

ВИРОБНИЦТВО ЗЛИВКІВ ТИТАНУ З РЕГЛАМЕНТОВАНИМ ВМІСТОМ КИСНЮ СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

С.В. Ахонін¹, О.М. Пікулін¹, В.О. Березос¹, А.Ю. Северин¹, О.Г. Єрохін²

¹ІЕЗ 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

Проведено комплексні дослідницькі роботи по отриманню зливок титанового сплаву Grade 2 з регламентованим вмістом кисню 0,12...0,16 % діаметром 600 мм та зливка титанового сплаву Grade 3 діаметром 1100 мм та довжиною до 3 м способом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю на виробничих потужностях ДП «НПЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» в багатофункціональній електронно-променевої установці УЕ5810. Запропоновано спосіб формування шихтової заготовки та формулу для розрахунку кількості порошку TiO₂ для легування. Отримано бездефектні зливки титанових сплавів Grade 2 та Grade 3 з регламентованим вмістом кисню та забезпечено при цьому діапазон відхилення його розподілу в металі зливок $\pm 0,02$ %. Показано, що запропоновані режими електронно-променевого нагріву витратної заготовки, розплаву металу в проміжній ємності та кристалізаторі, а також швидкість плавки забезпечують повне розчинення часточок діоксиду титану в проміжній ємності та відсутність у виплавлених зливках збагачених киснем дефектів. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електронно-променева плавка з проміжною ємністю; електронно-променева установка; зливка титану; кисень; регламентований вміст кисню; діоксид титану; швидкість плавки; макроструктура

Титан, як один з найважливіших сучасних конструкційних матеріалів, все частіше почав використовуватися в медицині, будівельній промисловості та виробництві товарів широкого вжитку. Але лише близько 5 % титанової сировини, яка сьогодні видобувається в світі, переробляється в металевий титан та його сплави, що мають найважливіше значення для багатьох галузей промисловості. При цьому слід зазначити, що сплави на основі титану, міцність яких в 4...5 разів перевершує міцність чистого титану, на теперішній час знаходять все ширше застосування [1, 2].

В даний час у світі поряд зі стабільною тенденцією збільшення застосування сплавів титану в різних галузях промисловості залишається невирішеним питання високої вартості титану та його сплавів [3]. Вартість титанових сплавів нерозривно пов'язана з технологією їх отримання і забезпечення необхідних механічних властивостей. Для підвищення рівня механічних властивостей сплави титану в своїй основі мають дорогі легуючі елементи (алюміній, ванадій, цирконій, кремній, молібден) [3]. Але слід зазначити, що в останні роки все більшого поширення набувають економнолеговані титанові сплави, в яких дорогі легуючі елементи замінені недорогими та доступними елементами, а саме: залізом, вугле-

цем, киснем і азотом [4, 5]. При легуванні такими елементами враховують, що α -стабілізатори — це азот, кисень і вуглець, які забезпечують найбільший приріст міцності в титанових сплавах, і β -стабілізатор — залізо.

В області малих концентрацій (до 0,02 мас. %) кожна сота частка відсотка кисню підвищує межу міцності і текучості титану приблизно на 1,0...1,25 кгс/мм². Найбільш помітний вплив на механічні властивості титану кисень здійснює при його концентрації в металі до 0,6 мас. % [6]. В даному випадку спостерігається значне підвищення міцності при відносно невеликому падінні пластичних властивостей. Разом з тим при концентрації кисню більше 0,7 мас. % титан повністю втрачає здатність до пластичної деформації. Отже, керуючи вмістом кисню в металі певною мірою можна досягти оптимального співвідношення пластичних і міцностних характеристик титанового сплаву. Тому кисень можна розглядати як перспективний легуючий елемент для отримання нових титанових сплавів. Особливо це важливо для медичних виробів, для яких поряд з механічними властивостями на перший план виходять корозійна стійкість і біосумісність. На відміну від інших легуючих компонентів (наприклад, ванадію) кисень є більш безпечним [6–8].

