної висоти.

Склад шихти для виплавки базового і модифікованого злиwkів: алюміній марки А5 за ГОСТ 11069–2001, заготовка титанова (переплав первинної шихти титану губчастого марки ТГ-100) ДСТУ 3-25-22–94; ніобій (прутки); лігатура (93 % Ti–7 % Mo); лігатури Al–Re, Al–Y, алюмобор. Лігатури отримували шляхом плавки шматочків титану губчастого та алюмінію з відповідними елементами Y, Re та B у вигляді порошоків у вакуумі в мідний кристалізатор з використанням невитратного вольфрамового електрода. Таким способом отримано лігатури із вмістом модифікуючих елементів 5, 10 та 15 % кожного, наприклад, Ti–5 % Y, Al–5 % Y, Ti–10 % Re тощо для можливості забезпечення необхідної концентрації елементів у складі дослідного сплаву.

Для отримання зливка заданого складу з модифікаторами Y, Re, B, визначення коефіцієнтів переходу легувальних елементів і моделювання процесів, що відбуваються при електронно-променевій плавці, сплав базового складу переплавляли в дуговій печі з невитратним електродом з контрольованою атмосферою (рис. 4) [15, 16].

Для визначення хімічного складу базового сплаву з виплавленого зливка відбирали проби у вигляді стружки. Зразки для аналізу відбирали з головної, середньої та донної частин зливка по його довжині. Вміст легувальних елементів визначали методом індуктивно зв'язаної плазми оптичної емісійної спектроскопії (ICP-OES) на ICP-спектроскопі ICAP 6500 DUO. Для визначення вмісту кисню, азоту, водню застосовували газоаналізатор фірми «ELTRA» з використанням зразків циліндричної форми діаметром і довжиною по 3 мм. Сутність визначення газових сумішей полягала у спалюванні вказаних зразків і визначенні об'єму газоподібних хімічних елементів, що виділилися.

Аналіз хімічного складу сплаву виконували на зразках, відібраних вздовж всієї довжини зливка, спектральним безеталонним методом на енерго-



Рис. 4. Дугова піч з невитратним електродом

дисперсійному рентгенофлюорисцентному аналізаторі «Expert 3L».

Травлення зразків для металографічних досліджень виконували в реактиві «Титан» складом $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O} = 1:2:6$.

Оцінку макроструктури темплету проводили неозброєним оком по товщині зливка. Дослідження мікроструктури матеріалу зливка виконували з використанням оптичного мікроскопу «AxioObserver 5» при збільшеннях від 25 до 200.

Проведено визначення механічних властивостей на розтяг згідно ДСТУ ISO 6892-1:2019. Зразки для випробувань вирізали в поперечному напрямку до вісі зливка.

При статистичній обробці експериментальних даних визначали дисперсію та середньоквадратичне відхилення.

Результати досліджень та їх обговорення. В результаті досліджень було отримано зливки діаметром 195 мм Ti28Al7Nb2Mo масою 106 кг (рис. 5, а). Зовнішніх грубих дефектів (поривів і незлитин) зливки не мав, поверхня задовільна з невеликими гофрами.

Для усунення дефектів ливарного походження у вигляді гофр була проведена токарна обробка поверхні злиwkів на глибину 5 мм (рис. 5, б).

Від отриманого зливка без модифікаторів було здійснено відбір проб для аналізу ICP за схемою, наведеною на рис. 6. Дані хімічного аналізу представлені у табл. 1.



Рис. 5. Зовнішній вигляд зливка базового складу до механічної обробки (а) і після (б)

Таблиця 1. Хімічний склад зливка діаметром 195 мм, мас. %

Сплав	Проба, місце відбору	Ti	Al	Nb	Mo	O	N	H
Ti–28Al–7Nb–2Mo (без модифікаторів)	1 (верх)	Основа	26,6	7,6	2,0	0,13	<0,01	<0,005
	2		27,4	7,5	—»—			
	3		27,2	—»—	2,1			
	4		31,0	7,2	1,9			
	5 (низ)		30,5	7,3	2,2			

Відхилення вмісту алюмінію в головній і донній частинах пояснюється нестационарними режимами плавки на початку і в кінці плавки при формуванні затравки та виведенні усадкової раковини відповідно. Вирівнювання вмісту по легуючих елементах і досягнення необхідного хімічного складу в подальшому передбачалось з використанням дугової печі.

