

ОДЕРЖАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЗЛИВКІВ АЛЮМІНІДІВ ТИТАНУ СПОСОБОМ ЕПП

С.В. Ахонін¹, А.Ю. Северин¹, В.О. Березос¹, О.М. Пікулін¹,
О.І. Глухенький², О.І. Бондар²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, просп. Перемоги, 56. E-mail: gai56@ied.org.ua

В рамках математичної моделі кристалізації циліндричних зливків при електронно-променевої плавці проведено розрахунки для зливка діаметром 300 мм інтерметаліду системи Ti–Al. В результаті розрахунків отримано поля температур в зливку під час електронно-променевого плавлення та визначено технологічні режими ведення процесу. За допомогою визначених технологічних режимів на електронно-променевої установці UE-121 одержано крупногабаритний зливоч діаметром 300 мм сплаву Ti29Al. Досліджено якість даного зливка та показано, що застосування оптимізованих технологічних режимів дозволяє отримувати однорідні за хімічним складом та бездефектні великогабаритні зливки алюмінідів титану. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: електронно-променева плавка; інтерметалід системи Ti–Al; математична модель; зливоч; хімічний склад; структура

Актуальність та ціль роботи. Одним з найперспективніших напрямів, які розвиваються у світі в області нових металевих матеріалів з високим рівнем жароміцності, жаростійкості і термічної стабільності є створення інтерметалідних сплавів системи Ti–Al і технології їх отримання. Застосування інтерметалідних сплавів системи Ti–Al в авіаційній промисловості дозволяє підвищити потужності авіаційних двигунів на одиницю маси [1–3]. Тому ці сплави складають серйозну конкуренцію сплавам на основі нікелю [4], оскільки по деяким характеристикам, а саме по своїй питомій міцності в інтервалі температур 600...900 °С, вони перевершують показники нікелевих сплавів [5].

Освоєння технології отримання напівфабрикатів та виробів із нових матеріалів у промислових умовах вимагає розробки і впровадження принципово нових технологій і обладнання для виплавки зливків, виготовлення деформованих напівфабрикатів (точних штамповок, листів і фольги), спеціалізованого обладнання для виробництва габаритних заготовок. Високонадійні компоненти можна виготовляти тільки в тому випадку, коли розроблені технології забезпечують отримання матеріалу, що не містить дефектів та не має істотних мікроструктурних і хімічних неоднорідностей. При виробництві сплавів на основі алюмініду титану надзвичайно важливо забезпечити хімічну однорідність одержуваного зливка, особливо по алюмінію. Крім того важливо, щоб середнє значення вмісту алюмінію в зливку відповідало номінальному значенню. Якщо відхилення вмісту

алюмінію від номінального значення перевищує допустимий, можуть виникати мікроструктури з різними розмірами пластинчастих колоній та різним співвідношенням фаз, які мають досить різні механічні властивості [6].

На сьогоднішній день у світі існує потреба у отриманні листових заготовок довжиною до 6-ти метрів з інтерметалідів системи Ti–Al, наприклад, для виготовлення елементів крила. Однак існуючі можливості виробництва зливків алюмінідів титану у світі не можуть задовольнити потреби щодо необхідних розмірів заготовки для подальшої деформації. Тому виникає потреба у зливках інтерметалідів Ti–Al великої ваги.

Спроби отримання великогабаритних зливків алюмінідів титану традиційними для титанових сплавів процесами не дають позитивних результатів. При підвищенні діаметру зливка при його виплавці утворюється глибока рідка ванна, яка призводить до сильної ліквіації легуючих елементів, в нашому випадку алюмінію, та також викликає високий рівень напружень зливка, що може призвести до утворення тріщин [7, 8].

