

ОТРИМАННЯ ЗЛИВКІВ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

С.В. Ахонін, А.Ю. Северин, В.О. Березос, О.М. Пікулін, О.Г. Єрохін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Досліджено можливість отримання способом електронно-променевої плавки зливків алюмініду титану системи Ti–Al, додатково легованих тугоплавкими елементами — ніобієм, хромом та молібденом. Розроблено способи введення тугоплавких елементів та розраховані технологічні режими, що дозволяють мінімізувати випаровування легуючих елементів під час плавки. Проведено дослідну плавку зливка інтерметалідного сплаву Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr на електронно-променевої установці УЕ-121. Одержано зливки діаметром 200 мм та досліджено його якість, структуру та механічні властивості. Бібліогр. 11, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: електронно-променева плавка; інтерметаліди; зливки; хімічний склад; структура; механічні властивості; жароміцність

Вступ. Сучасний розвиток авіабудівної галузі вимагає використання нових класів матеріалів. Сьогодні до числа найбільш перспективних для авіакосмічної і двигунобудівної областей промисловості відносяться інтерметалідні сплави на основі системи Ti–Al з робочими температурами вище 650 °С, що мають високі показники жароміцних властивостей. Використання сплавів на основі інтерметалідів титану для виготовлення лопаток турбін, а також деталей гарячого газового тракту (камери згорання, дифузори, вихлопні системи) газотурбінних двигунів авіаційного та іншого призначень дозволить підвищити робочу температуру ГТД на 100...150 °С, зменшити вагу двигуна на 20...40 % та підвищити ресурс двигуна у 2...3 рази [1–5].

На теперішній час на підприємствах України освоєно виробництво лопаток газотурбінних двигунів з титанових сплавів способами фасонного лиття в вакуумно-дугових печах. Це ж обладнання може бути використане для виробництва виробів з інтерметалідних сплавів на основі алюмініду титану. Але в ливарних вакуумно-дугових печах різних типів діаметр витратного електрода складає від 200 до 350 мм, що обумовлює необхідність створення виробництва зливків інтерметалідів на основі алюмініду титану таких діаметрів [6–8].

Матеріали та способи досліджень. На електронно-променевої установці УЕ-121 проведено дослід з одержання зливка діаметром 200 мм інтерметалідного складного левоаного сплаву Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr. Зливки піддавали подвійному електронно-променевому перепау. При першому перепау до сплаву вводили тугоплавкі

легуючі елементи (ніобій, хром та молібден), а при другому — алюміній, що дозволило мінімізувати втрати алюмінію на випаровування і забезпечило гарантоване розчинення тугоплавких легуючих елементів та рівномірний їх розподіл по довжині та поперечному перерізу зливка [9].

При виплаві зливка шихтову заготовку для першого перепау готували наступним чином: у невитратний короб рівномірно вкладали титанову заготовку та легуючі елементи з пружністю пари нижчою за пружність пари титану — ніобій, молібден і хром. Титанова заготовка являла собою мірний компактний зливки, отриманий з титанової губки марки ТГ-110. Використання титанової заготовки у вигляді зливка-сляба було обумовлено тим, що для виплаві зливків алюмінідів титану заданого хімічного складу необхідна однорідна за хімічним складом шихтова заготовка.

Перший перепау здійснювали на технологічному режимі, який забезпечував повне розчинення тугоплавких елементів сплаву. На цьому стаціонарному режимі виплаляли зливки необхідного розміру (рис. 1, а).

Для другого перепау шихтову заготовку формували у невитратний короб, у який вкладали зливки-заготовку першого перепау та легуючий елемент з пружністю пари вищою за пружність пари титану — алюміній марки А7 з урахуванням втрат на випаровування. На підставі математичних розрахунків визначено режими електронно-променевої плавки, які дозволяють мінімізувати випаровування легколетючих елементів сплаву [10]. Виплаву зливка здійснювали відповідно до роз-

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>,
В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>, О.М. Пікулін — <https://orcid.org/0000-0001-6327-3848>,
О.Г. Єрохін — <https://orcid.org/0000-0003-2105-5783>

