

ТЕХНОЛОГІЯ ВИПЛАВКИ ЗЛИВКІВ ЦИРКОНІЄВОГО СПЛАВУ СПОСОБОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВУ З ВИТРАТНИМ ЕЛЕКТРОДОМ

О.Є. Капустян¹, І.А. Овчинникова², В.А. Ждан², Ю.М. Савонов¹

¹Національний університет «Запорізька політехніка».

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

²Запорізький національний університет.

69600, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 66. E-mail: iaov31@gmail.com

Наведено результати дослідження можливості отримання зливок цирконієвого сплаву системи Zr–Nb–Ti з використанням способу вакуумно-дугового переплаву з витратним електродом. В якості витратних електродів використані зливки діаметром 50 мм, отримані способом переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі. Відпрацьовано технологію отримання цирконієвого сплаву заданого складу способом вакуумно-дугового переплаву в мідний кристалізатор електрода, що витрачається. Вирішено комплекс технологічних і матеріалознавчих задач, проведено дослідження технологічних факторів, методів і процесів металургії, пов'язаних з вибором устаткування та оснащення для плавлення, розроблено технологічний процес отримання зливок із заданим гомогенним хімічним складом для подальшої деформаційної обробки та отримання вихідної заготовки. Виплавлено зливок діаметром 120 мм у вакуумно-дуговій печі. Визначено технологічні параметри виплавки при дуговому переплаві з витратним електродом у вакуумній дуговій печі. Дослідження металу зливка методом ультразвукової дефектоскопії дослідного сплаву системи Zr–Nb–Ti показало відсутність внутрішніх дефектів структури — несущільностей, усадочних раковин, пористості, великих неметалевих включень. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: вакуумно-дуговий переплав; ніч; електрод; дуга; вакуум; цирконієвий сплав; зливок; технологія; якість

Сучасні тенденції розвитку стоматології спрямовані на подальше підвищення вимог надійності та безпечної експлуатації дентальних імплантатів, що вимагає застосування нових матеріалів. Подальше підвищення безпечної експлуатації, в першу чергу, пов'язано із заміною титанових сплавів системи Ti–Al–V, з метою запобігання шкідливого впливу на організм ванадію, на хімічно біосумісні з організмом людини титанові сплави, наприклад систем Ti–Al–Nb–Zr, Ti–Al–Nb–Fe–Zr [1], Ti–Al–Mo–Nb–Zr [2], Ti–Ni [3], Ti–Nb–Si [4], Ti–Nb–Si–Zr [5], Ti–Nb–Ta–Zr [6], Ti–Si–Sn [7] та ін., або нові перспективні цирконієві сплави. Останні, крім хімічної біосумісності, дозволяють отримувати вироби з підвищеним рівнем спеціальних фізичних та механічних властивостей [8, 9], таких як модуль нормальної пружності, міцність та пластичність.

При виробництві сплаву системи Zr–Nb–Ti надзвичайно важливо забезпечити відповідність середніх значень вмісту легуючих елементів номінальному значенню та хімічну однорідність одержуваного зливка. Вміст Nb повинен коливатися у сплаві в межах 16...24 мас. %, а тоді концентрація Ti — 16...23 мас. %. Зменшення концентрації титану та/або збільшення проценту ніобію, який

вводиться, веде до утворення β-метастабільного фазового стану сплаву [10]. Тому їх вміст і однорідність розподілу значною мірою впливають на фізико-механічні властивості сплавів, які виготовляються.

В попередніх роботах [11, 12] показано, що однократний переплав з невитратним електродом у гарнісажній печі дозволяє отримувати заданий хімічний склад по всьому перетину зливок, але не забезпечує необхідну його однорідність. Наявність в сплаві великої кількості легуючих компонентів, фізичні властивості яких суттєво різняться, не дозволило отримати деформований напівфабрикат після однократного переплаву. Необхідно отримання зливок, які не тільки відповідають вимогам технічного завдання за хімічним складом, а й володіють високою хімічною гомогенністю. Для цього можна зменшити розмір фракцій шихтових матеріалів, особливо цирконію, однак при цьому слід врахувати, що чим дрібніше шихта, тим більше її питома поверхня і тим більше міститься на її поверхні домішок (кисню, водню і т.п.). Хімічна та структурна однорідності зливка є важливими характеристиками, які неможливо повністю виправити подальшими металургійними переробка-

О.Є. Капустян — <http://orcid.org/0000-0002-8979-8076>, І.А. Овчинникова — <https://orcid.org/0000-0002-4035-129X>,

В.А. Ждан — <https://orcid.org/0000-0001-8781-3642>

© О.Є. Капустян, І.А. Овчинникова, В.А. Ждан, Ю.М. Савонов, 2021

ми (обробка тиском, термічна обробка) та від яких залежать експлуатаційні властивості, виготовлених з нього напівфабрикатів. Таким чином, процеси первинного переплаву не є достатніми.