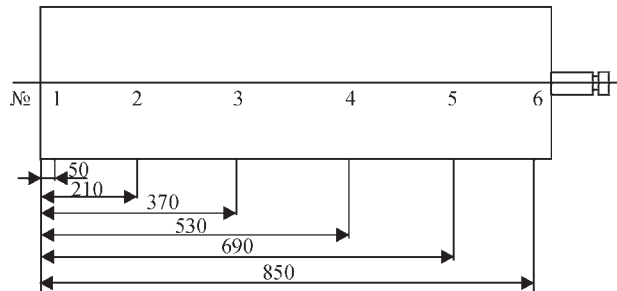


Рис. 6. Схема відбору проб (1–6) від зливка діаметром 195 мм

Для забезпечення оптимального хімічного складу від зливка діаметром 195 мм відрізали частини, що дошихтовували модифікаторами і переплавляли з використанням малосерійної печі, яка наведена на рис. 4. Вакуумно-дуговий переплав електрода виконували в графітовий тигель марки МПГ-7, а розливку металу — в кокіль (рис. 7).

Аналіз хімічного складу сплаву виконували на зразках, відібраних вздовж всієї довжини зливка з верхньої, середньої та нижньої частин (табл. 2).

У зв’язку з тим, що при виплавці титанових сплавів у графітовий тигель вміст вуглецю не перевищує допустимі межі 0,10...0,15 %, то дослідження вмісту вуглецю для експериментальної плавки не проводили.

Результати досліджень хімічного складу металу показали рівномірний розподіл легуючих елементів по довжині виплавлених зливків.



Рис. 7. Зовнішній вигляд графітових тигля (а) і кокілю (б) для вакуумно-дугового переплаву

Від зливоків відрізали поперечні темплети та виставили макрошліфи для контролю структури. Встановлено, що в зливках сформована однорідна і щільна структура. Дефектів у вигляді пор, раковин, тріщин, видимих неозброєним оком, не виявлено.

Макроструктура зливка без модифікаторів характеризується зернами, близькими до рівновісних. Величина зерна відповідає 8–9 балу 10-бальної шкали макроструктур титанових сплавів (рис. 8, а).

Макроструктура зливка з модифікаторами містить більш дрібні зерна, що відповідають 2–3 балу шкали макроструктур (рис. 8, б).

Різниці в бальності зерна в центральній частині зливка та на периферії не виявлено.

При металографічному дослідженні отриманих зливоків встановлено суттєвий вплив модифікаторів на морфологію структури сплаву. Так, мікроструктура сплаву без модифікаторів характеризувалась крупнозеренною будовою, в середині якої розташовані колонії пластин світлого і темного кольору розміром 100...350 мкм, що розорієнтовані в межах одного зерна (рис. 9, а). Сумісний вплив трьох модифікаторів у кількості 0,1% кожен призвів до отримання дрібнозеренної дуплексної ($\alpha_2+\gamma$)-структури з розмірами колоній пластинок не більше 30 мкм (рис. 9, б).

Основні механічні властивості сплаву Ti–28Al–7Nb–2Mo–0,3 (Y, Re, B) наступні: σ_b , МПа — 800...870; δ , % — 0,8...1,3.

Таблиця 2. Хімічний склад зливка з модифікаторами, мас. %

Сплав	Місце відбору проб	Ti	Al	Nb	Mo	Модифікатори		
						Y	Re	B
Ti–28Al–7Nb–2Mo–0,3 (Y, Re, B)	Верх	Основа	28,3	7,5	2,0	0,13	0,09	0,10
	Середина		28,7	7,6	1,8	0,09	0,12	—»—
	Низ		29,4	7,5	2,1	0,08	0,08	0,12

