

ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ВИПЛАВКА У ВІДКРИТОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ ЗЛИВКІВ З ВІДХОДІВ ЛИСТОВИХ ОБРІЗКІВ ТИТАНУ ВТ1-0

Д.І. Білоник¹, О.В. Овчинников¹, І.М. Білоник¹,
О.Є. Капустян¹, С.О. Шумикін¹, Д.В. Распорня², Ю.М. Савонов¹

¹Національний університет «Запорізька політехніка».

69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64. E-mail: aek@zntu.edu.ua

²Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України. 03028, м. Київ, просп. Науки, 46

Обґрунтована доцільність проведення досліджень електрошлакового процесу у відкритому кристалізаторі для отримання титанових зливків з використанням витратних електродів, виготовлених з кондиційних відходів листових обрізків в титану ВТ1-0. Наведені результати дослідження отриманих титанових зливків діаметром 85 мм і перерізом 90×90 мм. Виплавку проводили на електрошлаковій установці А-550, флюс — CaF_2 (100 %). Для виключення критичного розігріву витратних титанових електродів та окислення їх поверхні встановили ковзний струмопідвід на верхньому фланці кристалізатора. Оптимальні технологічні параметри електрошлакового виплавлення визначали на основі аналізу форми та глибини металевої ванни, яку фіксували вольфрамовою крупкою при швидкостях наплавлення $0,9 \cdot 10^{-2}$; $1,1 \cdot 10^{-2}$ та $1,7 \cdot 10^{-2}$ кг/с. На отриманих з оптимальною швидкістю наплавлення ($0,9 \cdot 10^{-2}$ кг/с) зливках оцінювали стан поверхні та хімічний склад. Поверхня зливків гладка, перетини та гофри відсутні. Хімічний склад зливків, мас. %: Ti — основа; С — 0,024; Fe — 0,06; Si — 0,05; O_2 — 0,25; N_2 — 0,058; H_2 — 0,0016. Відповідає вимогам ГОСТ 19807–91 для нелегованого титану ВТ1-0 за винятком підвищеного вмісту кисню та азоту, повністю відповідає хімічному складу марки ВТ1-2 та цілому ряду нелегованого титану зарубіжних виробників. Проведені дослідження показали принципову можливість застосування технології електрошлакової виплавки у відкритому кристалізаторі з ковзним струмопідводом для отримання зливків з відходів листового титану ВТ1-0. Бібліогр. 28, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: титан ВТ1-0; електрошлаковий процес; зливки; флюс; витратний електрод; хімічний склад

Вступ. Одним з перспективних напрямків у виробництві деталей машин та обладнання зі спеціальних високолегованих сплавів (нікелю, хрому, титану, міді, алюмінію, магнію) є застосування напівфабрикатів або фрагментів з цих матеріалів. Фрагментарне виробництво має істотні переваги як технологічні, так і ресурсозберігаючі. Це ставить дану технологію в ряд економічно привабливих і затребуваних. Тому дослідження і розробка технологічних процесів для отримання напівфабрикатів зі спеціальних сплавів є своєчасними та доцільними.

Напівфабрикати з титану та його сплавів знайшли широке застосування при виготовленні виробів для авіаційної і космічної промисловості, підприємств кольорової металургії, хімічних виробництв, обладнання шельфового нафтовидобутку [1–3].

В Національному університеті «Запорізька політехніка» на кафедрах «Обладнання та технологія зварювального виробництва» і «Обробка металів тиском», а також в Науково-дослідному центрі «Титан-Запоріжжя» проведені численні дослідження при розробці комплексної технології, яка об'єднує процеси порошкової металургії та зварювання для виготовлення деталей з титанових напівфабрикатів та включає наступні етапи:

отримання вихідної сировини (порошок необхідного хімічного складу і фракції). Методи отримання: розпорошення рідкого титану, механічне подрібнення губчастого титану та ін.;

виготовлення напівфабрикатів необхідної форми і розмірів з титанових порошків холодним пресуванням і наступним спіканням;

формування конкретної деталі з отриманих напівфабрикатів, як правило виконують електронно-променевим та лазерним зварюванням, дуговими способами, зварюванням тертям.

