

ВИРОБНИЦТВО ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЗЛИВКІВ ТИТАНУ 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 великогабаритних зливок титанового сплаву Grade 2 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. Показано, що при виробництві великогабаритних зливок титану способом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю втрати енергії на випромінювання і випаровування необхідно компенсувати за рахунок продуктивності процесу плавки з урахуванням загальних втрат металу на випаровування. В результаті досліджень визначено, що вміст в металі отриманого зливку домішкових елементів відповідає вимогам стандарту, причому концентрація водню не перевищує 0,002 %, що в 7 разів менше максимально допустимого стандартом значення, а підвищеного вмісту кисню та азоту як в донній, так і в головній частинах зливка не виявлено. Показано, що в металі великогабаритного зливка титану, отриманого способом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю, відсутні внутрішні дефекти у вигляді неметалевих включень, пор і нещільностей та не спостерігається істотна різниця в макроструктурі центральної та периферійної зон зливка, яка характерна для зливок вакуумно-дугового переплаву. Бібліогр. 15, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: електронно-променева плавка з проміжною ємністю; електронно-променева установка; великогабаритний зливок; титан; домішковий елемент; ультразвуковий контроль; неметалеві включення; макроструктура

Титан, за сукупністю фізико-хімічних властивостей, є одним з найважливіших сучасних конструкційних матеріалів, який по поширеності в земній корі займає четверте місце, поступаючись лише алюмінію, залізу і магнію. Ця обставина дозволяє вважати його майже універсальним і необхідним матеріалом для різних конструкцій нової техніки в усіх галузях сучасної промисловості.

На даний момент титан та його сплави виробляються способами спеціальної електрометалургії: вакуумно-дуговим переплавом (ВДП); плазмово-дуговим переплавом (ПДП); вакуумно-індукційною плавкою (ВІП); електрошлаковою технологією (ЕШТ) плавки титану; електронно-променевою плавкою (ЕПП) титану [1–4].

Найбільшого поширення набула технологія вакуумно-дугового переплаву витратного електрода. З точки зору рафінування металу і видалення неметалевих включень високої і низької щільності найбільш перспективною є електронно-променева плавка з проміжною ємністю (ЕППЄ). При ЕППЄ можливо в широких межах регулювання швидкості плавлення зливка, завдяки незалежному джерелу нагріву, що, в свою чергу, дозволяє регулювати тривалість перебування металу в рідкому перегрітому стані. ЕППЄ є технологією, що дозволяє практично повністю за-

безпечити видалення тугоплавких включень високої і низької щільності [3, 5]. Процес ЕППЄ здійснюється в вакуумі 0,1...0,01 Па, що практично виключає додаткове забруднення титану газовими домішками, що дозволяє використовувати в якості вихідної шихти до 100 % брухту та губчастого титану зниженої якості без його попереднього пресування в витратний електрод. Технологія ЕППЄ також дозволяє виплавляти зливки титанових сплавів як круглого, так і квадратного перетину, а також зливки-сляби [6].

Підвищення ККД енергетичних установок вимагає створення парових і газових турбін великої потужності. Для збільшення потужності необхідне збільшення деяких параметрів турбін і передусім габаритів основних деталей — роторів і дисків. Для виробництва таких деталей потрібні напівфабрикати у вигляді зливок великих розмірів, але масштабний фактор значно впливає на структуру та властивості металу зливок. Як відзначають сучасні дослідники, для класичного процесу ВДП існують критичні розміри зливок, вище яких неможливо отримати зливок задовільної якості. А також, що при виробництві зливок титанових сплавів способом ВДП через нестабільний рух дуги або різкі зміни режиму потоку рідкого металу виникають нестабільні умови кристалізації, що призводить до ймовірності ви-