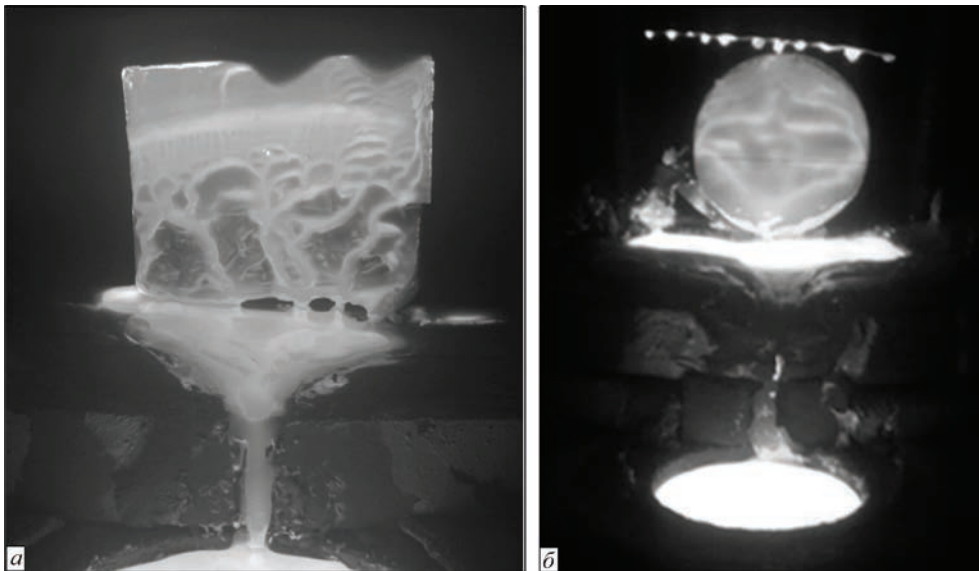


Рис. 1. Процес першого (а) та другого (б) переплаву зливка алюмініду титану Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr способом ЕПП



Рис. 2. Злинок ЕПП діаметром 200 мм алюмініду титану Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr

рахованих потужностей і конфігурації нагрівання торця зливка в кристалізаторі. Процес другого переплаву показано на рис. 1, б.

Параметри плавки зливків алюмініду титану Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr діаметром 200 мм

Загальна потужність ЕП нагріву, кВт	145
Потужність в кристалізаторі, кВт	55
Швидкість плавки, кг/год.	105
Питома витрата електроенергії (без урахування вакуумної системи), кВт·год/кг	1,4

На рис. 2 представлено злинок алюмініду титану Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr діаметром 200 мм. Досліджено якість отриманого зливка. Проведено

відбір проб вздовж зливка на глибині 10 мм від поверхні. Досліджували три зони — верхню, нижню і середню зливка. Вміст легуючих елементів сплаву визначали способом індуктивно зв’язаної плазми оптичної емісійної спектроскопії (ICP-OES) на ICP-спектрометрі ICAP 6500 DUO. Результати досліджень хімічного складу металу показали достатньо рівномірний розподіл легуючих елементів по довжині зливка (табл. 1).

Від зливка були відрізані зразки та виготовлені поперечні темплеті для вивчення макроструктури. Порізки темплетів проводили на малих швидкостях з метою запобігання руйнуванню зразків при виготовленні. Макроструктуру зливків виявлено шляхом травлення відрізаних темплетів водним розчином кислот 2 % HNO₃ + 2 % HF. Визначено, що у зливках формується щільна однорідна макроструктура, яка не має дефектів у вигляді пор, раковин, тріщин, розшарувань, видимих неозброєним оком. Відсутні металеві та неметалеві включення, а також зональна ліквіація. Макроструктура сплаву Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr характеризується зернами, близькими до рівноосних (рис. 3). Величина зерна, що визначається за 10-бальною шкалою макроструктур Інструкції № 1054-76 ВІАМ, відповідає 8–9 балам (присутні ділянки з балом зерна 6–7). Істотної різниці у характері кристалізації по довжині зливка не спостерігається.