Проведені роботи з металографічних досліджень, визначення корозійної стійкості, жароміцності, витривалості, технологічних властивостей титанових напівфабрикатів [4–9] значно розширили наукові, практичні та економічні уявлення концепції виготовлення деталей машин і обладнання з титанових напівфабрикатів і показали значні переваги даної технології.

На сьогодні найбільш поширеною технологічною схемою виробництва титанових напівфабрикатів є термомодеформаційна обробка зливків. Питання зниження собівартості титанових зливків, з яких надалі виготовляють напівфабрикати, завжди є важливим та актуальним. Для його вирішен-

Д.І. Білоник — <https://orcid.org/0000-0003-3274-0604>, О.В. Овчинников — <https://orcid.org/0000-0002-5649-1094>,

І.М. Білоник — <https://orcid.org/0000-0002-3873-5307>, О.Є. Капустян — <https://orcid.org/0000-0002-8979-8076>,

С.О. Шумикін — <https://orcid.org/0000-0003-3407-2507>, Д.В. Распорня — <https://orcid.org/0000-0001-7738-7790>

ня доцільно дослідити можливість застосування електрошлакового процесу. В даному випадку виробництво титанових напівфабрикатів полягає у виготовленні витратних електродів, їх переплаву в зливки потрібної форми та розмірів, подальших термодформаційній або механічній обробці різанням чи використанням без обробки.

Пріоритет у дослідженні застосування електрошлакового процесу для отримання титанових злиwkів належить ІЕЗ ім. Є.О. Патона [10, 11]. В результаті проведених досліджень була розроблена технологія електрошлакової плавки, що забезпечує значні переваги в порівнянні з існуючими промисловими вакуумними способами плавки. Переконаливо доведено, що одноразова електрошлакова плавка витратних електродів, пресованих із високоякісної титанової губки, при застосуванні флюсу АН-Т2 дозволяє отримувати технічний титан ВТ1 і сплав ОТ4 з властивостями, які не поступаються титану, що виплавлений у вакуумно-дуговій печі двократним переплавом. У роботах [10, 11] з метою захисту витратного електрода і шлакового розплаву від взаємодії з киснем і азотом повітря застосовували захисну камеру, яку перед плавкою попередньо вакуумували до залишкового тиску $(3...5) \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., а потім заповнювали аргоном.

Наукові дослідження по електрошлаковому переплаву пресованих з губки титанових електродів наведено в роботах [12, 13]. Встановлено, що механічні властивості титанових сплавів незалежно від способу виплавки (подвійний ВДП або одноразовий ЕШП) визначаються, в першу чергу, чистотою титанової губки, з якої виготовляють витратні електроди.

Подальший розвиток технології виплавки злиwkів титану та його сплавів із застосуванням електрошлакового процесу пов'язано зі створенням печей камерного типу та розробкою нових флюсів [14–16]. У цих установках підтримується вакуум або захисна інертна атмосфера і застосовуються флюси на основі чистого фтористого кальцію з добавками лужних та лужноземельних елементів і металевого кальцію, що забезпечує ефект рафінування титану.

В електрошлакових печах камерного типу також можливо вести виплавку титанових злиwkів в дуговому режимі, так званий дуговий шлаковий переплав [17, 18]. Удосконалення захисту розплавленого шлаку і титанового електрода від кисню, водню та азоту повітря (флюсові затвори в комбінації з інертним середовищем) значно розширюють технологічні та металургійні можливості дугового електрошлакового процесу.

Технологічні особливості процесу камерного електрошлакового переплаву (КЕШП) дозволяють активно впливати на механічні властивості титану, застосовуючи додаткове легування киснем.

Якщо раніше в титані кисень вважали шкідливою домішкою та обмежували його вміст не більше 0,2 % [19], то в роботах [15, 20,] доведена доцільність легування титану киснем з метою підвищення характеристик міцності. В роботі [21] легування титану ВТ1-0 киснем здійснювали в процесі КЕШП. Кисень вводили за допомогою спеціальної лігатури і при підвищенні його вмісту до 0,4 % міцність литого титану знаходилась в межах 700...720 МПа.