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, О.М. Пікулін — <https://orcid.org/0000-0001-6327-3448>,

В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>,

О.Г. Єрохін — <https://orcid.org/0000-0003-2105-5783>

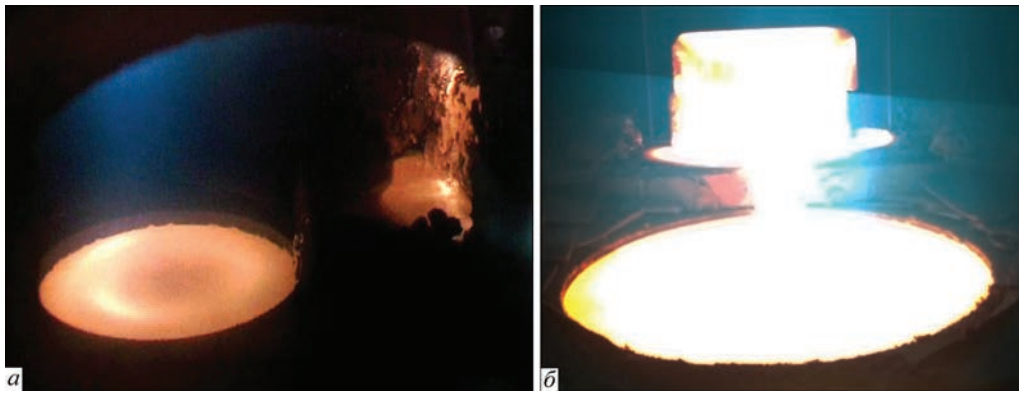


Рис. 1. Процес плавки зливків титанових сплавів Grade 2 (а) і Grade 3 (б)

За останні десятиріччя вітчизняними та зарубіжними металургами виконано ряд робіт по отриманню титану, легованого киснем [6, 7, 9], як з газової фази в процесі камерного електрошлакового переплаву [7, 9], так і з застосуванням у якості легуючого елемента при додаванні в шихтову заготовку порошку діоксиду титану [10, 11].

Необхідно зазначити, що на сьогодні титан та його сплави виробляються способами спеціальної електрометалургії: вакуумно-дуговим та плазмово-дуговим переплавами; вакуумно-індукційною, електрошлаковою та електронно-променевою плавками титану [12, 13]. При цьому найбільшого поширення набула технологія вакуумно-дугового переплаву витратного електрода. Проте з точки зору рафінування металу, видалення неметалевих включень високої і низької щільності найбільш перспективною є електронно-променева плавка (ЕПП) з проміжною ємністю.

При легуванні титану порошком діоксиду титану слід враховувати, що його температура плавлення становить 1870 °С, що вище, ніж температура плавлення титану (1670 °С), отже діоксид титану буде не плавитися, а розчинятися в розплаві. В свою чергу ЕПП є технологією, яка завдяки незалежному джерелу нагріву має можливість в широких межах регулювати швидкість плавлення шихтової заготовки, що дозволяє регулювати тривалість перебування металу в рідкому перегрітому стані. Отже технологію ЕПП можна вважати най-

більш ефективною для отримання зливків титану, легованих киснем.

Так, в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, враховуючи досвід досліджень, проведених авторами в роботі [11], було запропоновано провести дослідження по виплавці зливків сплавів титану, легованих киснем. В ході дослідницьких робіт проводили виплавку партії зливків титанового сплаву Grade 2 діаметром 600 мм з регламентованим вмістом кисню в межах 0,12...0,16 % та зливка титанового сплаву Grade 3 діаметром 1100 мм з регламентованим вмістом кисню в межах 0,28...0,32 % на виробничих потужностях ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» в багатофункціональній електронно-променевої установці UE5810 (рис. 1).

Матеріали та методи досліджень. З метою отримання рівномірного регламентованого вмісту кисню в зливках титанових сплавів Grade 2 та Grade 3 було запропоновано спосіб формування шихтової заготовки, який базується на тому, що рівномірно по її довжині у якості легуючого елемента наноситься вододисперсійна емульсія порошку TiO_2 (рис. 2) з подальшою сушкою шихтової заготовки.