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>

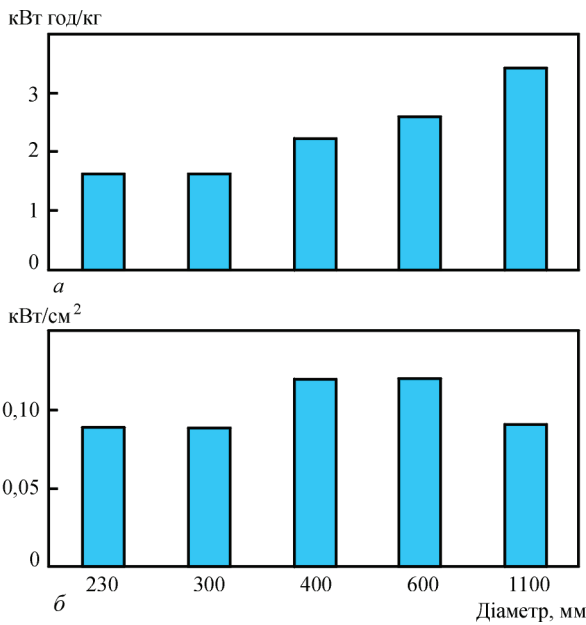


Рис. 1. Залежність витрати електроенергії (а) та питомої потужності електронно-променевого нагріву (б) від діаметра зливка

никнення ряду дефектів у зливку, та рекомендують зменшення швидкості процесу вакуумно-дугового плавлення або використання плазмово-дугового переплаву та електронно-променевої плавки з проміжною ємністю [7–11]. Тому в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України проведено комплексні дослідницькі роботи по отриманню великогабаритних зливків титану способом електронно-променевої плавки [12]. З метою оптимізації процесу плавки та отримання зливків з гарантованим хімічним складом, а також мінімізації втрат на випаровування при ЕПП великогабаритних зливків титану проведені математичні розрахунки технологічних параметрів нагріву поверхні зливка в кристалізаторі, за результатами яких було встановлено залежність глибини рідкої ванни

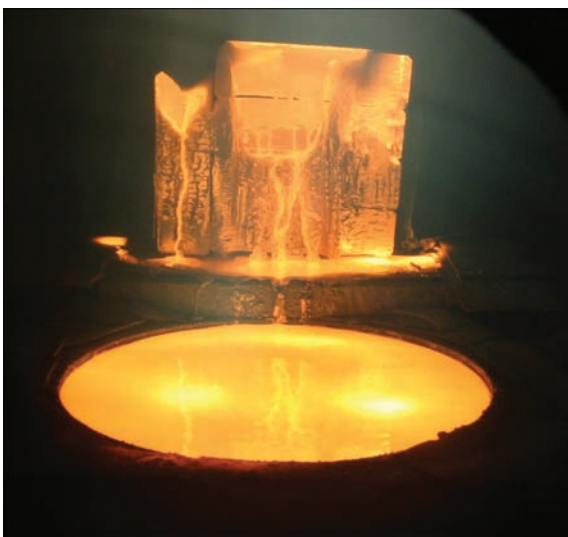


Рис. 2. Процес плавки зливка діаметром 1100 мм титанового сплаву Grade 2

і загальних втрат металу на випаровування від продуктивності процесу плавки [12].

Встановлено, що при ЕППЄ в результаті збільшення площі рідкого металу в проміжній ємності та кристалізаторі відбувається зростання втрат енергії на випромінювання і випаровування [13]. Тому виплавка великогабаритних зливків титану вимагає підвищеної уваги до енергетичних аспектів процесу плавки. Втрати енергії на випромінювання і випаровування повинні компенсуватися продуктивністю процесу плавки з урахуванням загальних втрат металу на випаровування. Необхідно також враховувати, що з точки зору теорії кристалізації глибина рідкої ванни в кристалізаторі не повинна перевищувати половини діаметра зливка. Так було встановлено, що при збільшенні діаметра циліндричного зливка збільшується витрата електроенергії для виробництва 1 кг зливка. При цьому максимальна питома потужність електронно-променевого нагріву спостерігається для зливків діаметром 400...600 мм (рис. 1).