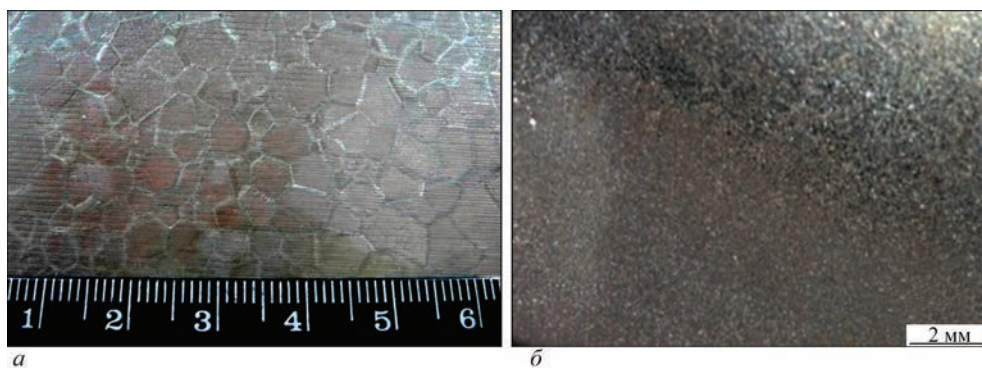


Рис. 8. Макроструктура зливків після травлення: *а* — без модифікаторів; *б* — з модифікаторами

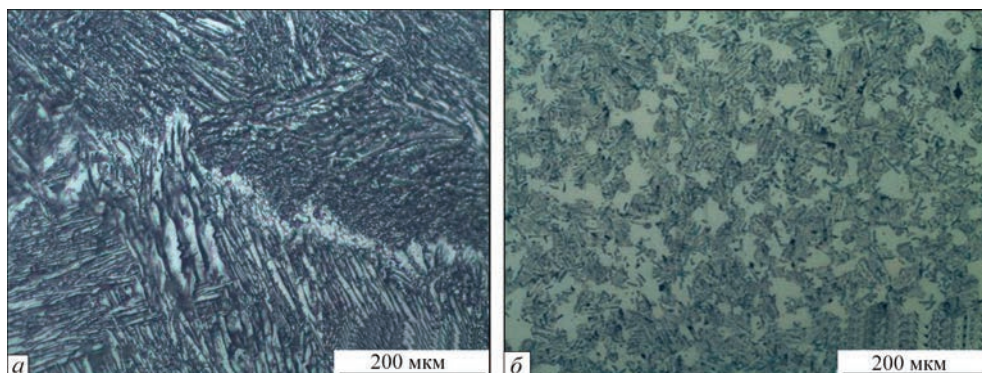


Рис. 9. Мікроструктура зливків після травлення: *а* — без модифікаторів; *б* — з модифікаторами, $\times 200$

Подрібнення зерна литої структури досягалося за рахунок введення модифікаторів Y, Re, B, які сприяють зменшенню розмірів зерна, призводять до зміни морфології фаз, рафінують границі зерен від домішок, затримують розвиток на границі поділу фаз дифузійних процесів і пригнічують процеси росту структурних складових. Це, в свою чергу, дозволило підвищити значення механічних характеристик матеріалу, зокрема міцність та пластичність.

Границя міцності дослідного сплаву складала 800...870 МПа, відносно подовження — 0,8...1,3 % при значеннях границі міцності серійного сплаву ВЖЛ12С-ВІ на рівні ≥ 830 МПа.

Таким чином, показано, що технологічний процес з встановленими режимами дає можливість отримання серійних виробів з алюмініду титану експериментального сплаву замість серійного сплаву на нікелевій основі. Зниження маси однієї лопатки з урахуванням щільності дослідного та серійного сплавів складає 34 % і є суттєвою перевагою експериментального сплаву для роторних деталей, що працюють при високих температурах.

Висновки

1. Запропонована технологічна схема виплавки зливків з алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo способом ЕПП із застосуванням визначених технологічних режимів. Використання подвійного переплаву забезпечило рівномірний розподіл тугоплавких

елементів і елементів з високою пружністю пари по довжині та перетину зливка.

2. Реалізовано подальший переплав зливка алюмініду титану в дуговій печі з контрольованою атмосферою, визначено коефіцієнти переходу легувальних елементів, отримано однорідний за хімічним складом та бездефектний зливок складу Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B).