Процеси переплаву витратного електрода створені з метою отримання зливків високої металургійної якості, призначених для відповідальних виробів. Вони дозволяють отримати такі важливі параметри, як дрібнозерниста структура, обмеження утворення кристалізаційних дефектів, низький рівень мікро- і макросегрегації, а також високу якість зливків [11]. Забезпечити високу якість одержуваного зливка з необхідними хімічною і структурною однорідностями можливо шляхом застосування переplавних процесів спеціальної електрометалургії, зокрема вакуумно-дугового переplаву (ВДП) — одного з найбільш ефективних способів вакуумної металургії для отримання тугоплавких і високореакційних сплавів [11, 14], до яких належать цирконієві сплави. Процес ВДП являє собою кінцевий етап в циклі плавки такого хімічно активного металу, як цирконій [13] та полягає в переplаві витратного металевго електрода у високому вакуумі (до 0,01 Па), що практично повністю виключає забруднення високореакційних сплавів газовими домішками. Одним з головних завдань для виробників цирконієвих сплавів є освоєння контролю макросегрегації, як результату об'єднання явищ перенесення і мікросегрегації в одержуваних зливках [13].

Тому запропонована технологія отримання напівфабрикатів, що включає комбінований спосіб плавки — гарнісажну плавку і подальший вакуумно-дуговий переplав.

Таким чином, отримання якісних зливків з цирконієвого сплаву способом ВДП являє собою досить складне технічне завдання, що обумовлено цілим рядом факторів: фізичних — різні температури плавлення та щільності компонентів, термодинамічних — нонваріантні перетворення.

Доцільна реалізація технологічного процесу отримання цирконієвих зливків складається з двох металургійних етапів — виплавки витратного електрода і його подальшого вакуумно-дугового переplаву. Ефективність реалізації цих процесів залежить від розв'язання наступних технологічних задач: мінімізації кількості переplавів, отримання однорідних зливків з рівномірним розподілом легуючих елементів, заданою структурою і відсутністю дефектів шляхом оптимізації технологічних режимів металургійних процесів. Це вимагає проведення дослідницьких робіт, спрямованих на відпрацювання технологічних режимів,

які забезпечують задані характеристики зливків з багатокомпонентних цирконієвих сплавів.

Мета даної роботи — відпрацювання технології отримання гомогенних зливків цирконієвого сплаву заданого складу способом вакуумно-дугового переplаву з витратним електродом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс технологічних і матеріалознавчих задач, провести дослідження технологічних факторів, методів і процесів металургії, пов'язаних з вибором устаткування та оснащення для плавлення, дослідити розподіл легуючих елементів у зливку, розробити технологічний процес отримання якісних бездефектних зливків цирконієвого сплаву із заданим гомогенним хімічним складом способом ВДП для подальшої деформаційної обробки та отримання вихідної заготовки.

Матеріали та методики досліджень. Технологія отримання зливків цирконієвого сплаву способом ВДП містила наступні етапи: підготовку шихтових матеріалів; підготовку обладнання і технологічної оснастки до плавки; первинне плавлення зливків способом переplаву з невитратним електродом у гарнісажній печі в тиглі діаметром 50 мм; обробку поверхні зливків; контроль якості зливків; формування витратного електрода; підготовку обладнання і технологічної оснастки до наступної плавки; повторний процес плавки в кристалізаторі діаметром 120 мм; обробку поверхні зливків; контроль якості виплавлених зливків.

Гомогенність матеріалу досягається шляхом використання якісного витратного електрода із заданим хімічним складом. В якості вихідних матеріалів використовували електроди діаметром 50 мм зі сплаву системи Zr–Nb–Ti. Цей сплав можна застосовувати як для лиття, так і для подальшої деформації. Електроди виготовляли шляхом з'єднання зливків, отриманих способом переplаву з невитратним електродом у гарнісажній печі за технологією, що розроблена в НДЦ «Титан Запоріжжя» НУ «Запорізька політехніка» [11]. Хімічний склад електродів приведено в табл. 1. Електроди переplавляли способом ВДП у зливки діаметром 120 мм і довжиною 100 мм.

ВДП витратного електрода з дослідного сплаву виконували у вакуумно-дуговій печі ВД-2 (рис. 1). Плавлення здійснювалося шляхом наведення електричної дуги між витратним електродом, склад якого відповідав складу майбутнього зливка, і кристалізатором. Механізм вертикального переміщення електрода — електромеханічний з черв'ячною передачею. Можливе одержання складних багатокомпонентних сплавів, в тому числі з вико-

Таблиця 1. Хімічний склад витратних електродів зі сплаву системи Zr–Nb–Ti, мас. %

Zr	Nb	Ti	O
59,23...60,89	20,01...21,45	18,50...19,21	0,11...0,13
59,95	20,95	18,98	0,12

Примітка. В чисельнику вказані максимальні та мінімальні значення вмісту елементів, в знаменнику — середні.