Можливості отримання зливків титану великих діаметрів сприяє введення в експлуатацію потужних установок електронно-променевого переплаву з проміжною ємністю. Так, в ході дослідницьких робіт проводили виплавку (рис. 2) великогабаритних зливків з титанового сплаву Grade 2 на виробничих потужностях ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» в багатофункціональній електронно-променевої установці UE5810 (рис. 3) з використанням запропонованих режимів електронно-променевого нагріву зливка в кристалізаторі. Конструкція установки відрізняється високою технологічністю при проведенні деяких процесів, що досягається шляхом нескладної заміни одного технологічного оснащення на інше, що дозволяє проводити плавку зливків круглого перетину діаметром до 1200 мм, прямокутного — до 420×1300 мм і довжиною до 4000 мм, а також дає можливість обплавляти бічну поверхню зливків для виключення механічної обробки.

В результаті проведених досліджень були отримані великогабаритні зливки з титанового сплаву Grade 2 діаметром 1100 мм та довжиною до 3 м (рис. 4, а).

Дослідження якості виплавленого зливка показали, що його поверхня після охолодження в вакуумі чиста, на поверхні 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.

Для подальшої деформаційної обробки поверхневий шар отриманого методом ЕППЄ вели-



Рис. 3. Багатофункціональна електронно-променева установка UE5810

когабаритного зливка титанового сплаву Grade 2 діаметром 1100 мм був видалений на глибину до 10 мм шляхом механічної обробки (рис. 4, б).

Дослідження хімічного складу отриманого зливка показали (таблиця), що вміст домішкових елементів відповідає вимогам стандарту титанового сплаву Grade 2, причому концентрація водню в титані не перевищує 0,002 %, що в 7 разів менше максимально допустимого стандартом значення. Підвищеного вмісту кисню та азоту як в донній, так і в головній частинах зливка не виявлено.

Найважливішим критерієм якості титанових зливків є відсутність в металі неметалевих включень, особливо у вигляді азотовмісних альфованих частинок або нітридів титану [14]. Ці частинки, утворюючи дефекти, негативно впливають на механічні властивості титанових сплавів тому, що механічні властивості (твердість і пластичність) газовмісних включень помітно відрізняються від відповідних характеристик матриці сплаву. Дефекти у вигляді тріщин зароджуються в зоні контакту дефект–матриця при навантаженні, що призводить до катастрофічного руйнування сильно навантажених деталей [14, 15]. При переплаві титану за технологією електронно-променевої плавки з проміжною ємністю створюються термічні і фізико-хімічні умови, що забезпечують видалення вищевказаних включень.

Для визначення в титанових зливках внутрішніх дефектів у вигляді неметалевих включень, пор і нещільностей використовували метод ультразвукової дефектоскопії. Дослідження зливків проводили шляхом послідовного ручного сканування бічної поверхні по радіусу уздовж поздовжньої осі зливка. Для забезпечення охоплення всього обсягу зливка скануванню піддавали всю його бокову поверхню.

Наявність різнозернистості та крупнозернистої структури в литому металі при проведенні ультразву-

кового неруйнівного контролю зазвичай викликає збільшення коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль і є причиною зниження амплітуди донного сигналу відлуння. При контролі зливка діаметром 1100 мм використовували перетворювач ультразвуковий П121-1,25-40-М-003 частотою 1,25 МГц, який забезпечує менший коефіцієнт загасання і краще співвідношення сигнал/шум.

При дослідженні зливка спостерігалися множинні відлуння малої амплітуди. Це типово для литого металу і є результатом відображення сиг-



Рис. 4. Зовнішній вигляд зливка титанового сплаву Grade 2 діаметром 1100 мм після ЕППЕ (а) та механічної обробки (б)

Хімічний склад металу зливка діаметром 1100 мм титанового сплаву Grade 2, отриманого способом ЕППЄ, мас. %