Слід також зазначити, що цілий ряд зарубіжних марок нелегованого титану також характеризується більш високим вмістом домішок (таблиця) в порівнянні з вимогами до титану ВТ1-0. Це свідчить про те, що ці марки титану, скоріш за все, використовують в умовах експлуатації, для яких підвищений вміст домішок в титані не впливає негативно на працездатність виробів або, навіть навпаки, іноді підвищує їх працездатність. Наприклад, в роботі [22] доведено, що в сплавах титану з підвищеним вмістом кисню корозійна стійкість в 40 % H_2SO_4 та 70 % H_2SO_4 зростає майже в три рази у порівнянні з чистим титаном.

Безумовно, електрошлаковий процес у відкритому кристалізаторі набагато економічніший в порівнянні з вакуумними технологіями (ВДП, ВГП, ЕЛП, ПДП, КЕШП). Крім того, в нашому випадку витратні електроди виготовлені з кондиційних відходів листової обрізи титану ВТ1-0. Це також додатково та суттєво знизить собівартість злиwkів. Тому доцільно провести дослідження можливості застосування електрошлакового процесу у відкритому кристалізаторі для отримання титанових злиwkів.

Мета цієї роботи — дослідити особливості електрошлакового процесу у відкритому кристалізаторі витратних електродів, виготовлених з кондиційних відходів листової обрізи титану ВТ1-0 та визначити основні показники металургійної якості титану отриманих злиwkів.

Матеріали та методики досліджень. Витратні електроди виготовляли з відходів листових обрізків кондиційного титану ВТ1-0 (рис. 1). Застосовували рубку смуг в розмір на гільйотині і подальше їх аргонодугове зварювання. Переріз електродів 35×35 мм, довжина 2000 мм.

Плавки проводили на електрошлаковій установці А-550 з трансформатором ТШС 3000-1. Кристалізатори мідні водоохолоджувані: діаметр 85 мм, переріз 90×90 мм. Флюс — CaF_2 (100 %), прогартовка при $T = 900$ °С протягом 2-х годин. Захисний газ — аргон, який подавали на поверхню шлакової ванни, а також в простір між верхнім фланцем кристалізатора і шлакової ванни. Температуру поверхні витратного електрода вимірювали за допомогою пірометра СМ-1150Л Venetech.

Вибір оптимального режиму електрошлакової плавки з використанням ковзного струмопідводу

Хімічний склад нелегованого титану різних країн, мас. % [19, 23–27]

Марка сплаву	Fe	O	H	N	C	Країна
BT1-0*	0,25	0,20	0,010	0,04	0,07	Україна
BT1-2	1,5	0,30	—»—	0,15	0,10	—»—
BT1Л	0,3	0,2	0,015	0,05	0,15	—»—
IMI 130	0,20	0,25	—	0,03	0,10	Великобританія
IMI 155 (2TA6)	0,20	0,38	—	—»—	—»—	—»—
IMI 160	0,20	0,40	0,015	0,05	—»—	—»—
RT-18	0,35	—»—	0,125	0,07	—»—	Німеччина
7055, Ti ₃ **	0,30	0,25	—	0,05	—»—	—»—
7065, Ti ₄ **	0,35	0,30	—	0,07	—»—	—»—
KS85	0,40	0,40	—	0,05	—	Японія
Class 3	0,30	0,30	—	0,07	0,1	—»—
Ti-P.02; T-40	0,12	0,25	—	0,05	0,08	Франція
Ti-P.03; T-50	0,25	0,35	—	0,07	—»—	—»—
Ti-P.04; T-60	0,30	0,40	—	0,08	—»—	—»—
LOW-COST	1,0...1,5	0,50	—	0,05	—»—	Росія
Grade2	0,30	0,25	0,015	0,03	—»—	США
Grade3	—»—	0,35	—»—	0,05	—»—	—»—
Grade4	0,50	0,40	—»—	—»—	—»—	—»—

Примітка. 1. *Допускається масова частка алюмінію не більше 0,70 %. 2. Напівжирним виділено значення, що перевищують відповідний показник для сплаву BT1-0. 3. **Показник не нормується.

проводили згідно рекомендацій [28]. Швидкість наплавлення зливків діаметром 85 мм складала, $\times 10^{-2}$ кг/с: 0,9; 1,1 та 1,7. Під час плавки фіксували форму металевої ванни вольфрамовою крупкою, на поздовжніх шліфованих макротемплетях виявляли форму металевої ванни та заміряли її глибину.