Необхідна кількість порошку TiO_2 для отримання заданого значення кисню в металі розраховується за формулою:

$$M[TiO_2] = K(M_{зл}[O]_{зад} \% - M_{зл}[O]_{зл} \%),$$

де $M[TiO_2]$ — маса порошку TiO_2 для приготування його вододисперсійної емульсії; $K = 0,025$ — коефіцієнт пропорційності, який враховує відсоток кисню в порошок TiO_2 ; $M_{зл}$ — маса зливка; $[O]_{зад} \%$ — заданий відсоток кисню в зливку; $M_{зл}$ — маса шихтової заготовки; $[O]_{зл} \%$ — відсоток кисню в шихтовій заготовці.

Враховуючи те, що температура плавлення порошку TiO_2 вище за температуру плавлення чистого титану майже на 200 °С, при його розчиненні в розплаві з'являються збагачені киснем зони. В свою чергу, згідно діаграми стану титан-кисень, титан з підвищеним вмістом кисню має більш ви-

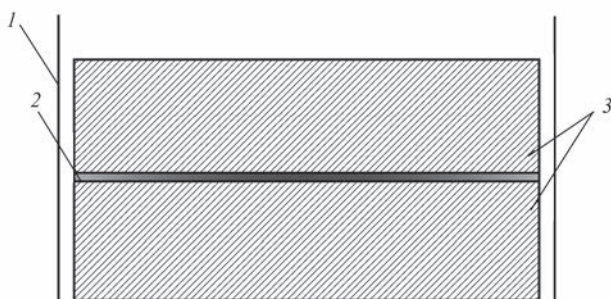


Рис. 2. Схема поперечного перерізу шихтової заготовки: 1 — невитратний короб; 2 — шар порошку TiO_2 ; 3 — шихтова заготовка

соку температуру плавлення, ніж чистий титан. Авторами роботи [14] було встановлено, що при перегріванні розплаву вище температури плавлення титану понад 150 °С збільшення або зменшення діаметра включення в два рази відповідно збільшує або зменшує час розчинення в два рази, а при перегріванні розплаву менше 150 °С збільшення або зменшення діаметра включення в два рази відповідно збільшує або зменшує час розчинення в три рази. Якщо розплав не встигне гомогенізуватися перед зливом в кристалізатор, то збагачений киснем метал може затвердіти перед фронтом кристалізації, оскільки температура його твердіння вища, і сформувати зону підвищеної твердості в зливку [14]. При цьому можуть утворюватися мікропори. Отже необхідно досягати підвищеної температури розплаву перегріваючи метал та витримувати його в такому стані час тим більший, чим товщий шар TiO_2 в шихтовій заготовці.

Таким чином, в кристалізатор повинен зливатися тільки гомогенізований розплав, витриманий необхідний час в проміжній ємності. Тому необхідно враховувати геометрію проміжної ємності та швидкість плавки [14]. Взнявши за основу дослідження, проведені авторами в роботі [14], враховуючи геометрію проміжної ємності електронно-променевої установки UE5810 було запропоновано режими електронно-променевого нагріву витратної заготовки, розплаву металу в проміжній ємності та кристалізаторі, а також швидкості плавки для зливків діаметром 600 та 1100 мм. Так, сумарна питома потужність нагріву складала для зливків діаметром 600 мм до 0,14 кВт/см² та до 0,11 кВт/см² для зливка діаметром 1100 мм. При цьому швидкість плавки становила 270 кг/год для зливка діаметром 600 мм та 275 кг/год — для 1100 мм.

Процес одержання зливків сплавів титану, легованих киснем, проводили наступним чином. Виконували підготовку вихідної шихтової заготовки, рівномірно по довжині якої у якості легиуючого елементу наносили вододисперсійну емульсію порошку TiO_2 з подальшою сушкою шихтової заготовки. Далі виконували електронно-променевої переплав з проміжною ємністю цієї вихідної шихтової заготовки. Зливки виплавляли шляхом періодичного зливу порцій розплаву з проміжної ємності в кристалізатор, де виконували його обігрів і періодичне витягування. Процес продовжували до наплавлення зливка необхідної довжини. Після цього готовий зливок охолоджували в камері до необхідної температури в умовах вакууму.

