

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КРУПНЫХ СЛИТКОВ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ УСТАНОВКАХ*

С. В. Ахонин¹, А. Ю. Северин¹, В. А. Березос¹,
А. Н. Пикулин¹, А. Г. Ерохин²

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины».
03028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Математическая модель кристаллизации цилиндрических слитков титановых сплавов при электронно-лучевой плавке адаптирована для расчетов кристаллизации крупных слитков диаметрами от 200 до 600 мм сплавов на основе алюминидов титана. Проведены расчеты для слитка диаметром 200 мм интерметаллида TiAl. В результате расчетов получены поля температур в слитке и определены оптимальные режимы ведения плавки. На электронно-лучевой установке УЭ-208М впервые проведена опытная плавка крупного слитка диаметром 200 мм интерметаллидного сплава Ti–29Al. Исследовано качество полученного слитка и установлено, что алюминий равномерно распределен по поперечному его сечению, а это говорит о корректно подобранных с помощью математического моделирования режимах ведения электронно-лучевой плавки. Библиогр. 8, табл. 2, ил. 3.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; математическое моделирование; слиток; сплав; химический состав; структура

В промышленном производстве слитков их качество определяется совокупностью технологических факторов, включающих как условия их выплавки, так и затвердевания металла. Каждый из этих факторов имеет самостоятельное значение с точки зрения получения металлопродукции высокого качества. Однако процесс затвердевания слитка, в ходе которого происходят различного рода ликвационные и усадочные явления в совокупности с весьма сложными массо- и теплопереносом в жидкой и твердой фазах, представляется крайне важным технологическим этапом, позволяющим обеспечивать достижение максимального положительного результата посредством наложения дополнительных физических воздействий, которые могут изменять характер развития конвективных потоков в жидкой ванне, а также саму форму жидкой ванны. Основной проблемой при получении крупных слитков различных сплавов, в том числе и титановых, является возникновение дефектов макроструктуры (различные ликвации, полосчатость, послойная кристаллизация) [1–3]. Возникновение таких металлургических дефектов отрицательно сказывается на структуре и свойствах сплавов на основе алюминидов титана и является недопустимым [4]. Целью данной работы является изучение распределения легирующих элементов в глубокой жидкой ванне и слитке, разработка технологических рекомендаций по его выплавке и

получение качественного, химически однородного, бездефектного слитка алюминидов титана способом электронно-лучевой плавки (ЭЛП).

Расчет режимов плавки крупных слитков алюминидов титана. В ИЭС им. Е. О. Патона разработана математическая модель кристаллизации цилиндрических слитков титановых сплавов при ЭЛП [5–7]. Эта модель была адаптирована для расчетов кристаллизации круглых крупных слитков диаметрами от 200 до 600 мм сплавов на основе алюминидов титана. В настоящей работе расчеты проводили для слитка диаметром 200 мм интерметаллида TiAl. На основании расчетов путем изменения величины энергии, сообщаемой электронными лучами свободной поверхности слитка, получены три режима плавки: с наличием глубокой (примерно 0,05 м) ванны жидкого металла на поверхности слитка (режим 1), мелкой (приблизительно 0,02 м) (режим 2) и твердо-жидкого состояния поверхности (режим 3). Установлены мощности обогрева центральной и периферийной зон поверхности слитка, соответствующие режимам 1–3 (табл. 1).

В результате расчетов в рамках описанной модели получены поля температур в слитке (рис. 1).

В качестве базовых технологических параметров ведения плавки были приняты значения соответствующие режиму 2, что позволило получить

*По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Титан-2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Таблица 1. Режимы электронно-лучевого нагрева поверхности слитка диаметром 200 мм алюминид титана в кристаллизаторе

Номер режима	Режим	Мощность, кВт	
		центр	периферия
1	Глубокая ванна	12	12
2	Мелкая ванна	8	10
3	Твердожидкая торцевая поверхность	6	8

не глубокую ванну жидкого металла и, соответственно, не допустить возникновения химических неоднородностей.

Получение слитков диаметром 200 мм алюминид титана способом ЭЛП. На электронно-лучевой установке УЭ-208М [8] проведена опытная плавка крупного слитка диаметром 200 мм интерметаллидного сплава Ti-29Al. Слиток подвергали двойному электронно-лучевому переплаву. Первый переплав — основной, обеспечивающий введение легирующих элементов в состав сплава; второй — выравнивающий. Элемент с высокой упругостью пара (алюминий) шихтовали с учетом потерь на испарение.