Проведено дослідження мікроструктури металу сплаву Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr. Мікрострук-

Таблиця 1. Хімічний склад зливка алюмініду титану Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr діаметром 200 мм, отриманого способом ЕПП, мас. %

Сплав	Місце відбору зразків в зливку	Al	Nb	Mo	Cr	Ti
Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr	Голова (1)	27,6	7,6	2,0	1,5	Основа
	Середина (2)	28,7	7,5	2,1	1,8	
	Дно (3)	29,5	7,2	2,2	1,7	

тура металу середньої зони зливка показана на рис. 4. Вона складається з матричної світлої γ -фази, що чергується з ділянками двофазної ламельної ($\gamma+\alpha_2$)-структури з товщиною ламелей близько 1 мкм, та темної фази, яка утворює сітчастий візерунок на тлі матриці з товщиною фази від 1 до 5 мкм, ймовірно кубічної В2-фази. У середній зоні зливка структура темної фази відрізняється тим, що лінійна фаза утворює ніби сітчасту структуру з різною величиною сіток від 30 до 100 мкм (рис. 4, а), іноді на тлі ламелярної структури (рис. 4, б) з подвійним ламелям (рис. 4, в). Місцями спостерігається світла фаза, яка містить інші частинки (рис. 4, б). Фаза, що утворює сітчасту структуру, включає як прямолінійні, так і криволінійні ділянки (рис. 4, в) і виглядає темною або світлою (рис. 4, з). Часто такі частинки мають поперечну субструктуру (рис. 4, д). Дисперсні виділення розташовуються як на фоні матричної фази (рис. 4, з), так і декорують інші компоненти структури: межі зерен, ламеле-

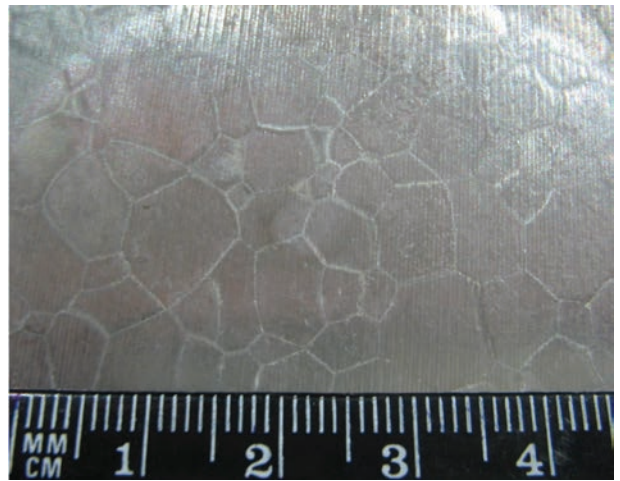


Рис. 3. Макроструктура поперечного перерізу зливка алюмініду титану Ti–Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr діаметром 200 мм (рис. 4, в). Товщина лінійної фази, що утворює сітку, коливається від 1 до 5 мкм (рис. 4, д).

Випробування зразків на стиск проводили по ГОСТ 8817–82 і ГОСТ 25.503–97. На практиці