В результаті проведених плавок були отримані зливки титанового сплаву Grade 2 діаметром 600 мм (рис. 3) та Grade 3 діаметром 1100 мм довжиною до 3 м.



Рис. 3. Зливки титанового сплаву Grade 2 діаметром 600 мм після ЕПП

Дослідження якості отриманих зливків показали, що їх поверхня після охолодження в вакуумі чиста, відсутні окислений або альфований шар. Глибина поверхневих дефектів у вигляді гофр, що характерні для електронно-променевої плавки, становить не більше 1...3 мм. Дефекти у вигляді розривів, тріщин або несплавлення відсутні.

З отриманих зливків титанового сплаву Grade 2 діаметром 600 мм вирізали поперечні темплети на відстані 150 мм з головної та донної частин та з середини зливка для дослідження розподілу кисню по його довжині та перетину. Із зливка титанового сплаву Grade 3 діаметром 1100 мм поперечні темплети вирізали з головної та донної частин.

Результати досліджень та їх обговорення. Дослідження хімічного складу отриманих запропонованим способом зливків показало (таблиця), що вміст домішкових елементів відповідає вимогам стандартів для титанових сплавів Grade 2 та Grade 3. Аналіз результатів досліджень хімічного складу зливків з регламентованим вмістом кисню (таблиця) показав, що запропонований спосіб легування порошком діоксиду титану та метод розрахунку необхідної його кількості дозволяє чітко забезпечувати необхідний рівень кисню в металі зливків при умові точного дотримання режимів плавки.

Концентрація водню в металі досліджуваних зливків не перевищувала 0,002 %. Підвищеного вмісту азоту як в донній, так і в головній частинах зливків не виявлено, його максимальна концентрація складала 0,02 %. Концентрація заліза в металі досліджуваних зливків знаходилася в межах від 0,08 до 0,13 %.

Якість металу титанових зливків обумовлюється відсутністю в металі неметалевих включень, особливо у вигляді азотовмісних альфованих частинок або нітридів титану, які призводять до утворення дефектів, що негативно впливають на механічні властивості титанових сплавів.

Хімічний склад металу зливків титанових сплавів Grade 3 діаметром 1100 мм та Grade 2 діаметром 600 мм, отриманих способом ЕПП, мас. %

Сплав	Частина зливка	Місце відбору проби	C	Fe	O	N	H	Інші елементи (max), всього
Grade 3	Верх	Поверхня	0,01	0,08	0,29	0,01	0,002	0,13
		1/2 радіусу	—»—	—»—	0,27	—»—	—»—	0,11
		Центр	—»—	0,09	—»—	—»—	—»—	—»—
	Середина	Поверхня	—»—	0,10	0,29	—»—	—»—	0,12
		Поверхня	0,02	—»—	0,30	0,02	—»—	—»—
		1/2 радіусу	0,01	0,11	—»—	0,01	—»—	0,10
	Низ	1/2 радіусу	0,01	0,11	—»—	0,01	—»—	0,10
Центр		—»—	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—	
ASTM B977-13			≤0,08	≤0,30	≤0,35	≤0,05	≤0,003	≤0,40
Grade 2	Верх	Поверхня	0,02	0,11	0,13	0,01	0,002	0,13
		1/2 радіусу	0,01	0,10	—»—	—»—	—»—	0,11
		Центр	—»—	—»—	0,12	—»—	—»—	0,14
	Середина	Поверхня	—»—	—»—	0,15	0,02	—»—	0,11
		1/2 радіусу	0,02	0,09	0,14	—»—	—»—	0,13
		Центр	0,01	0,10	—»—	0,01	—»—	0,14
	Низ	Поверхня	0,02	0,13	0,16	—»—	—»—	0,16
		1/2 радіусу	0,01	0,11	—»—	—»—	—»—	0,14
		Центр	—»—	—»—	0,15	—»—	—»—	—»—
	ASTM B977-13			≤0,08	≤0,30	≤0,25	≤0,03	≤0,003