Хімічний склад отриманих електрошлакових зливків визначали спектральним методом (ГОСТ 19863.1–91, ГОСТ 19863.12–91) спектрометром SPECTROMAX фірми «SPECTRO». Вміст кисню та азоту визначали газоаналізатором ON 900 фірми «ELTRA», а водню — газоаналізатором RHEN-602.

Результати експериментів та їх аналіз. Плавки починали твердим стартом. В результаті перших плавок візуально зафіксували сильний розігрів витратних електродів, що обумовлено високим електроопором титану і значним вильотом витратного електрода. При вимірюванні температури витратного електрода встановили, що орієнтовно через 2...3 хв з початку плавки його температура складала 400...500 °С. При цьому підвищувався електричний



Рис. 1. Відходи листових обрізків кондиційного титану BT1-0

опір витратного електрода, що викликало зменшення струму плавки та дефекти на поверхні зливків.

Щоб зменшити струмоведучий виліт витратного електрода та відповідно температуру його розігріву, а також забезпечити стабільність електричних параметрів на верхньому фланці кристалізатора встановили ковзний струмопідвід (рис. 2). В результаті виключили розігрів витратного електрода на більшій ділянці його довжини, чим суттєво знизили можливість насичення поверхні титанового електрода газами повітря, а також стабілізували електричний режим.

Форма металевої ванни при різних швидкостях наплавлення наведена на рис. 3. Оптимальною

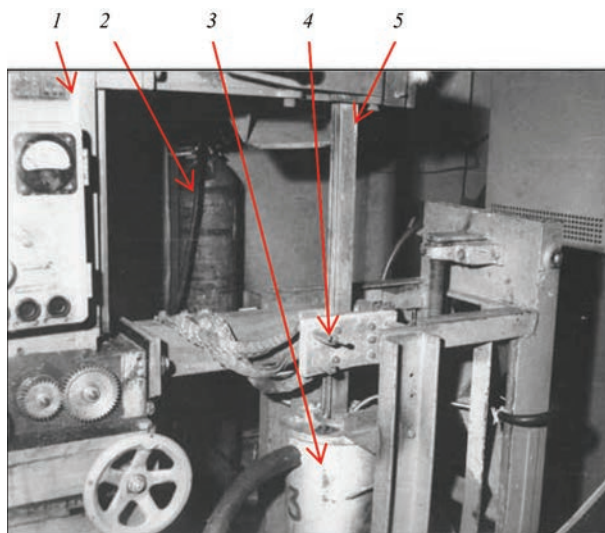


Рис. 2. Зовнішній вигляд дослідної установки: 1 — електрошлакова установка А-550; 2 — балон з аргоном; 3 — кристалізатор мідний водоохолоджуваний діаметром 85 мм; 4 — ковзний струмопідвід; 5 — витратний електрод

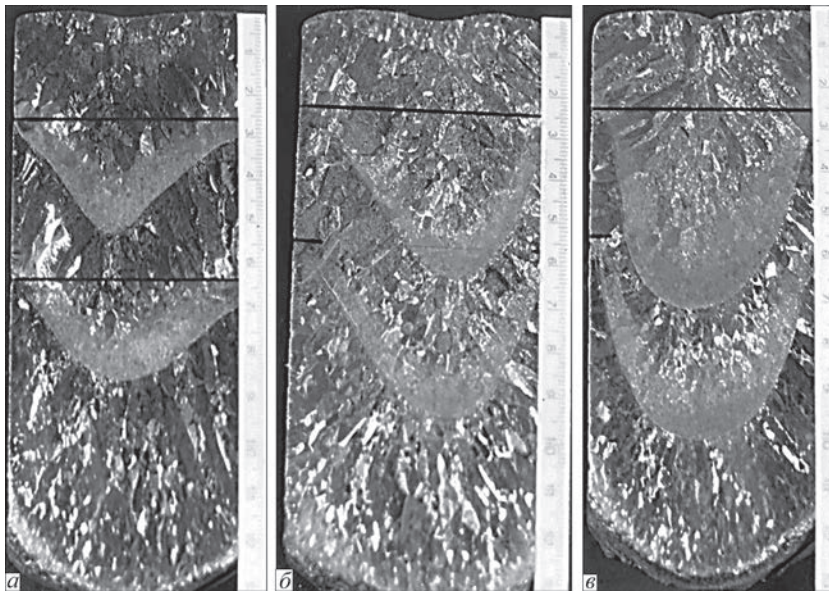


Рис. 3. Форма металевої ванни в зливках діаметром 85 мм при швидкості наплавлення, $\times 10^{-2}$ кг/с: 0,9 (а); 1,1 (б); 1,7 (в)