3. В кінцевому виробі суттєво подрібнилася структура литого металу — з 8–9 до 2–3 балу зерна макроструктури. Подрібнення зерна литої структури обумовлено введенням в сплав поверхнево-активних елементів, а саме Y, Re, B. При цьому мікроструктура сплаву без модифікаторів характеризувалась крупнозеренною будовою, в середині якої розташовані колонії пластин розміром 100...350 мкм, що розорієнтовані в межах одного зерна. Сумісний вплив трьох модифікаторів у кількості 0,1 % кожного призвів до отримання дрібнозеренної дуплексної структури з розмірами колоній пластинок не більше 30 мкм.

4. Границя міцності сплаву оптимального складу становила 800...870 МПа, що в 1,7 рази більше порівняно з властивостями сплаву базового складу, і відповідала значенню границі міцності серійного сплаву ВЖЛ12С-ВІ.

5. Розрахункове зниження маси лопатки при використанні дослідного сплаву замість серійного складає 34 %, що є суттєвою перевагою експе-

риментального сплаву для роторних деталей, що працюють при високих температурах, швидкостях обертання та динамічних навантаженнях.

Список літератури

- Clemens H., Mayer S. (2016) Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications-processing, microstructure and properties. *Materials at high temperatures*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792>
- Чучурюкин А.Д. (1991) Вакуум при плавке титана. *Металловедение и обработка титановых и жаропрочных сплавов*. Москва, ВИЛС, сс. 159–163.
- Соболевская Т.Д., Гишкина В.И., Коваленко Т.А. (2009) Влияние качества титана губчатого на наличие дефектов в полуфабрикатах и деталях из титановых сплавов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **2**, 50–54.
- Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. (2011) *Gammatitaniumaluminide alloys: Science and technology*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Ивченко З.А., Лунёв В.В. (2008) Изготовление фасонных отливок и расходных электродов из титановых сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **1**, 33–36.
- Ивченко З.А., Лунёв В.В. (2010) Исследование свойств отливок, залитых электродами второго перепада сплава VT5L собственного производства. *Процессы литья*, **4**, 73–78.
- Ивченко З.А., Лунёв В.В. (2010) Изготовление расходных титановых электродов методом вакуумно-дуговой плавки из прессованных брикетов титана губчатого. *Теория и практика металлургии*, **3–4**, 21–25.
- Григоренко Г.М., Ахонин С.В., Северин А.Ю. и др. (2014) Влияние легирования бором и лантаном на структуру и свойства сплава на основе интерметаллидного соединения TiAl. *Современная электрометаллургия*, **2**, 15–20.
- Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.О. та ін. (2022) Отримання зливок алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr способом електронно-променевої плавки. *Сучасна електрометалургія*, **1**, 11–15. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.01.01>
- Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.О. та ін. (2020) Одержання великогабаритних зливок алюмінідів титану способом ЕПП. *Сучасна електрометалургія*, **2**, 18–22. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.03>
- Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А. (2015) Разработка технологии введения тугоплавких легирующих элементов в сплавы на основе интерметаллида Ti₂AlNb при электронно-лучевой плавке. *Современная электрометаллургия*, **3**, 12–15.
- Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.О. (2022) Математичне моделювання процесів випаровування при ЕПП сплавів на основі алюмініду титану системи легування Ti–Al–Nb–Cr–Mo. *Сучасна електрометалургія*, **2**, 10–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.02>
- Ахонин С.В., Пикулин А.Н., Березос В.А. и др. (2019) Лабораторная электронно-лучевая установка УЭ-208М. *Современная электрометаллургия*, **3**, 15–22. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.03.03>
- Ахонин С.В., Гориславец Ю.М., Глухенький О.І. та ін. (2019) Моделювання гідродинамічних і теплових процесів у кристалізаторі при електронно-променевої плавці з проміжною ємністю. *Сучасна електрометалургія*, **4**, 9–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.04.02>
- Овчинников А.В., Теслевич С.М., Тизенберг Д.Л., Ефанов В.С. (2019) Технология выплавки слитков кобальтового сплава способом дугового переплава. *Современная электрометаллургия*, **1**, 23–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.01.03>
- Овчинников О.В., Капустян О.С. (2020) Технология выплавки зливок цирконієвого сплаву способом вакуумно-дугового переплава з невитратним електродом у гарнісажній печі. *Сучасна електрометалургія*, **4**, 32–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.06>
- Фирстов С.А., Горная И.Д., Подрезов Ю.Н. и др. (2018) Свойства сплавов на основе алюминидов титана γ-TiAl/α₂-Ti₃Al при комплексном легировании. *Современная электрометаллургия*, **3**, 32–38. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.03.05>