Тому після механічної обробки поверхнево-го шару отриманих зливків (рис. 4) методом ультразвукової дефектоскопії проводився пошук внутрішніх дефектів у вигляді неметалевих включень, пор і нещільностей. Дослідження металу зливка проводили шляхом послідовного ручного сканування бічної поверхні по радіусу уздовж поздовжньої осі зливка. Для забезпечення охоплення всього обсягу зливка скануванню піддавали всю його бічну поверхню. Для проведення ультразвукового дослідження металу зливків використовували перетворювач ультразвуковий П121-1.25-40-М-003 частотою 1,25 МГц, який забезпечує менший коефіцієнт загасання і краще співвідношення сигнал/шум. Під час дослідження зливка спостерігалися типові для литого металу множинні відлуння малої амплітуди, що є результатом відображення сигналу від границь зерен. В результаті проведеного дослідження не були виявлені імпульси, які можна інтерпретувати як неметалеві включення, пори та усадкові раковини.



Рис. 4. Зовнішній вигляд зливка титанового сплаву Grade 3 діаметром 1100 мм після механічної обробки

Дослідження макроструктури отриманих зливків проводили на поперечних темплетях, які вирізали для проведення дослідження рівномірності розподілу кисню по перетину зливка. Виявлення структури проводили травленням темплетів у 15%-ному розчині фтористої кислоти з додаванням 3%-ої азотної кислоти при кімнатній температурі. В результаті було встановлено, що метал зливків щільний, однорідний, з відсутністю зон по перетину зливка, що по-різному травляться. Досліджуваний метал характеризується кристалами близькими до рівновісних розміром від 25 до 50 мм для зливка діаметром 1100 мм та 10...30 мм для зливка діаметром 600 мм. Різниці в структурі

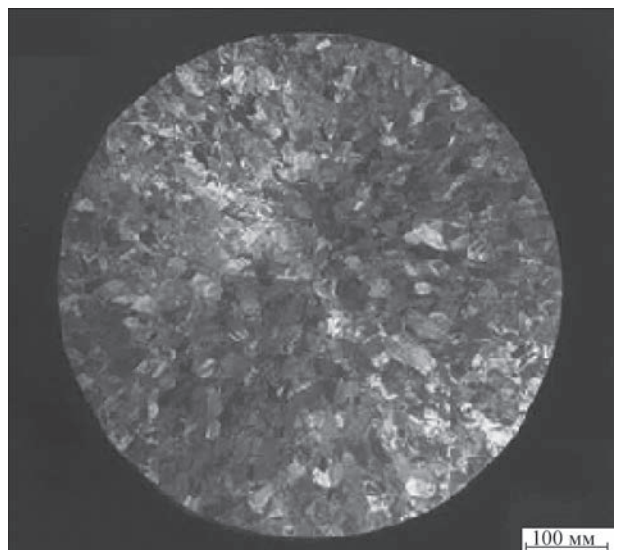


Рис. 5. Макроструктура зливка діаметром 600 мм сплаву Grade 2

центральної та периферійної зон зливка не спостерігається (рис. 5).

Мікроструктура зерна, отриманого в результаті плавки литого металу, характеризується пачками пластин α -фази, що зорієнтовані в одному напрямку до границі зерна.

Таким чином, технологія ЕПП дозволяє отримувати бездефектні зливки титану з регламентованим вмістом кисню, що відповідають вимогам стандарту, а запропонована формула для розрахунку кількості порошку TiO_2 для легування дозволяє забезпечувати діапазон відхилення розподілу кисню в металі зливок не більше ніж $\pm 0,02$ %.

Висновки

1. По результатам дослідницької роботи запропоновано спосіб формування шихтової заготовки та формулу для розрахунку кількості порошку TiO_2 для легування, що дозволило отримати бездефектні зливки титану з регламентованим вмістом кисню та забезпечити при цьому діапазон відхилення його розподілу в металі зливок не більше ніж $\pm 0,02$.