Для выплавки слитков использовали шихту в следующих пропорциях: алюминий марки А5 — 57 кг, заготовка титановая — 93 кг. Внешний вид шихтовых заготовок для выплавки слитков алюминид титана приведен на рис. 2, а. Технологические параметры плавки следующие:

общая мощность ЭЛ нагрева, кВт 60
 мощность в кристаллизаторе, кВт 18
 скорость плавки, кг/ч 60
 удельный расход электроэнергии
 (без учета вакуумной системы), кВт·ч/кг 1

После плавки слиток находился в камере в условиях вакуума до полного его охлаждения. Получен слиток с чистовым размером диаметром 195 мм интерметаллидного сплава Ti-29Al массой 114 кг (рис. 2, в). Внешних грубых дефектов в виде порывов и неслитин в слитках не обнаружено, поверхность удовлетворительная с небольшими гофрами. Вес слитка после механической обработки составил 90 кг (рис. 2, з).

Исследование качества крупного слитка ЭЛП алюминид титана. Содержание легирующих элементов сплава определяли методом индуктивно связанной плазмы/оптической эмиссионной спектроскопии (ICP/OES) на ICP-спектрометре ICAP 6500 DUO. Для определения химическим методом содержания кислорода, азота, водорода изготавливали образцы МИ-99 цилиндрической формы диаметром 3 и длиной 3 мм. Данные химического анализа приведены в табл. 2. Исследо-

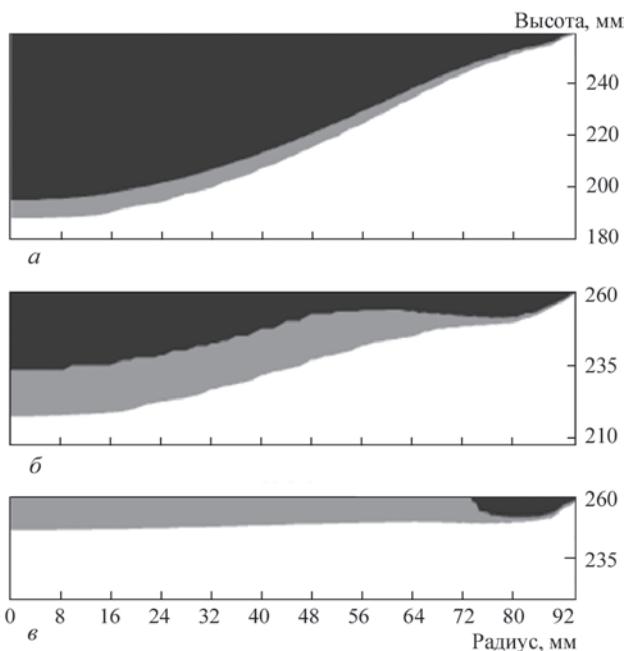


Рис. 1. Температурные поля в слитке диаметром 200 мм алюминид титана при различных режимах нагрева: а — режим 1; б — режим 2; в — режим 3

вания химического состава показали удовлетворительное распределение химических элементов по длине слитка. Отклонение в содержании элементов в головной и донной частях объясняется нестационарными режимами в начале и конце



Рис. 2. Внешний вид шихтовой заготовки (а), процесс плавки (б), слиток алюминид титана Ti-29Al после плавки (в) и механической обработки (з)