References

- Clemens, H., Mayer, S. (2016) Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications — processing, microstructure and properties. *Mater. High Temp.*, **33**, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792>
- Chuchuryukin, A.D. (1991) Vacuum in titanium melting. In: *Physical metallurgy and processing of titanium and heat-resistant alloys*. Moscow, VILS, 159–163 [in Russian].
- Sobolevskaya, T.D., Gishkina, V.I., Kovalenko, T.A. (2009) Influence of sponge titanium quality on presence of defects in semi-finished products and parts from titanium alloys. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metalurgii ta Mashynobuduvanni*, **2**, 50–54 [in Russian].
- Appel, F., Paul, J.D.H., Oehring, M. (2011) *Gammatitaniumaluminide alloys: Science and Technology*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Ivchenko, Z.A., Lunyov, V.V. (2008) Manufacture of shaped castings and consumable electrodes from titanium alloys. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **1**, 33–36 [in Russian].
- Ivchenko, Z.A., Lunyov, V.V. (2010) Investigation of properties of castings produced by second remelting electrodes of VT5L alloy of domestic manufacture. *Protsessy Litya*, **4**, 73–78 [in Russian].
- Ivchenko, Z.A., Lunyov, V.V. (2010) Manufacture of consumable titanium electrodes by vacuum-arc melting from sponge titanium extruded briquettes. *Teoriya i Praktika Metallurgii*, **3–4**, 21–25 [in Russian].
- Grigorenko, G.M., Akhonin, S.V., Severin, A.Yu. et al. (2014) Effect of alloying with boron and lanthanum on structure and properties of alloy on base of intermetallic compound TiAl. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 15–20 [in Russian].
- 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 Elektrometal.*, **1**, 11–15 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.01.01>
- Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O. et al. (2020) Producing large-sized ingots of titanium aluminides by EBM method. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 18–22 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.03>
- Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O. (2015) Development of technology of adding the refractory alloying elements into alloys on the base of Ti₂AlNb intermetallic in electron beam melting. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 12–15 [in Russian].
- Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O. (2022) Mathematical modeling of evaporation processes at EBM of alloys based on titanium aluminide of Ti–Al–Nb–Cr–Mo alloying system. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 10–16 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.02>

13. Akhonin, S.V., Pikulin, A.N., Berezos, V.A. et al. (2019) Laboratory electron beam unit UE-208M. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 15–22 [in Russian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.03.03>
14. Akhonin, S.V., Gorislavets, Yu.M., Glukhenkiy, A.I. et al. (2019) Modeling hydrodynamic and thermal processes in the mould in cold-hearth electron beam melting. *Suchasna Elektrometal.*, **4**, 9–17 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.04.02>
15. Ovchinnikov, A.V., Teslevich, S.M., Tizenberg, D.L., Efانov, V.S. (2019) Technology of melting ingots of cobalt alloy by the arc remelting method. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 23–27 [in Russian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.01.03>
16. Ovchynnykov, O.V., Kapustian, O.E. (2020) Technology for smelting zirconium alloy ingots by vacuum arc remelting with a non-consumable electrode in a skull furnace. *Suchasna Elektrometal.*, **4**, 32–38 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.06>
17. Firstov, S.A., Gornaya, I.D., Podrezov, Yu.N. et al. (2018) Properties of alloys on titanium aluminide γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al base at complex alloying. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 32–38 [in Russian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.03.05>

PRODUCING ADVANCED ALLOYS BASED ON TITANIUM ALUMINIDES FOR MODERN AIRCRAFT ENGINE MANUFACTURING

O.V. Ovchinnikov¹, S.V. Akhonin², V.O. Beresos², A.Yu. Severin², O.B. Galenkova³, V.G. Shevchenko⁴

¹JSC «Titanium Institute». 180 Sobornyy Prosyp., 69035, Zaporizhzhia. E-mail: common@timag.org

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

³SE «Ivchenko-Progress». 2 Ivanova Str., 69068, Zaporizhzhia, Ukraine.