Тому при виплавці зливків великих діаметрів потрібно забезпечити такі технологічні режими плавки, при яких глибина рідкої ванни, швидкості кристалізації і охолодження зливка не перевищують деяку критичну величину, при перевищенні якої можливе виникнення дефектів зливків. Значення теплопровідності, теплоємності та щільності сплавів на основі титану такі, що їх теплопровідність є однією з найбільш важливих

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.І. Глухенький — <https://orcid.org/0000-0001-5053-5677>, О.І. Бондар — <https://orcid.org/0000-0002-1678-8862>

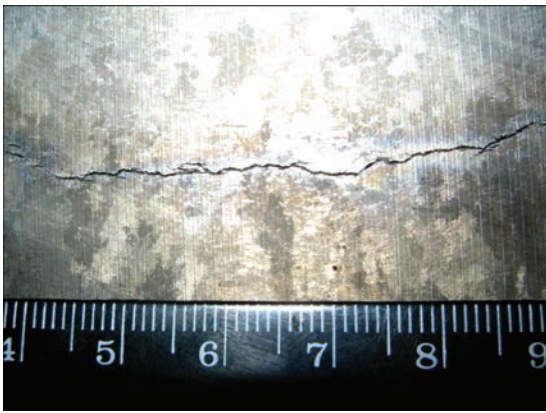


Рис. 1. Кільцева тріщина в зливку ЕПП Ti29Al діаметром 300 мм

характеристик багатьох процесів теплообміну і становить приблизно в 3,5 рази менше, ніж у сталей [9]. Наслідком цього є значні перепади температур по перетину зливоків при нагріванні і виникнення значних термічних напруг, які можуть призводити до утворення тріщин. Крім того в осевій зоні великого зливка можуть спостерігатися внутрішні гарячі тріщини, які обумовлюються високим рівнем внутрішніх усадкових напружень, що виникають в зливку, і розвитком осевої хімічної неоднорідності. Тому зниження градієнтів температури під час процесу виплавки є дієвим заходом зменшення вірогідності виникнення тріщин в зливках [8].

Від якості одержаного зливку в значній мірі залежать властивості напівфабрикатів та готових виробів. Виплавка хімічно однорідних зливоків інтерметалідних титанових сплавів представляє собою нетривіальну технологічну задачу, яка ускладнюється цілим рядом факторів як фізичної (різні температури плавлення та щільності компонентів), так і термодинамічної природи (нонваріантні перетворення) [10].

На даний час перспективним способом по отриманню зливоків алюмінідів титану є спосіб електронно-променевої плавки, в якій використовується поверхневе концентроване джерело нагріву — електронний промінь. Електронно-променева плавка дозволяє зменшувати ліквідаційні процеси за рахунок регулювання глибини рідкої ванни. Крім того часткове зняття напруженого стану зливоків можливе за рахунок ведення процесу в умовах мілкої рідкої ванни.

Ціль даної роботи — за допомогою математичного моделювання для визначення технологічних режимів плавки одержати якісний крупногабаритний зливок діаметром 300 мм сплаву Ti29Al.

Матеріали та методика досліджень. Досліджували зливок алюмініду титану складом Ti–29 % Al, що виплавляли на електронно-променевої установці

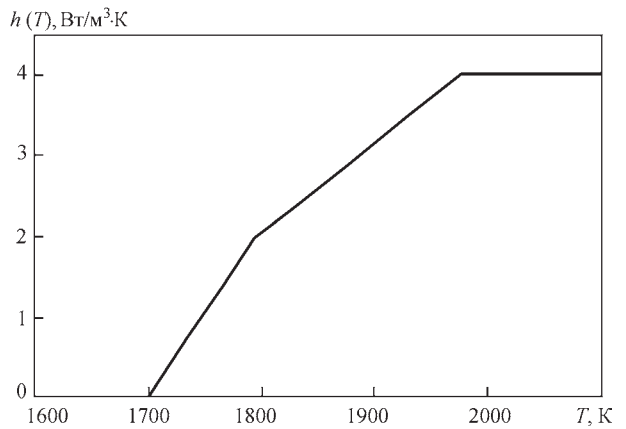


Рис. 2. Залежність еквівалентного коефіцієнту теплопровідності від температури

УЕ-121. Отримано зливок діаметром 300 мм та довжиною 500 мм.