Сплав	Частина зливка	Місце відбору проби	С	Fe	O	N	H	Інші елементи	
								max кожного	max всього
Grade 2	Верх	Поверхня	0,01	0,05	0,10	0,01	0,002	–	0,13
		1/2 радіусу	0,01	0,05	0,10	0,01	0,002	–	0,11
		Центр	0,01	0,04	0,10	0,01	0,002	–	0,11
	Середина	Поверхня	0,01	0,04	0,10	0,01	0,002	–	0,12
		Поверхня	0,02	0,06	0,12	0,02	0,002	–	0,12
		1/2 радіусу	0,01	0,06	0,12	0,01	0,002	–	0,10
Низ	1/2 радіусу	0,01	0,06	0,12	0,01	0,002	–	0,10	
	Центр	0,01	0,05	0,12	0,01	0,002	–	0,10	
ASTM B348-10			0,08	0,30	0,25	0,03	0,015	0,10	0,40



Рис. 5. Типовий УЗК скан середньої частини зливка діаметром 1100 мм

налу від границь зерен (рис. 5). Проведеним аналізом не виявлено відлуння, які можна було б інтерпретувати як великі неметалеві включення, пори та усадкові раковини. На скані чітко визначається відлуння донного імпульсу. В районі введення зондуючих сигналів присутні шуми, які обумовлені нещільним приляганням датчика до поверхні зливка, яке не вдається компенсувати застосуванням ущільнюючої рідини.

Макроструктуру зливка вивчали на поперечних темплетях, які вирізали на відстані 150 мм від головної та донної частин зливка. Виявлення структури проводили травленням темплетів у 15%-ному розчині фтористої кислоти з додаванням 3%-ної азотної кислоти при кімнатній температурі.

Аналіз макроструктури зливка діаметром 1100 мм показав, що отриманий метал щільний, однорідний, з відсутністю зон по перетину зливка, що по-різному травляться (рис. 6). Істотної різниці в структурі центральної і периферійної зон зливка не спостерігається, характерної для зливоків ВДП сегрегації легуючих елементів не виявлено. Макроструктура металу на досліджуваному темплеті характеризувалася кристаллами близькими до рівноважних розміром від 25 до 50 мм.

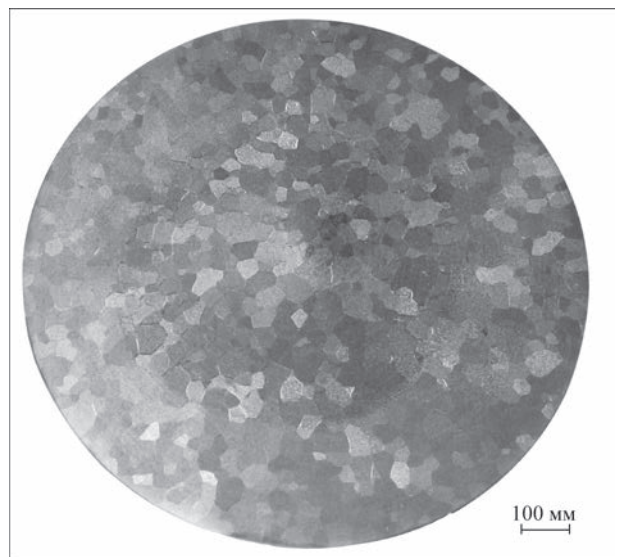


Рис. 6. Макроструктура зливка діаметром 1100 мм сплаву Grade 2

Таким чином, технологія ЕППЄ дає можливість отримувати великогабаритні зливки титану та його сплавів, які відповідають всім вимогам, що пред'являються промисловістю до якості їх металу, та дозволяє організувати в Україні конкурентоспроможне виробництво таких зливоків.

Висновки

1. Проведені дослідницькі роботи показали, що при виробництві великогабаритних зливоків титану способом ЕППЄ втрати енергії на випромінювання і випаровування необхідно компенсувати за рахунок продуктивності процесу плавки з урахуванням загальних втрат металу на випаровування.

2. Встановлено, що в металі отриманого великогабаритного зливка діаметром 1100 мм титанового сплаву Grade 2 вміст домішкових елементів відповідає вимогам стандарту, причому концентрація водню не перевищує 0,002 %, що в 7 разів менше максимально допустимого стандартом значення, а підвищеного вмісту кисню та азоту як в донній, так і в головній частинах зливка не виявлено.