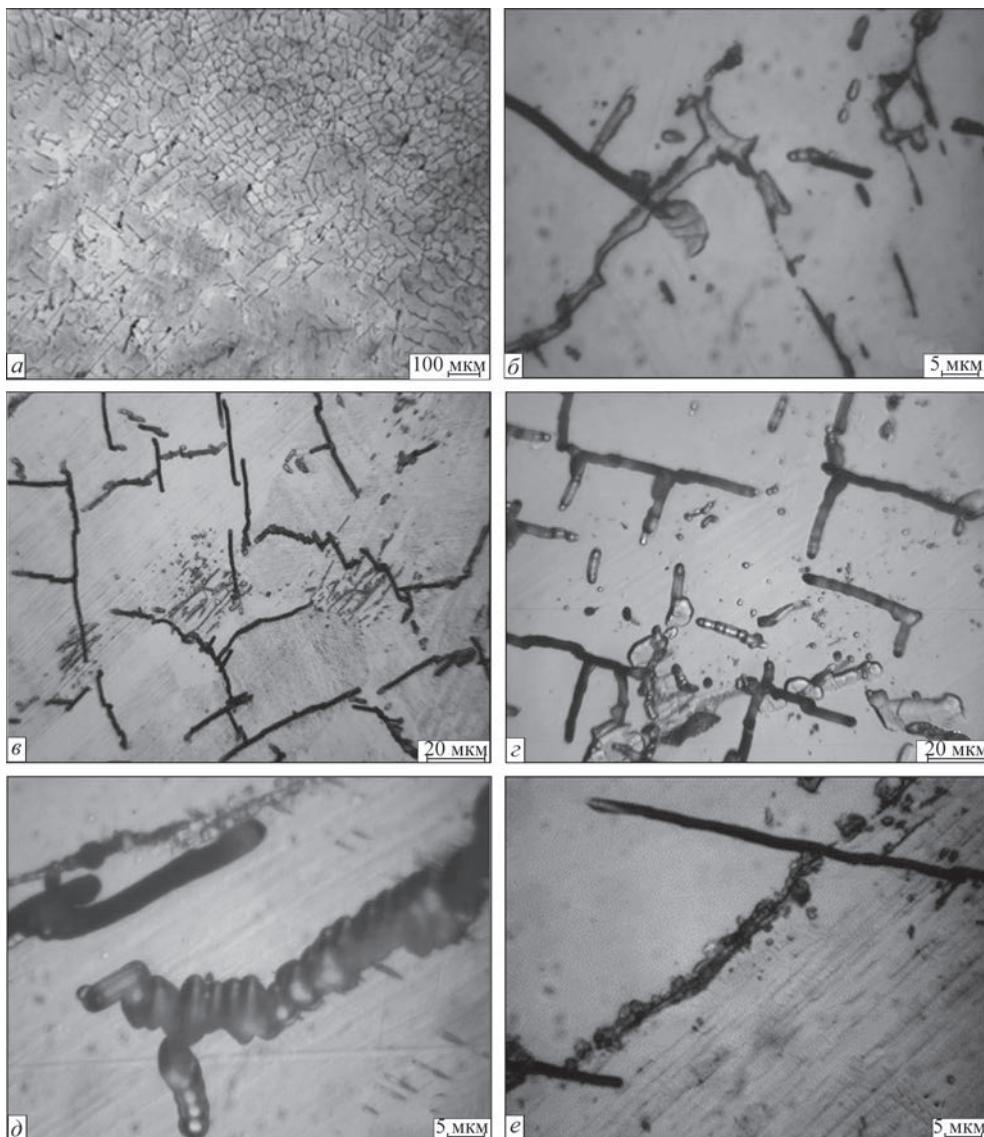


Рис. 4. Мікроструктура зразків зливка алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr діаметром 200 мм

Таблиця 2. Результати механічних випробувань на стиск зразків сплаву Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr

Зразок	Розмір зразка, мм			Температура випробувань (T), °C	Швидкість навантаження (V), мм/хв	Навантаження (P ₀₂), кг	Межа плинності (σ ₀₂), МПа
	a	b	h				
3	1,99	1,99	2,02	700	0,5	414,2	010
1	3,95	3,97	3,97	800	→→	1033,6	646
2	→→	→→	→→	900	→→	921,9	576

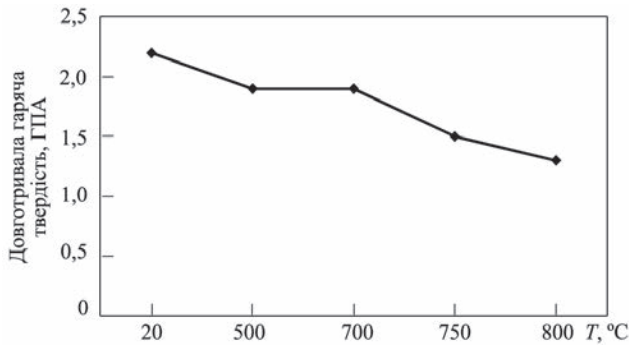


Рис. 5. Залежність довготривалої гарячої твердості від температури для сплаву Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr в литому стані

в якості основних стандартних способів випробувань для визначення механічних властивостей металів в умовах деформації застосовуються випробування на розтягнення, вигин, крутіння і стиснення. При дослідженні зразків матеріалів, що мають порівняно малі геометричні розміри, випробування на стиск є кращими, найбільш точними і інформативними.