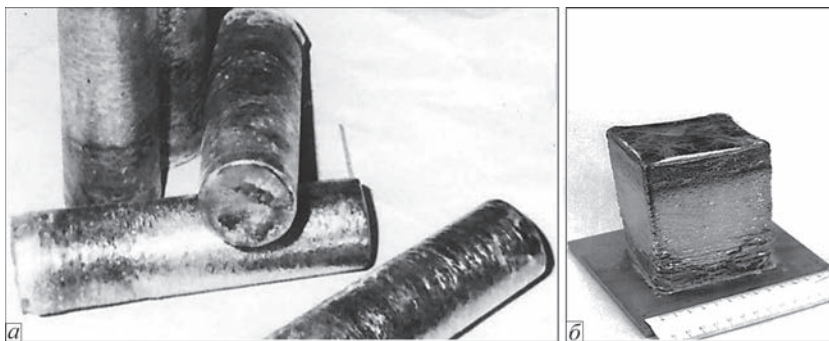


Рис. 4. Зовнішній вигляд отриманих титанових зливок діаметром 85 мм (а) та перерізом 90×90 мм (б)

швидкістю наплавлення електрошлакового зливка є така, при котрій глибина металевої ванни дорівнює радіусу зливка [28]. Таким чином, для наших умов оптимальна швидкість наплавлення — $0,9 \cdot 10^{-2}$ кг/с (рис. 3, а). При цьому струм плавки становить 2300...2500 А, а напруга — 31 В.

На оптимальному режимі із застосуванням ковзного струмопідводу було виплавлено декілька зливок діаметром 85 мм і перерізом 90×90 мм (рис. 4) для дослідження стану поверхні, хімічного складу, макро- і мікроструктури, механічних та технологічних властивостей.

Встановлено, що поверхня зливок гладка, перетини, гофри та інші дефекти відсутні (рис. 4). Це свідчить про правильний вибір параметрів режиму та їх стабільність під час плавки.

Хімічний склад отриманих зливок наступний, мас. %: С — 0,024; Fe — 0,06; Si — 0,05; O_2 — 0,247; N_2 — 0,058; H_2 — 0,0016. Результати свідчать, що отримані електрошлакові титанові зливки у порівнянні з вимогами ГОСТ 19807–91 містять більш високу кількість кисню і азоту. На наш погляд, це, можливо, викликано не достатньо ефективним захистом розігрітої частини витратного електрода та поверхні шлакової ванни. Але

слід зазначити, що в сучасному машинобудуванні застосовується значна кількість марок нелегированого титану як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва (RT-18, 3.7055, Ti3, 3.7065, Ti4 (Німеччина), Class 3 (Японія), Ti-P.03; T-50, Ti-P.04; T-60 (Франція)), які мають ще більший вміст як кисню, так і азоту (див. таблицю).

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення структури, механічних та технологічних властивостей електрошлакового титану.

Висновки

1. Проведені дослідження показали принципову можливість застосування технології електрошлакової виплавки у відкритому кристалізаторі з ковзним струмопідводом для отримання зливок з відходів листового титану VT1-0.

2. Встановлено, що для електрошлакової виплавки зливок титану діаметром 85 мм та перерізом 90×90 мм за технологією, що пропонується, оптимальна швидкість наплавлення становить $0,9 \cdot 10^{-2}$ кг/с, струм наплавлення — 2300...2500 А, напруга — 31 В, флюс CaF_2 (100 %).

3. Порівняльний аналіз хімічного складу довів, що в отриманих електрошлакових зливках

вміст кожної з основних домішок не перевищує їх вміст у порівнянні з такими марками нелегованого титану, як VT1-2, RT-18, 3.7055, Ti3, 3.7065, Ti4, Class 3, Ti-P.03, T-50; Ti-P.04, T-60. Але в порівнянні з титаном VT1-0 за ГОСТ 19807–91 в отриманих зливках вміст кисню та азоту більше на 0,05 та 0,018 % відповідно.