Попередньо проведені дослідні плавки показали, що застосування технологічних режимів ведення процесу ЕПП для одержання зливоків діаметром 300 мм інтерметалідних сплавів системи Ti–Al, які зазвичай використовуються для одержання зливоків стандартних титанових сплавів цього ж діаметру, призводить до формування грубої крупнозернистої кристалічної структури. Дослідження показали, що величина сформованого зерна відповідає 8–9 балу за 10-бальною шкалою макроструктур ГОСТ 26492–85. Причому зерна мають витягнуту форму в напрямі теплопровідності у радіальному напрямку.

Крім того в центральній частині зливка виявляються критичні дефекти у вигляді внутрішніх кільцевих тріщин (рис. 1).

Враховуючи отриманий досвід стає очевидним, що «стандартні» технологічні параметри одержан-

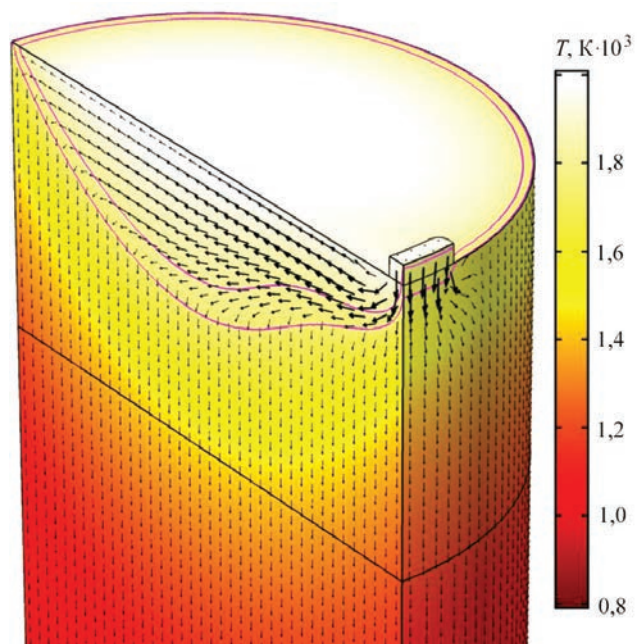


Рис. 3. Розподіл температури та характер руху розплаву у зливку діаметром 300 мм інтерметаліду Ti29Al під час ЕПП

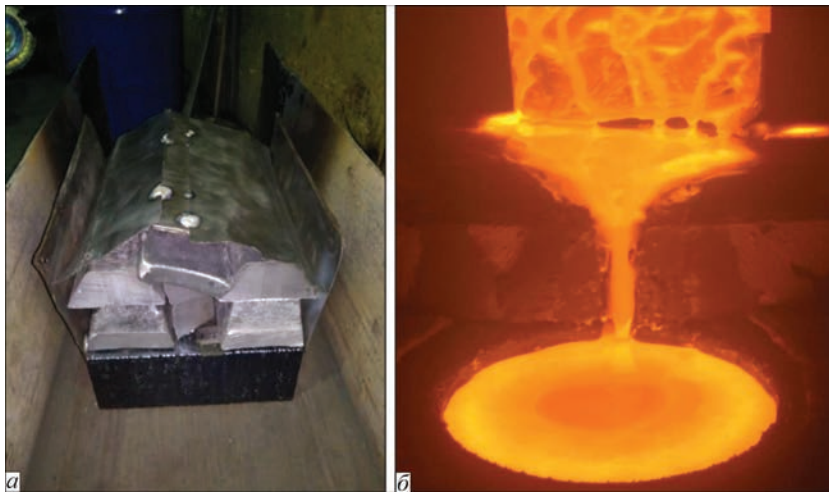


Рис. 4. Шихтова заготовка (а) і процес ЕПП зливка діаметром 300 мм сплаву Ti29Al (б)

ня злиwkів діаметром 300 мм не можуть бути використані для отримання злиwkів алюмініду титану.