2. Показано, що запропоновані режими електронно-променевого нагріву витратної заготовки, розплаву металу в проміжній ємності та кристалізаторі, а також швидкість плавки забезпечують повне розчинення часточок діоксиду титану в проміжній ємності та відсутність у виплавленому зливку збагачених киснем дефектів.

Список літератури

1. Олейник Т.А., Гурьянова Т.П., Колобов Г.А. и др. (2010) Развитие технологий добычи, обогащения и переработки титанового сырья в мире и Украине. *Металургия: Зб. наук. праць ЗДА*, **22**, 44–59.
2. Червоный И.Ф., Тэлин В.В., Пожуев В.И. и др. (2007) Титан и области его применения. *Сб. тр. междунар. научно-техн. конф. «Ti-2007 в СНГ»*, 15–18 апр. 2007, Ялта. Киев, 2007, сс. 314–325.
3. (2013) *Titanium Metal: Market Outlook to 2018*. Sixth Edition. Roskill Information Services Ltd, USA.
4. Осипенко А.В. (2015) Разработка технологии получения сырья для сплавов титана из некондиционного титана губчатого. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, **4(5)**, 28–32. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2015_4%285%29_7
5. Cheng-Lin Li, Yang Yu, Wen-Jun Ye et al. (2015) Effect of boron addition on microstructure and property of low cost beta titanium alloy. *TMS 2015, 144th Annual Meeting & Exhibition*, pp. 1167–1172. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48127-2_141
6. Давыдов С.И., Шварцман Л.Я., Овчинников А.В., Теслевич С.М. (2006) Некоторые особенности легирования титана кислородом. *Сб. тр. междунар. научно-техн. конф. «Ti-2006 в СНГ»*, 21–24 мая 2006 г., г. Суздаль, Россия. Киев, Наукова думка, сс. 253–257.
7. Рябцев А.Д., Троянский А.А. (2011) Рафинирование и легирование титана в процессе камерного электрошлакового переплава. *Современная электрометаллургия*, **1**, 52–53.

8. Коллеров М.Ю., Спектор В.С., Скворцова С.В. (2015) Проблемы и перспективы применения титановых сплавов в медицине. *Титан*, **48(2)**, 42–53.
9. Ратиев С.Н., Рябцева О.А., Троянский А.А. и др. (2010) Легирование титана кислородом из газовой фазы при камерном электрошлаковом переплаве титановой губки. *Современная электрометаллургия*, **2**, 8–12.
10. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Мамонов И.М. (2015) Влияние легирования кислородом на механические свойства прутков из титана и сплава Ti–6Al–4V. *Международный научно-исследовательский журнал*, **41(10)**, Ч. 2, 49–51. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.41.154>
11. Костенко В.И., Кругленко М.П., Калинин А.Н., Пап П.А. (2012) Производство способом электронно-лучевого переплава бездефектных слитков титана с регламентированным содержанием кислорода. *Современная электрометаллургия*, **1**, 26–29.
12. Каблов Е.Н. (2012) Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. *Авиационные материалы и технологии*, **S**, 7–17.
13. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС-МАТИ.
14. Ахонин С.В., Кругленко М.П., Костенко В.И. (2011) Математическое моделирование процесса растворения кислородсодержащих тугоплавких включений в расплаве титана. *Современная электрометаллургия*, **1**, 17–21.