Список літератури

1. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. (1979) *Полуфабрикаты из титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
2. (2019) *Каталог продукции и услуг научно-производственного комплекса «Титановые сплавы»*. Санкт-Петербург, ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей» им. И.В. Горанина.
3. Капустян А.Е., Овчинников А.В., Коваленко Т.А., Шевченко В.Г. (2016) Получение полуфабрикатов титановых сплавов для авиационно-космической техники. *Авиационно-космическая техника и технология*, 134(7), 107–116.
4. Капустян А.Е. (2015) Получение длинномерных полуфабрикатов из спеченных титановых сплавов сваркой трением. *Автоматическая сварка*, 3, 55–59.
5. Скребцов А.А., Овчинников А.В., Капустян А.Е. (2012) Исследование механических свойств сварных соединений спеченных титановых сплавов. *Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія*, 132, 14–17.
6. Овчинников А.В., Давыдов С.И., Шварцман Л.Я. (2007) Перспективные технологии производства титановых сплавов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, 2, 56–60.
7. Павлов В.А. (2010) Обработка давлением порошковых цветных металлов. Запорожье, Мотор-Сич.
8. Капустян А.Е., Овчинников А.В., Павлов В.В. и др. (2015) Влияние режимов прессования и спекания на пористость спеченных титановых изделий. *Обработка материалов давлением*, 41(2), 22–31.
9. Овчинников А.В. (2013) *Материаловедческие основы восстановления изделий из сложнелегированных титановых сплавов, модифицированных субмикроструктурными материалами*: дис. ... д-ра техн. наук. Запорожье.
10. Гисер Е.Ш., Чекогило Л.В., Белецкий В.М. (1977) Электрошлаковая отливка заготовок из высокопрочного титанового сплава VT22. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 6, 21–23.
11. Гуревич С.М., Дидковский В.П., Новиков Ю.К. (1963) Электрошлаковая выплавка титановых сплавов. *Автоматическая сварка*, 10, 37–42.
12. Argantrout C.E., Ausmus S.L., Beall R.A., Dunham I.T. (1999) Properties of electroslog and vacuum arc melted titanium. *Titanium '99: Science and Technology*, 9, 109–117.
13. Нефziger P.X. (1971) *Шлаки для электрошлаковой выплавки титана и режимы плавки*. Электрошлаковый переплав. Киев, Наукова думка, 202–218.
14. Медовар Л.Б., Саенко В.Я. (2006) ЭШП титана: возможности и перспективы. *Электрометаллургия*, 8, 3–8.
15. Рябцев А.Д., Троянский А.А. (2001) Производство слитков титана, хрома и сплавов на их основе в камерных электрошлаковых печах под «активными» металлосодержащими флюсами. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 4, 6–9.
16. Протокивилос И.В., Назарчук А.Т., Петров Д.А., Порохонько В.Б. (2018) Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. *Современная электрометаллургия*, 2, 45–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.02.06>
17. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Саенко В.Я. (1994) Переплав губчатых титановых расходуемых электродов способами ЭШП и ДШП. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 3–4, 7–11.
18. Медовар Л.Б., Саенко В.Я., Рябинин В.А. (2010) Выбор флюсов для ДШП при получении слитков титановых сплавов. *Современная электрометаллургия*, 1, 8–11.
19. (1992) ГОСТ 19807–91. *Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки*.
20. Рябцев А.Д., Давыдов С.И., Троянский А.А. (2007) Получение титана повышенной прочности путем легирования кислородом в процессе камерного электрошлакового переплава. *Современная электрометаллургия*, 3, 3–6.
21. Овчинников А.В., Давыдов С.И., Шевченко В.Г. (2007) Влияние легирования кислородом титана губчатого на структуру и механические свойства литого титана. *Ti-2007 в СНГ. Материалы Международной конференции, Ялта, Украина, 15–18 апреля, 2007 г.*, 170–173.
22. Глазова В.В., Корнилов И.И., Модестова В.Н., Томашов Н.Д. (1965) Коррозионное поведение сплавов системы титан–кислород в растворах серной кислоты. *Физическая химия*, 165(1), 136–139.
23. Колачев Б.А., Полькин И.С., Талалаев В.Д. (2000) *Титановые сплавы разных стран*. Москва, ВИЛС.
24. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*: Справочник. Москва, ВИЛС-МАТИ.
25. Леоха Ф.Л., Рагиев С.Н. (2012) Современные способы получения сплавов титана, легированных кислородом. *Науків праці Донецького національного технічного університету. Серія: Металургія*, 1–2, 85–94.
26. (2019) ASTM B348/B348M–19. *Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets*.
27. (2017) ASTM B367–13. *Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Castings*.
28. Ключев М.М., Кабуновский Д.Ф. (1969) *Металлургия электрошлакового переплава*. Москва, Металлургия.