⁴Zaporizhzhia Polytechnic National University.

64 Zhukovskoho str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: rector@zp.edu.ua

Work has been performed on optimization of the technological scheme of producing ingots for consumable electrodes with a stable chemical composition and properties. The paper presents the results of studying an ingot of 195 mm diameter from a titanium aluminide-based alloy of Ti–28Al–7Nb–2Mo system, made by double electron beam remelting. Further ingot remelting in the arc furnace was performed, which allowed producing a homogeneous and defectfree ingot of an optimal composition of Ti–28Al–7Nb–2Mo–0.3 (Y, Re, B). The influence of modifying on the structure and properties was studied. It was determined that addition of surfactants promotes refining of the structural components and improvement of the alloy mechanical properties. 17 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: electron beam melting, vacuum-arc melting, ingot, titanium aluminide, modifying, structure, mechanical properties

Отримано 22.12.2023

Отримано у переглянутому вигляді 16.01.2024

Прийнято 23.02.2024

НАНОЗВАРЮВАННЯ

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблена технологія отримання методом високошвидкісного електронно-променевого осадження у вакуумі наношаруватих фольг, які складаються з шарів різних металів (Ti/Al, Al/Ni, Al/Si, Ti/Cu та ін.) товщиною 10...100 нм. Використання таких наношаруватих фольг в якості проміжних прошарків забезпечує формування якісних нероз'ємних з'єднань матеріалів, що важко зварюються, таких, як інтерметаліди, метал-



Установка UE-204

матричні композити та різномірні матеріали. В зарубіжній літературі такий процес з'єднання матеріалів через наношаруваті фольги отримав назву «нанозварювання». У випадку зварювання в твердій фазі введення в зону з'єднання такої фольги сприяє встановленню фізичного контакту між поверхнями, що з'єднуються, при менших температурно-силових параметрах, а у випадку формування з'єднання через рідку фазу — зниження температури та часу витримки. В результаті швидкого протікання дифузійних процесів в зоні з'єднання забезпечується зниження впливу процесу зварювання на структуру матеріалу, що з'єднується, а за рахунок малої товщини фольги (20...50 мкм) зона з'єднання стає співрозмірною з розміром зерна. На основі встановлених закономірностей поведінки наношаруватої фольги в зоні

з'єднання запропонована технологія «нанозварювання» матеріалів, яка передбачає вибір оптимальної структури наношаруватої фольги та параметрів процесу з'єднання [1–7].

1. Ustinov A.I., Falchenko Yu.V., Ishchenko A.Ya. et al. (2008) Diffusion welding of γ -TiAl based alloys through using nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **16**, 1043–1045.
2. Патон Б.Є., Устінів А.І., Іщенко А.Я. та ін. (2009) *Спосіб дифузійного з'єднання металевих деталей через прошарок*. Україна, Пат. 87053.
3. Устинов А.И., Мельниченко Т.В., Шишкин А.Е. (2011) Деформационное поведение многослойных фольг Al/Cu при нагреве в условиях постоянно действующих внешних нагрузок. *Металлофизика и новейшие технологии*, **33(10)**, 1415–1423.
4. Запорожец Т.В., Гусак А.М., Устинов А.И. (2011) Условия распространения фронта реакции СВС в нанослойных фольгах, контактирующих с теплопроводящим материалом. *Автомат. сварка*, **8**, 43–47.
5. Ustinov A., Falchenko Yu., Melnichenko T. et al. (2013) Diffusion welding of aluminium alloy strengthened by Al₂O₃ particles through an Al/Cu multi-layer foil. *J. of Materials Processing Technology*, **213(4)**, 543–552.
6. Ustinov A.I., Kuzmenko D.N., Kravchuk M.V., Korol Ya.D. (2015) Initiation of thermal explosion in Ti/Al nanofolios. *Inter. J. of SHS*, **24(2)**, 72–77.
7. Ren H.S., Ren X.Y., Xiong H.P. et al. (2019) Nano-diffusion bonding of Ti₂AlNb to Ni-based superalloy. *Materials Characterisation*, **155**, 109813.