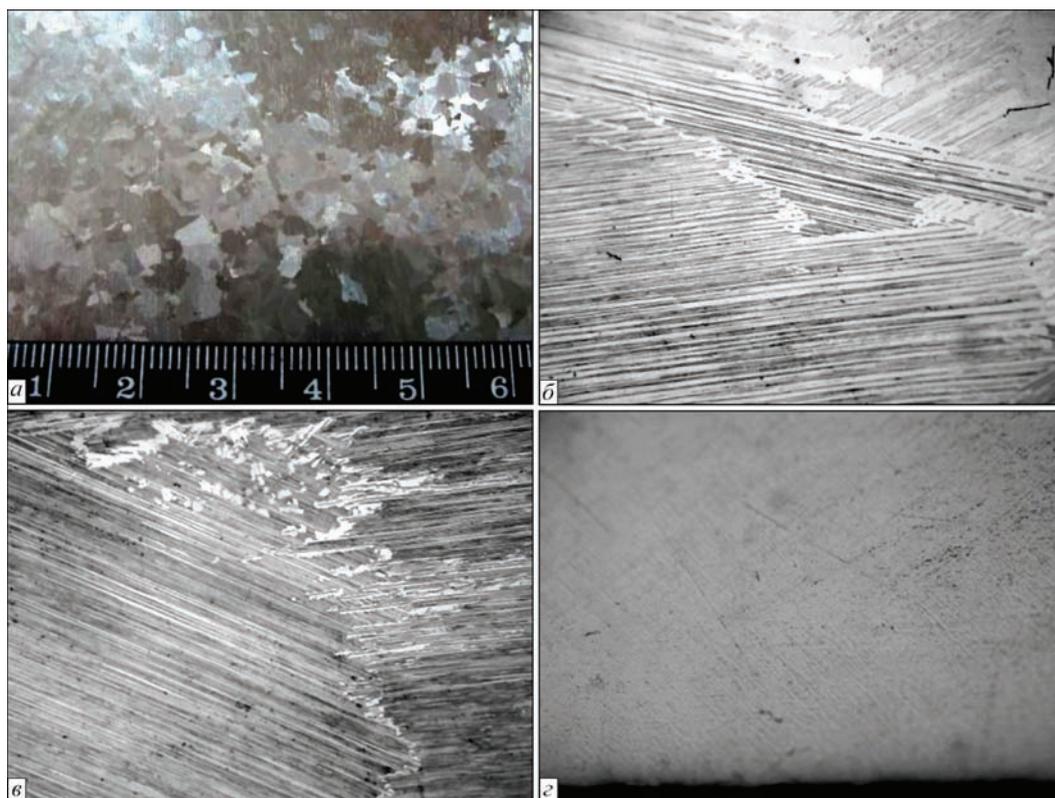


Рис. 3. Макро- (а) и микроструктура (б-г, ×250) поперечного сечения слитка диаметром 195 мм алюминиды титана Ti-29Al

Т а б л и ц а 2. Химический состав слитка ЭЛП сплава Ti-29Al, мас. %

Слиток	Место отбора пробы	Al	O	Ti
Ti-29Al	1 (головная часть)	28,0	0,12	Основа
	2	29,3		
	3	30,5		
	4	30,2		
	5	29,7		
	б (донная часть)	23,6		

плавки при формировании затравки и выведении усадочной раковины соответственно.

Изучение макроструктуры слитка алюминиды титана проводили на поперечных темплатах после травления в реактиве, мл: HF — 30; HNO₃ — 10; H₂O — 300. Определено, что в слитке формируется плотная однородная структура. Макроструктура не имеет дефектов в виде пор, раковин, трещин, расслоений и характеризуется зернами близкими к равноосным. Величина зерна, определяемая по 10-бальной шкале макроструктур Инструкции 1054-76 ВИАМ, соответствует 10 баллу. Различия в бальности зерна в центральной и периферийной частях слитка незначительны (рис. 3, а).

Для изучения распределения легирующих элементов по поперечному сечению слитка на темплате проведены исследования химического состава и микроструктуры в различных его областях: центральной, средней и у края. Для изучения химического состава из указанных областей была отобрана

стружка, а для изучения микроструктуры вырезаны и изготовлены образцы для оптической металлографии, проведенной на микроскопе «Neophot-32». Данные химического анализа (содержание Al, мас. %) из указанных областей следующие: центр — 29,25; середина — 29,30; край — 29,27.

Исследование микроструктуры показало, что в полученном материале сформировалась пластинчатая структура, представленная однонаправленными в пределах одного зерна пластинами α₂- и γ-фаз. Размер исходного зерна практически одинаков в центральной и средней областях и составляет 250...300 мкм. Размер зерен в периферийной области — 100...150 мкм, ламели ориентированы преимущественно в направлении теплоотвода (рис. 3, б-г).

Таким образом, установлено, что легирующий элемент (алюминий) равномерно распределен по поперечному сечению крупного слитка алюминиды титана, что говорит о корректно подобранных с помощью математического моделирования режимах ведения электронно-лучевой плавки.

Список литературы

1. Бояршинов В. А. (1979) *Рафинирующие переплавы стали и сплавов в вакууме*. Москва, Металлургия.
2. Андреев А. Л. (ред.) (1978) *Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
3. Пагон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В., Жук Г. В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
4. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшкин И. С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИЛС-МАТИ.