Дослідження механічних властивостей сплаву Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr показали, що руйнування матеріалу відбувається близько до межі текучості при 700 і 800 °C. При 900 °C є значна деформація (10...12 %). При 700 та 800 °C пластичність матеріалу складає близько 2 %. Вказане значення напруги у всіх випадках відповідає межі плинності (σ₀₂). Дослідження механічних властивостей на стиск показали хороші показники міцності (до температури 900 °C) (табл. 2). При цьому спостерігалось істотне підвищення пластичності матеріалу з 1...2 до 12 %.

Жароміцність сплавів оцінювали способом виміру твердості матеріалу в інтервалі температур 20...900 °C. Способ гарячої твердості використовується для експрес оцінки жароміцності сплавів. При використанні даного способу у дослідних зразках не утворюються напруги розтягу, тому для крихких матеріалів цей спосіб дає зовсім інші результати, ніж випробування на розтягування. Таким чином, зразок з максимальною жароміцністю той, який має максимальну твердість (HV) при заданій температурі [11].

Довготривалу гарячу твердість визначали на підставі результатів вимірювання діагоналі відбитка алмазної піраміди Віккерса після охолодження

зразка, що індентується. Індентування проводили у вакуумі 10⁻⁵ мм рт. ст. при навантаженні 10 Н. Нагрівання в робочій камері здійснювали молібденовим стрічковим нагрівачем. Температуру вимірювали платино-платинородієвою термопарою з використанням постійного струму.

На рис. 5 представлена залежність довготривалої гарячої твердості від температури для сплаву Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr в литому стані.

Проведені дослідження жароміцності литого сплаву Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr показали зниження значень гарячої твердості в інтервалі температур 20...800 °C з 2,2 до 1,4 ГПа.

Висновки

1. Запропоновано схему виплавки зливків інтерметалідних сплавів, легованих тугоплавкими елементами, суть якої полягає в тому, що при першому переplаві сплавляються тугоплавкі компоненти сплаву та його основа — титан, а вже при другому переplаві додається легуючий елемент з високою пружністю пари — алюміній.

2. Визначено, що в отриманому способом ЕПП зливку діаметром 200 мм сплаву Ti-29Al-7Nb-2Cr-2Mo формується щільна однорідна структура, при цьому відсутні металеві та неметалеві включення, а також зональна ліквіація, структура представлена зернами, близькими до рівновісних, величина зерна відповідає 8-9 балам згідно інструкції № 1054-76 ВІАМ, ділянки з грубою стовпчастою структурою відсутні, істотної різниці у характері кристалізації по довжині зливка не спостерігається.

3. Мікроструктура зливка ЕПП алюмініду титану Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr складається з матричної світлої γ-фази, що чергується з ділянками двофазної ламельної (γ+α₂)-структури з товщиною ламелей близько 1 мкм, та темної фази, яка утворює сітчастий візерунок на тлі матриці з товщиною фази від 1 до 5 мкм, ймовірно кубічної γ₂-фази.

4. Дослідження механічних властивостей на стиск литого сплаву Ti-28Al-7Nb-2Mo-2Cr показали хороші показники міцності (до температури 900 °C), при цьому відбувається зниження межі плинності (σ₀₂) з 1010 МПа при 700 °C до 576 МПа при 900 °C та підвищення пластичності з 2 % при 700 і 800 °C до 12 % при 900 °C.

4. Проведені оцінки жароміцності литого металу ЕПП сплаву алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr показали високі значення жароміцності отриманого сплаву в діапазоні температур 500...700 °С, зафіксовано зниження значень гарячої твердості в інтервалі температур 700...800 °С з 1,9 до 1,4 ГПа. Підвищення значень показників жароміцності можливо при проведенні додаткової деформаційної та термічної обробки.