3. Дослідження якості отриманого зливка показало, що в металі відсутні внутрішні дефекти у вигляді неметалевих включень, пор і нещільностей та не спостерігається істотна різниця в макроструктурі центральної та периферійної зон зливка, що характерна для зливок ВДП.

Список літератури

1. Каблов Е.Н. (2012) Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. *Авиационные материалы и технологи*, **8**, 7–17.
2. Рябцев А.Д., Троянский А.А., Фридрих Б. и др. (2014) Легирование титана углеродом в процессе камерного электрошлакового переплава. *Современная электрометаллургия*, **2**, 3–9.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС-МАТИ.
4. Леоха Ф.Л., Ратиев С.Н. (2012) Современные способы получения сплавов титана, легированных кислородом. *Наукoві праці Донецького національного технічного університету. Сер. Металургія*, **1–2**, 85–94.
5. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. (2008) *Електронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреакционных металлов*. Киев, Наукова думка.
6. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахоин С.В. (2003) Перспективные технологии электронно-лучевой плавки титана. *Титан*, **2**, 20–25.
7. Kelkar K., Mitchell A. (2020) *Beta Fleck formation in Titanium Alloys the 14th World Conference on Titanium (Ti 2019) MATEC Web of Conferences*, **321**, 1001. doi.org/10.1051/mateconf/202032110001.
8. Mitchell A., Kawakami A. (2007) Segregation and solidification in titanium alloys. *Ti-2007 Science and Technology*. The Japan Institute of Metals. https://cdn.ymaws.com/titanium.site-ym.com/resource/resmgr/ZZ-WCTP2007-VOL1/2007_Vol_1_Pres_35.pdf
9. Hongchao Kou, Yingjuan Zhang, Pengfei Li et al. (2014) Numerical simulation of titanium alloy ingot solidification structure during VAR process based on three-dimensional CAFE method. *Rare Metal Materials and Engineering*, **43(7)**, 1537–1542. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(14\)60120-X](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(14)60120-X).
10. Gao L., Huang H., Jiang Y. et al. (2020) Numerical study on the solid–liquid interface evolution of large-scale titanium alloy ingots during high energy consumption electron beam cold hearth melting. *JOM*, **72**, 1953–1960. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04089-5>
11. Zhang Yong, Kou Hongchao, Li P. et al. (2012). Simulation on solidification structure and shrinkage porosity (hole) in TC4 ingot during vacuum arc remelting process. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys*, **32**, 418–421.
12. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Березос В.А. и др. (2010) Производство крупногабаритных слитков жаропрочных сплавов на основе титана методом электронно-лучевой плавки. *Современная электрометаллургия*, **3**, 11–14.
13. Жук Г.В., Тригуб Н.П., Фесан А.А. (2008) Энергетические характеристики процесса ЭЛПЕ титановых сплавов. *Там же*, **4**, 20–21.
14. Соболевская Т.Д., Гишкина В.И., Коваленко Т.А. (2009) Влияние качества губчатого титана на наличие дефектов в полуфабрикатах и деталях из титановых сплавов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудівництві*, **2**, 50–54.
15. Илларионов А.Г., Попов А.А. (2014) *Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие*. Екатеринбург, Издательство Уральского университета.