Для визначення нових технологічних параметрів плавки було запропоновано розрахунковий підхід — сформульовано тривимірну математичну модель пов'язаних гідродинамічних і теплових процесів в металі, що твердне, для сталого режиму процесу електронно-променевої плавки сплаву титану в прохідний циліндричний кристалізатор [11]. Розраховано гідродинамічну задачу з використанням $k-\epsilon$ моделі турбулентності. При розгляді теплових процесів для обліку теплоти фазового переходу використовували метод повної теплоємності, враховували тепломасоперенос та турбулентну теплопровідність розплаву.

У моделі враховувалася тепловіддача з верхньої поверхні та бокових стінок зливка за рахунок випромінювання, а також тепловіддача з верхньої поверхні за рахунок випаровування титану. Тепловіддача до води в кристалізаторі враховувалася

шляхом уведення еквівалентного коефіцієнту тепловіддачі $h(T)$, залежність якого від температури представлено на рис. 2.

Фізичні характеристики алюмініду титану у відповідності з даними, наведеними в роботі [12], наступні:

Густина (ρ), кг/м ³	3870
Питома теплоємність (C_p), Дж/(кг·К)	937
Теплопровідність (k), Вт/(м·К)	33,8
Температура ліквідуса (T_l), К	1795
Температура солідуса (T_s), К	1730
Прихована теплота плавлення (L), кДж/кг	380
Динамічна в'язкість розплаву (μ), Па·с	0,0032
Коефіцієнт випромінювання (ϵ)	0,7
Температура розплаву, що подається в кристалізатор (T_{in}), К	1973
Поперечний переріз струменя розплаву, що зливається, мм ²	600

Нагрівання зливка в кристалізаторі діаметром 300 мм відбувалося рівномірно розподіленим по поверхні тепловим потоком, що формувався електронною гарматою, ККД якої складав 0,75.

Результати досліджень. В процесі моделювання було отримано тривимірні поля швидкості руху металу і його температури та визначено положення двохфазної зони в зливку (рис. 3).

Аналіз отриманих результатів показав, що неглибока ванна розплаву в кристалізаторі, яка забезпечує його якісну гомогенізацію та форму фронту кристалізації близькою до плоскої, формується за наступними значеннями технологічних параметрів: швидкість витягування зливку (v_{cast}) становить 4 мм/хв, продуктивність процесу приблизно 230 кг/год, потужність електронно-променевого нагріву — 75 кВт.

Таким чином, обраний технологічний режим за рахунок мінімізації глибини рідкої ванни, дозволяє зменшити ймовірність виникнення хімічної неоднорідності зливка, що виплавляється.



Рис. 5. Зовнішній вигляд зливка діаметром 300 мм сплаву Ti29Al, одержаний способом ЕПП

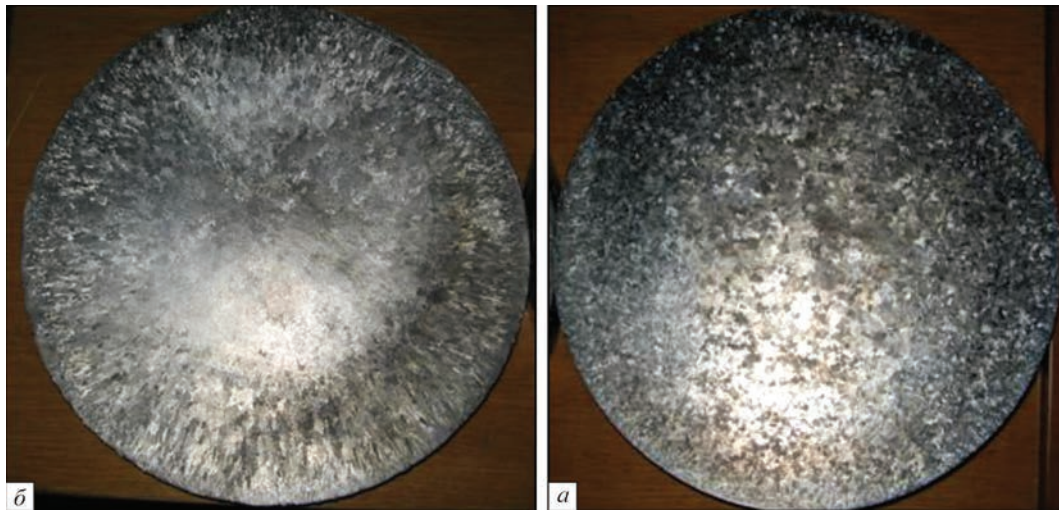


Рис. 6. Поперечні темплети зливків діаметром 300 мм сплаву Ti29Al, виплавленого за «стандартними» (а) та оптимізованими (б) режимами процесу ЕПП