References

1. Aleksandrov, V.K., Anoshkin, N.F., Bochvar, H.A. (1979) *Semi-finished products from titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. (2019) *Catalog of products and services of the research and production complex "Titanium Alloys"*. St.-Petersburg, TsNII «Prometei» [in Russian].
3. Kapustian, A.E., Ovchinnikov, A.V., Kovalenko, T.A., Shevchenko, V.H. (2016) Producing of semi-finished titanium alloys for aerospace engineering. *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, 134(7), 107–116 [in Russian].
4. Kapustian, A.E. (2015) Producing of long-length semi-finished products from sintered titanium alloys by friction welding. *Avtomatich. Svarka*, 3, 55–59 [in Russian].
5. Skrebtsov, A.A., Ovchinnikov, A.V., Kapustian, A.E. (2012) Investigation of mechanical properties of sintered titanium alloy welded joints. *Visnyk SevNTU. Seriya: Mekhanika, Energetyka, Ekologiya*, 132, 14–17 [in Russian].
6. Ovchinnikov, A.V., Davydov, S.Y., Shvartsman, L.Ya. (2007) Advanced technologies for production of titanium alloys. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metalurgii ta Mashynobuduvanni*, 2, 56–60 [in Russian].
7. Pavlov, V.A. (2010) Pressure treatment of powdered non-ferrous metals. *Zaporozhie, Motor-Sich* [in Russian].

8. Kapustian, A.E., Ovchinnikov, A.V., Pavlov, V.V. et al. (2015) Influence of pressing and sintering modes on the titanium product porosity. *Obrabotka Materialov Davleniem*, 41(2), 22–31 [in Russian].
9. Ovchinnikov, A.V. (2013) *Materials science bases of restoration of products from complex titanium alloys modified with submicrocrystalline materials*: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree. Zaporozhie [in Russian].
10. Giser, E.Sh., Chekotilo, L.V., Beletsky, V.M. (1977) Electroslag casting of billets from high-strength titanium alloy VT22. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 6, 21–23 [in Russian].
11. Gurevich, S.M., Didkovsky, V.P., Novikov, Yu.K. (1963) Electroslag melting of titanium alloys. *Avtomatich. Svarka*, 10, 37–42 [in Russian].
12. Armantrout, C.E., Ausmus, S.L., Beall, R.A., Dunham, I.T. (1999) Properties of electroslag and vacuum arc melted titanium. *Titanium '99: Sci. and Technology*, 9, 109–117.
13. Nefziger, R.Kh. (1971) Slags for electroslag melting of titanium and melting modes. In: *Electroslag Remelting*. Kiev, Naukova Dumka, 202–218 [in Russian].
14. Medovar, L.B., Saenko, V.Ya. (2006) Electroslag remelting of titanium: opportunities and prospects. *Elektrometallurgiya*, 8, 3–8 [in Russian].
15. Ryabtsev, A.D., Troyansky, A.A. (2001) Production of ingots of titanium, chromium and alloys based on them in chamber electroslag furnaces under “active” metal-containing fluxes. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 4, 6–9 [in Russian].
16. Protokovilov, Y.V., Nazarchuk, A.T., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B. (2018) Technological and metallurgical peculiarities of melting the titanium alloy ingots in chamber-type electroslag furnaces. *Suchasna Elektrometal.*, 2, 45–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.02.06> [in Russian].
17. Paton, B.E., Medovar, L.B., Saenko, V.Ya. (1994) Remelting of titanium spongy consumable electrodes by ESR and ASR methods. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 3–4, 7–11 [in Russian].
18. Medovar, L.B., Saenko, V.Ya. and Ryabinin, V.A. (2010) Selecting fluxes for arc slag remelting in production of titanium ingots. *Advances of Electrometallurgy*, 1, 5–9.
19. (1992) GOST 19807–91. *Titanium and titanium wrought alloys*. Grades [in Russian].
20. Ryabtsev, A.D., Davydov, S.Y., Troyansky, A.A. (2007) Production of increased strength titanium by its doping with oxygen in the process of chamber electroslag remelting. *Advances in Electrometallurgy*, 3, 2–5.
21. Ovchinnikov, A.V., Davydov, S.Y., Shevchenko, V.H. (2007) Influence of alloying by oxygen of titanium sponge on the structure and mechanical properties of cast titanium. In: *Proc. of Int. Conf. on Ti-2007 CIS (Yalta, Ukraine, 15–18 April, 2007)*, 170–173.
22. Glazova, V.V., Kornilov, I.I., Modestova, V.N., Tomashov, N.D. (1965) Corrosion behavior of titanium-oxygen system alloys in sulfuric acid solutions. *Fizicheskaya Khimiya*, 165(1), 136–139 [in Russian].
23. Kolachev, B.A., Polkin, I.S., Talalae, V.D. (2000) *Titanium alloys of different countries*. Moscow, VILS [in Russian].
24. Ilyin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
25. Leokha, F.L., Ratiev, S.N. (2012) Modern methods of producing oxygen-doped titanium alloys. *Nauk. Pratsi DNTU. Seriya: Metalurgiya*, 1–2, 85–94 [in Russian].
26. (2019) ASTM B348/B348M–19. *Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets*.
27. (2017) ASTM B367–13. *Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Castings*.
28. Klyuev, M.M., Kablunovsky, D.F. (1969) *Metallurgy of electroslag remelting*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