References

1. Kablov, E.N. (2012) Strategic directions in development of materials and technologies of their processing up to 2020. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **8**, 7–17 [in Russian].
2. Ryabtsev, A.D., Troyansky, A.A., Fridrikh, B. et al. (2014) Alloying of titanium with carbon in the process of chamber electroslag remelting. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 3–9 [in Russian].
3. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) Titanium alloys. *Composition, structure, properties*. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
4. Leokha, F.L., Ratiev, S.N. (2012) Modern methods for producing titanium alloys doped with oxygen. *Naukovi Pratsi DNTU. Ser. Metalurgiya*, **1–2**, 85–94 [in Russian].
5. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (2008) *Electron beam melting of refractory and high-reactive metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (2003) Promising technologies of electron beam melting of titanium. *Titan*, **2**, 20–25 [in Russian].
7. Kelkar, K., Mitchell, A. (2020) *Beta Fleck formation in Titanium Alloys the 14th World Conference on Titanium (Ti 2019) MATEC Web of Conferences*, **321**, 1001. doi.org/10.1051/mateconf/202032110001.
8. Mitchell, A., Kawakami, A. (2007) Segregation and solidification in titanium alloys. *Ti-2007 Science and Technology*. The Japan Institute of Metals. https://cdn.ymaws.com/titanium.site-ym.com/resource/resmgr/ZZ-WCTP2007-VOL1/2007_Vol_1_Pres_35.pdf
9. Hongchao Kou, Yingjuan Zhang, Pengfei Li et al. (2014) Numerical simulation of titanium alloy ingot solidification structure during VAR process based on three-dimensional CAFE method. *Rare Metal Materials and Engineering*, **43(7)**, 1537–1542. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(14\)60120-X](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(14)60120-X).
10. Gao, L., Huang, H., Jiang, Y. et al. (2020) Numerical study on the solid–liquid interface evolution of large-scale titanium alloy ingots during high energy consumption electron beam cold hearth melting. *JOM*, **72**, 1953–1960. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04089-5>
11. Zhang Yong, Kou Hongchao, Li, P. et al. (2012). Simulation on solidification structure and shrinkage porosity (hole) in TC4 ingot during vacuum arc remelting process. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys*, **32**, 418–421.
12. Paton, B.E., Trigub, N.P., Berezos, V.A. et al. (2010) Production of large ingots of titanium-based creep-resisting alloys by electron beam melting. *Advances in Electrometall.*, **3**, 168–171.
13. Zhuk, G.V., Trigub, N.P., Fesan, A.A. (2008) Energy characteristics of EBCHM process of titanium alloys. *Ibid.*, **4**, 13–15.
14. Sobolevskaya, T.D., Gishkina, V.I., Kovalenko, T.A. (2009) Influence of quality of sponge titanium on presence of defects in semi-finished products and parts from titanium alloys. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metalurgii ta Mashynobudivnytstvi*, **2**, 50–54 [in Russian].
15. Illarionov, A.G., Popov, A.A. (2014) *Technological and service properties of titanium alloys: Tutorial*. Ekaterinburg, Izdvo Ural. Un-ta [in Russian].

PRODUCTION OF LARGE-SIZED TITANIUM INGOTS
BY THE METHOD OF ELECTRON BEAM MELTING

S.V. Akhonorin¹, 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 Malevych 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 was performed on producing large-sized ingots of 1100 mm dia and up to 3 m length from Grade 2 titanium alloy 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 a multifunctional electron beam unit UE5810. It is shown that in production of large-sized titanium ingots by cold-hearth electron beam melting the energy losses for radiation and evaporation should be compensated by the efficiency of the melting process, taking into account the general metal losses for evaporation. As a result of the studies, it was determined that the content of impurity elements in the metal of the produced ingot meets the requirements of the standard, hydrogen concentration being not higher than 0.002 % that is 7 times smaller than the maximum value allowed by the standard, and no increased content of oxygen or nitrogen was found either in the ingot bottom or head parts. It is shown that the metal of the large-sized titanium ingot produced by cold-hearth electron beam melting has no internal defects in the form of nonmetallic inclusions, pores or discontinuities, and no significant difference is observed between the macrostructure of the ingot central and peripheral zones, which is characteristic for ingots in vacuum arc remelting. Ref. 15, Tabl. 1, Fig. 6.

Key words: cold-hearth electron beam melting; electron beam installation; large-sized titanium ingot; titanium; impurity element; ultrasonic testing; nonmetallic inclusions; macrostructure

Надійшла до редакції 20.05.2021

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111X
doi.org/10.37434/as
Передплатний індекс 70031

Видається з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0957-798X
doi.org/10.37434/trwj
Передплатний індекс 21791

Журнали входять до Переліку наукових фахових видань України

(380-44) 200-8277
journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.37434/dnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.37434/sem
Передплатний індекс 70693