Враховуючи вищенаведене, в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України на електронно-променевій установці UE-121 були проведені дослідні плавки з одержання зливка діаметром 300 мм інтерметалідного сплаву Ti29Al.

Легуючий елемент з високою пружністю пари (алюміній) додавали з урахуванням його втрат на випаровування. Для виплавки зливків використовували чушки алюмінію марки А5 та брухт титану марки ВТ1-0 (рис. 4, а). З використанням визначених технологічних режимів було проведено дослідну плавку зливка діаметром 300 мм інтерметаліду Ti29Al (рис. 4, б).

В результаті експерименту одержано зливки діаметром 300 мм сплаву Ti29Al довжиною приблизно 500 мм (рис. 5).

Проведено дослідження якості отриманого зливка ЕПП діаметром 300 мм алюмініду титану складом Ti29Al. Візуальний огляд показав, що бічна поверхня одержаного зливка чиста, підвищена концентрація домішкових елементів на поверхні у вигляді окисленого або альфованого шару відсутня. Середня глибина поверхневих дефектів типу «гофр» становила не більше 3 мм, дефекти у вигляді розривів, тріщин або несплавлення відсутні.

Вивчення макроструктури зливка проводили на поперечному темплеті після травлення у реактиві, мл: HF — 30; HNO₃ — 10; H₂O — 300. Макроструктура не мала дефектів у вигляді порожнин, раковин, тріщин, розшарувань і характеризувалася зернами, близькими до рівновісних. Величина зерна центральної частини зливка відповідала 4–5 балам і лише в периферійній частині зливка, на глибину до 10 мм, спостерігалась значно дрібніша структура, що відповідала другому балу за 10-бальною шкалою макроструктур ГОСТ 26492–85 (рис. 6).

Дослідження хімічного складу проводили за допомогою оптичного емісійного спектрометра

Хімічний склад зливка ЕПП діаметром 300 мм інтерметаліду Ti29Al, мас. %

Місце відбору проб	Відстань від головної частини зливка, мм	Al	Fe	Ti
По довжині зливка	50	29,40	0,08	Основа
	100	29,59	0,09	
	200	30,35	0,08	
	300	28,86	0,09	
	400	29,21	0,09	
По поперечному перетину	R	28,54	0,09	Основа
	1/2R	29,24	0,09	
	центр	29,72	0,09	

«СПЕКТРОPORT». Вимірювання вмісту хімічних елементів визначали як по довжині, так і по поперечному перетину зливка, та показали, що розподіл алюмінію досить рівномірний, а відхилення від середнього значення не перевищують ±1 мас. % (таблиця).

Висновки

1. Встановлено, що застосування оптимізованих технологічних режимів, визначених за допомогою математичної моделі, дозволяє отримати однорідні за хімічним складом та бездефектні зливки алюмінідів титану діаметром 300 мм.

2. Отримані результати можуть бути використані для подальшого виготовлення великих зливків алюмініду титану.