5. Tripp D., Mitchel A., Hayden M. (1986) The effect of power on the thermal regime in an EB hearth. In: *Proc. of Conf. on Electron Beam Melting and Ref. State-of-the Art* (1986, Bakish Mat. Corp., Englewood, N.-Y.), 30–41.
6. Жадкевич М. Л., Статников Б. Ш., Ищенко Д. А. (1991) Исследование теплового состояния системы слитков–кристаллизатор при электронно-лучевом переплаве. *Физ. и хим. обраб. мат.*, **3**, 53–57.
7. Жук Г. В. (2003) *Основные закономерности влияния термодинамических условий кристаллизации металла при электронно-лучевой плавке на структуру и свойства слитков*: дис. ... докт. техн. наук. Киев, Институт электросварки им. Е. О. Патона, 351.
8. Тихоновский А. Л., Тур А. А., Кравец А. Н. и др. (1992) Электронно-лучевая установка УЭ-208. *Пробл. спец. электротехнологии*, **1**, 71–74.
3. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Pliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
5. Tripp, D., Mitchel, A., Hayden, M. (1986) The effect of power on the thermal regime in an EB hearth. In: *Proc. of Conf. on Electron Beam Melting and Ref. State-of-the Art* (1986, Bakish Mat. Corp., Englewood, N.-Y.), 30–41.
6. Zhadkevich, M.L., Statnikov, B.Sh., Ishchenko, D.A. (1991) Examination of heat state of ingot-mould system in electron beam remelting. *Fiz. i Khim. Obrab. Mat.*, **3**, 53–57 [in Russian].
7. Zhuk, G.V. (2003) *Basic regularities of influence of thermo-physical conditions of metal crystallization in electron beam melting on structure and properties of ingots*: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kiev, PWI [in Russian].
8. Tikhonovsky, A.L., Tur, A.A., Kravets, A.N. et al. (1992) Electron beam installation UE-208. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 71–74 [in Russian].

References

1. Boyarshinov, V.A. (1979) *Refining remelting of steel and alloys in vacuum*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. (1978) *Titanium alloys. Melting and casting of titanium alloys*. Ed. by A.L. Andreev. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ВЕЛИКИХ ЗЛИВКІВ АЛЮМІНІДІВ ТИТАНУ В ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ УСТАНОВКАХ

С. В. Ахонін¹, А. Ю. Северин¹, В. О. Березос¹, О. М. Пікулін¹, О. Г. Ерохін²

¹Інститут електросварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ДП «НПЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України».

03028, м. Київ, вул. Ракетна, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Математична модель кристалізації циліндричних зливків титанових сплавів при електронно-променевої плавці адаптована для розрахунків кристалізації великих зливків діаметрами від 200 до 600 мм сплавів на основі алюмінідів титану. Проведено розрахунки для зливка діаметром 200 мм інтерметаліду TiAl. В результаті розрахунків отримані поля температур в зливку та визначено оптимальні режими ведення плавки. На електронно-променевої установці UE-208M вперше проведена дослідна плавка великого зливка діаметром 200 мм сплаву Ti–29Al. Досліджено якість отриманого зливка і встановлено, що алюміній рівномірно розподілений по поперечному перетину зливка, а це говорить про коректно підібрані за допомогою математичного моделювання режими ведення електронно-променевої плавки. Бібліогр. 8, табл. 2, іл. 3.

Ключові слова: електронно-променева плавка; математичне моделювання; зливки; сплав; хімічний склад; структура

PECULIARITIES OF PRODUCING LARGE INGOTS OF TITANIUM ALUMINIDES IN ELECTRON BEAM INSTALLATIONS

S.V. Akhonin¹, A.Yu. Severin¹, V.A. Berezos¹, A.N. Pikulin¹, A.G. Erokhin²

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

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

²SE «RPC «Titan» of the E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

26 Raketnaya Str., 03028, Kyiv. E-mail: titan.paton@gmail.com

Mathematical model of crystallization of cylindrical ingots of titanium alloys in electron beam melting was adapted for calculations of crystallization of large ingots of diameters from 200 up to 600 mm, made of alloys on titanium aluminide base. Calculations were made for 200 mm diameter ingot of TiAl intermetallic. As a result of calculations the temperature fields were obtained in ingot and optimum conditions of melting were determined. In electron beam installation UE-208M the experimental melting of large 200 mm diameter ingot of Ti–29Al intermetallic alloy was performed for the first time. The quality of the produced ingot was studied and it was found that aluminium is distributed uniformly across its section, thus testifying that the electron beam melting modes were selected properly by using the mathematic modeling. 8 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Key words: electron beam melting; mathematic modeling; ingot; alloy; chemical composition; structure

Поступила 03.07.2018