References

1. Olejnik, T.A., Guryanova, T.P., Kolobov, G.A. et al. (2010) Development of technologies for the extraction, enrichment and processing of titanium raw materials in the world and in Ukraine. *Metalurgiya: Zb. Nauk. Prats of ZGIA*, **22**, 44–59 [in Russian].
2. Chervony, I.F., Telin, V.V., Pozhuev, V.I. et al. (2007) Titanium and fields of its application. In: *Proc. of Int. Sci.-Tech. Conf. on Ti-2007 in CIS (15–18 Apr. 2007, Yalta)*. Kiev, 2007, 314–325 [in Russian].
3. (2013) *Titanium Metal: Market Outlook to 2018*. Sixth Ed. Roskill Information Services Ltd, USA.
4. Osipenko, A.V. (2015) Development of technology of producing raw materials for titanium alloys from substandard titanium sponge. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **4(5)**, 28–32 [in Russian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2015_4%285%29_7
5. Cheng-Lin, Li, Yang, Yu, Wen-Jun, Ye et al. (2015) Effect of boron addition on microstructure and property of low cost beta titanium alloy. In: *TMS 2015, 144th Annual Meeting & Exhibition*, 1167–1172. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48127-2_141
6. Davydov, S.I., Shvartsman, L.Ya., Ovchinnikov, A.V., Teslevich, S.M. (2006) Some peculiarities of titanium alloying with oxygen. In: *Proc. of Int. Sci.-Tech. Conf. on Ti-2006 in CIS (21–24 May, 2006, Suzdal, Russia)*. Kiev, Naukova Dumka, 253–257 [in Russian].
7. Ryabtsev, A.D., Troyansky, A.A. (2011) Refining and alloying of titanium in the process of electroslag remelting in a chamber furnace. *Advances in Electrometallurgy*, **9(1)**, 56–57.
8. Kollerov, M.Yu., Spektor, V.S., Skvortsova, S.V. (2015) Problems and prospectives of application of titanium alloys in medicine. *Titan*, **48(2)**, 42–53 [in Russian].
9. Ratiev, S.N., Ryabtseva, O.A., Troyansky, A.A. et al. (2010) Alloying titanium with oxygen from the gas phase in chamber electroslag remelting of titanium sponge. *Advances in Electrometallurgy*, **8(2)**, 87–92.

10. Egorova, Yu.B., Davydenko, L.V., Mamonov, I.M. (2015) Influence of oxygen alloying on mechanical properties of rods from titanium and Ti-6Al-4V alloy. *Int. Research J.*, 41(10), Pt 2, 49–51 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.41.154>
11. Kostenko, V.I., Kruglenko, M.P., Kalinyuk, A.N., Pap, P.A. (2012) Production by of defect-free titanium ingots with controlled oxygen content by electron beam remelting. *Advances in Electrometallurgy*, 10(1), 29–32.
12. Kablov, E.N. (2012) Strategic trends of development of materials and technologies of their processing for the period up to 2030. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, S, 7–17 [in Russian].
13. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
14. Akhonin, S.V., Kruglenko, M.P., Kostenko, V.I. (2011) Mathematical modeling of the process of dissolution of oxygen-containing refractory inclusions in a titanium melt. *Advances in Electrometallurgy*, 9(1), 13–18.

PRODUCTION OF TITANIUM INGOTS WITH REGULATED OXYGEN CONTENT
BY ELECTRON BEAM MELTING

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

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

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

²SC «SPC «Titan» of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine».

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

Comprehensive research work was performed to produce ingots of Grade 2 titanium alloy of 600 mm diameter and ingots of Grade 3 titanium alloy of 1100 mm diameter and up to 3 m length with regulated oxygen content of 0.12...0.16 % by the method of cold-hearth electron beam melting in the production facilities of SC «SPC «Titan» of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine» in multifunctional electron beam unit UE5810. A method of forming the charge billet and a formula for calculation of the amount of TiO₂ powder for alloying are proposed. Defectfree ingots of titanium alloys of Grade 2 and Grade 3 with a regulated oxygen content were produced and the range of deviation of its distribution in the ingot metal of ± 0.02 % was ensured. It is shown that the proposed modes of electron beam heating of the consumable billet, metal melting in the cold-hearth and in the mould, as well as the melting rate ensure complete dissolution of titanium dioxide particles in the cold hearth, and absence of defects in the produced ingots, enriched in oxygen. Ref. 14, Tabl. 1, Fig. 5.

Key words: cold-hearth electron beam melting; electron beam unit; titanium ingot; oxygen; regulated oxygen content; titanium dioxide; melting rate; macrostructure

Надійшла до редакції 22.06.2021

XX МІЖНАРОДНИЙ
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2021

16 - 19
листопада

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер:
Оборудование Инструмент

Ексклюзивний медіа партнер:
ЖУРНАЛ ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА

Технічний партнер:
RestMedia

IEC

Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ
Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр
www.tech-expo.com.ua