Список літератури

1. Appel F., Ohring M., Paul J.D.H. et al. (2001) *In Proceedings of the 2nd International Symposium «Structural Intermetallics»*. *The Minerals, Metals & Mater. Soc.*, 63–72.
2. Postans P.J., Cope M.T., Moorhuse S., Thakker A.B. (1993) Applications of titanium aluminides in gas turbine engine components, *Titanium 92. Science and technology. The Minerals and Materials Society*, **2**, pp. 2907–2914.
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. Банних О.А., Поварова К.Б. (1989) Перспективы создания жаропрочных и жаростойких сплавов и интерметаллических соединений. *Новые металлические материалы: Сб. науч. ст. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона*, сс. 29–33.
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. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. (2009) Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. *Справочник*. Москва, ВИЛС–МАТИ.
7. Бернштейн М.Л. (1979) *Атлас дефектов стали*. Москва, Металлургия.
8. Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. (2011) *Gamma titanium aluminide alloys: Science and technology*. Wiley-V.C.H. DOI:10.1002/9783527636204
9. Илларионов А.Г., Попов А.А. (2014) *Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие*. Екатеринбург, Издательство Уральского университета.
10. 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.
11. Ахонін С.В., Гориславец Ю.М., Глухенький О.І. (2019) Моделювання гідродинамічних і теплових процесів у кристалізаторі при електронно-променевої плавці з проміжною ємністю. *Сучасна електрометалургія*, **4**, 9–17.
12. Gao Yong, Zhang Lijing, Gao Wenli, Zhang Hu (2011) Prediction and improvement of shrinkage porosity in TiAl based alloy. *Research & Development J.*, **8(1)**, 19–24.

References

1. Appel, F., Ohring, M., Paul, J.D.H. et al. (2001) In: *Proc. of the 2nd Int. Symp. on Structural Intermetallics. The Minerals, Metals & Mater. Soc.*, 63–72.
2. Postans, P.J., Cope, M.T., Moorhuse, S., Thakker, A.B. (1993) Applications of titanium aluminides in gas turbine engine components, *Titanium 92. Science and technology. The Minerals and Materials Society*, **2**, 2907–2914.
3. Pavlinich, S.P., Zaitsev, M.V. (2018) Application of intermetallics of titanium alloys in casting of assemblies and GTE blades of lightweight structures for aircraft engines of new generation. *Vestnik UGATU*, **15(4)**, 200–202 [in Russian].
4. Bannykh, O.A., Povarova, K.B. (1989) Prospects of development of refractory and heat-resistant alloys and intermetallic compounds. In: *New metallic materials*. Kiev, PWI, 29–33 [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. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties: Refer. Book*. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
7. Bernstein, M.L. (1979) *Atlas of defects of steel*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
8. Appel, F., Paul, J.D.H., Oehring, M. (2011) *Gamma titanium aluminide alloys: Science and technology*. Wiley-V.C.H. DOI:10.1002/9783527636204
9. Illarionov, A.G., Popov, A.A. (2014) *Technological and operational properties of titanium alloys: Manual*. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. Un-ta [in Russian].
10. Kablov, D.E., Panin, P.V., Shiryaev, A.A., Nochovnaya, N.A. (2014) Experience of application of vacuum-arc furnace ALD VAR L200 for casting of ingots of heat-resistant alloys based on titanium aluminides. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **2**, 27–33 [in Russian].
11. 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].
12. Gao Yong, Zhang Lijing, Gao Wenli, Zhang Hu (2011) Prediction and improvement of shrinkage porosity in TiAl based alloy. *Research & Development*, **8(1)**, 19–24.

PRODUCING LARGE-SIZED INGOTS OF TITANIUM ALUMINIDES BY EBM METHOD

S.V. Akhonin¹, A.Yu. Severin¹, V.O. Berezos¹, O.M. Pikulin¹, O.I. Glukhenkii², O.I. Bondar²

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

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

²Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine.

57 Peremohy Ave., 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: gai56@ied.org.ua

Calculations for an ingot of 300 mm diameter of Ti-Al system intermetallic were conducted within the framework of the mathematical model of cylindrical ingots crystallization at electron beam melting. As a result of calculations, temperature fields in the ingot during electron beam melting were obtained, and technological modes of conducting the process were determined. The determined technological modes were used to produce a large-sized ingot of 300 mm diameter from Ti29Al alloy in electron beam installation UE-121. The quality of this ingot was studied and it was shown that application of optimized technological modes allows producing large-sized titanium aluminide ingots of homogeneous composition and without defects. Ref. 12, Table 1, Fig. 6.

Key words: electron beam melting; intermetallic of Ti–Al system; mathematical model; ingot; chemical composition; structure

Надійшла до редакції 04.20.2020