Список літератури

1. Appel F., Ohring M., Paul J.D.H. et al. (2001) Proc. of 2nd Intern. Symp. on Structural Intermetallics. *The Minerals, Metals & Mater Soc.*, 63–72.
2. Peters M., Leyens C. (2003) *Titanium and titanium alloys*. Wiley–VCH, Weinheim, Germany.
3. Павлинич С.П., Зайцев М.В. (2018) Применение интерметаллидных титановых сплавов при литье узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений. *Вестник УГАТУ*, 15(4), 200–202.
4. Анташов В.Г., Ночовная Н.А., Иванов В.И. (2002) Тенденция развития жаропрочных титановых сплавов для авиадвигателестроения. *Технология легких сплавов*, 4, 72–76.
5. Куликовский Р.А., Пахолка С.Н., Павленко Д.В. (2015) Перспективы промышленного применения алюминидов титана в авиадвигателестроении. *Строительство, материаловедение, машиностроение*, 80, 369–372.
6. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. (2014) Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана. *Авиационные материалы и технологии*, 2, 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
7. Guther V., Chatterjee A., Kettner H. (2003) Status and prospects of gamma-TiAl ingot production. *Gamma Titanium Aluminides 2003, Clements, Kim, Rosenberger*. TMS, 241–247.
8. Мусатов М.И., Фридман А.И. (1993) Технологические схемы производства слитков из титановых сплавов с использованием гарнисажной плавки. *Титан*, 1, 35–38.
9. 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.

10. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А. та ін. (2020) Одержання великогабаритних зливків алюмінідів титану способом ЕПП. *Сучасна електрометалургія*, 2, 18–22.
11. Поварова К.Б. и др. (2003) Экспрессная оценка жаропрочности литейных сплавов на основе TiAl. *Металлы*, 1, 91–98.

References

1. Appel, F., Ohring, M., Paul, J.D.H. et al. (2001) Proc. of 2nd Intern. Symp. on Structural Intermetallics. *The Minerals, Metals & Mater. Soc.*, 63–72.
2. Peters, M., Leyens, C. (2003) *Titanium and titanium alloys*. Wiley–VCH, Weinheim, Germany.
3. Pavlinich, S.P., Zaitsev, M.V. (2018) Application of intermetallic titanium alloys in casting of assemblies and GTE blades with lightweight heat-resistant structures for aircraft engines of new generation. *Vestnik UGATU*, 4, 200–202 [in Russian].
4. Antashov, V.G., Nochovnaya, N.A. Ivanov, V.I., (2002) Tendency of development of heat-resistant titanium alloys for aircraft engine construction. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 4, 72–76 [in Russian].
5. Kulikovskiy, R.A., Pakholka, S.N., Pavlenko, D.V. (2015) Prospects of commercial application of titanium aluminides in aircraft engine construction. *Stroitelstvo, Materialovedenie, Mashinostroenie*, 80, 369–372 [in Russian].
6. Kablov, D.E., Panin, P.V., Shiryaev, A.A., Nochovnaya, N.A. (2014) Experience of use of vacuum-arc furnace ALD VAR L200 for melting of heat-resistant alloy ingots based on titanium aluminide. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*, 2, 27–33 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
7. Guther, V., Chatterjee, A., Kettner, H. (2003) Status and prospects of gamma-TiAl ingot production. *Gamma Titanium Aluminides 2003, Clements, Kim, Rosenberger*. TMS, 241–247.
8. Musatov, M.I., Fridman, A.I. (1993) Technological schemes of production of titanium alloy ingots using skull melting. *Titan*, 1, 35–38 [in Russian].
9. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Beresov, V.A. (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].
10. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Beresov, V.A. et al. (2020) Producing large-sized ingots of titanium aluminides by EBM method. *Suchasna Elektrometal.*, 2, 18–22 [in Russian].
11. Povarova, K.B. et al. (2003) Express evaluation of heat-resistance of cast alloys based on TiAl. *Metally*, 1, 91–98 [in Russian].

PRODUCING INGOTS OF Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr TITANIUM ALUMINIDE BY ELECTRON BEAM MELTING

S.V. Akhonin, A.Yu. Severin, V.O. Beresov, O.M. Pikulin, O.G. Erokhin
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The possibility of producing by electron beam melting the ingots of titanium aluminide of Ti–Al system, additionally alloyed by refractory elements, namely niobium, chromium and molybdenum, was studied. A procedure of adding the refractory elements was developed, and technological modes were calculated, which allow optimizing the alloying element evaporation during melting. Test melting of Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr intermetallic alloy was conducted in UE-121 electron beam unit. An ingot of 200 mm diameter was produced and its quality, structure and mechanical properties were studied. Ref. 11, Tabl. 2, Fig. 5.

Key words: electron beam melting; intermetallics; ingot; chemical composition; structure; mechanical properties; high-temperature strength

Надійшла до редакції 24.01.2022