ELECTROSLAG MELTING IN AN OPEN MOULD OF INGOTS FROM SHEET SCRAP WASTES OF TITANIUM VT1-0

D.I. Bilonik¹, O.V. Ovchynnykov¹, I.M. Bilonik¹, O.Ye. Kapustian¹, S.A. Shumikin¹, D.V. Raspornia², Yu.M. Savonov¹
¹Zaporizhzhia Polytechnic National University.

64 Zhukovsky Str, 69063, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: aek@zntu.edu.ua

²O.O. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine.
 46 Nauki Ave., 03680, Kyiv, Ukraine

The expediency of conducting studies of the electroslag process in an open mould to produce titanium ingots using consumable electrodes made from conditioned wastes of VT1-0 titanium sheets was substantiated. The results of the study of the produced titanium ingots of 85 mm diameter and 90×90 mm cross section are presented. Smelting was performed in electroslag installation A-550, flux was CaF₂ (100 %). To prevent critical heating of the consumable titanium electrodes and oxidation of their surface, a sliding current supply was installed on the upper flange of the mould. The optimal technological parameters of electroslag smelting were established on the basis of analysis of the shape and determination of the depth of the metal pool, which was fixed with tungsten chips at the deposition rate of 0.9·10⁻² kg/s; 1.1·10⁻² kg/s and 1.7·10⁻² kg/s. Surface condition and chemical composition were evaluated on ingots produced with an optimal deposition rate of (0.9·10⁻² kg/s). The ingot surface was smooth, without any constrictions or corrugations. Chemical composition of ingots, wt.%: Ti — base; C — 0.024; Fe — 0.06; Si — 0.05; O₂ — 0.25; N₂ — 0.058; H₂ — 0.0016 meets the requirements of GOST 19807–91 for unalloyed VT1-0 titanium, except for higher oxygen and nitrogen content; and fully complies with the chemical composition of VT1-2 grade and a number of undoped titanium materials from foreign manufacturers. Performed studies have shown the fundamental possibility of using electroslag smelting technology in an open mould with a sliding current supply to produce ingots from sheet wastes of VT1-0 titanium. Ref. 28, Table 1, Fig. 4.

Key words: VT1-0 titanium; electroslag process; semi-finished product; flux, consumable electrode; chemical composition

Надійшла до редакції 29.11.2021