ристанням тугоплавких елементів (Mo, Nb, Ta та ін.), зі зниженим вмістом газових домішок.

**Технічні характеристики
вакуумно-дугової печі ВД-2**

Встановлена потужність, кВт	150
Номінальна потужність, кВт	80
Діапазон робочого тиску, Па	1,33·10 ⁻¹ ...1,33·10 ⁻³
Максимальний хід штока, мм	470
Швидкість вертикального переміщення штока, мм/хв	10...50
Максимальний внутрішній діаметр кристалізатора, мм	120
Максимальна внутрішня довжина кристалізатора, мм	450
Максимальний струм плавлення, А	4500
Максимальна напруга плавлення, В	45
Місткість номінальна, кг	2...20
Час розплавлення під струмом, хв.	< 20
Витрата води на охолодження печі, м ³ /год	30
Максимальний діаметр електрода, мм	80
Займана площа (без джерела живлення), м ²	4,1
Тиск рідини в системі охолодження, Па	1...4·10 ⁵

Цирконій та титан активно взаємодіють не тільки з газами, але і з іншими елементами. Це

виключає можливість використання при ВДП цирконієвого сплаву різних формувальних пристроїв на основі графіту або інших вогнетривких матеріалів, тому з метою запобігання збагачення зливка графітом використовували мідний кристалізатор. Кристалізатор виконаний водоохолоджуваним, що забезпечує його надійну експлуатацію.

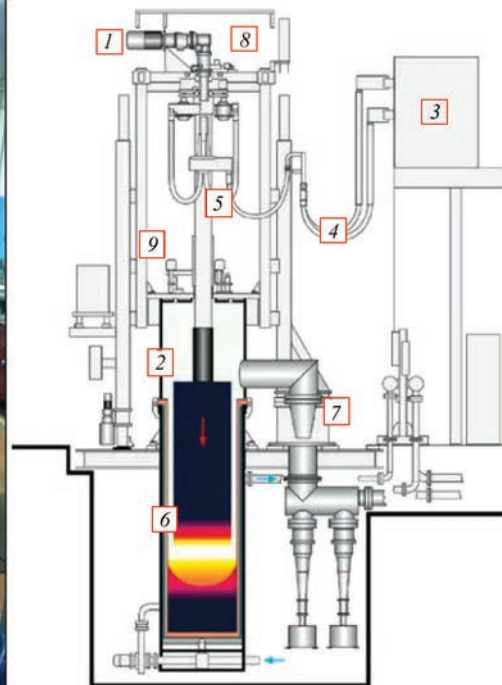
Охолодження забезпечується за допомогою моноблочного циркуляційного насоса F 50/160 (Pedrollo, Італія), що має наступні технічні характеристики:

живлення, В	380
напір, м	37...27
подача (продуктивність), л/хв	300...1100
тип	поверхневий, консольний відцентровий
потужність, кВт	7,5
розміри патрубків, мм:	
всмоктувальний	65
напірний	50
вага нетто, кг	56,5
температура води, °С	від -10 до 90
режим роботи	безперервний

Теплофізичні умови в кристалізаторі напругу впливають на структуру зливка [15]. По периферії зливка відбувається інтенсивний відвід тепла у стінку кристалізатора. В разі необхідності прискореного охолодження зливка або при виплавленні зливка максимальної для печі ВД-2 місткості підключається другий насос СР 200 (Pedrollo, Італія),



a



б

Рис. 1. Вакуумно-дугова піч ВД-2: *a* — загальний вид; *б* — схема: 1 — привод переміщення електрода; 2 — камера печі; 3 — джерело живлення; 4 — шини; 5 — шток електрода; 6 — мідний водоохолоджуваний кристалізатор; 7 — вакуумна система (насоси: 2НВБМ-160; АВЗ-20Д); 8 — редуктор приводу переміщення електрода; 9 — система переміщення електрода

що забезпечує на виході з кристалізатора температуру води, що охолоджує, не більше 70 °С.

Якість металу зливоків цирконієвих сплавів істотно залежить не тільки від якості підготовки і чистоти вихідного матеріалу, а й стерильності умов плавки: рівня чистоти технологічного оснащення; глибини вакууму, в середовищі якого відбувається плавлення; кількості та чистоти залишкових газів, адсорбованих на технологічному обладнанні та у вакуумній камері. Підготовка обладнання і технологічної оснастки до плавки полягає в очищенні камери плавки, кристалізатора, піддону і штока електрода від конденсату, пилу і залишків металу попередніх плавок.

Завдяки широким можливостям керування процесом плавлення зливка ВДП забезпечує високий рівень гомогенізації складу і структури та, в результаті, одержання металу високої якості. Для реалізації всіх переваг ВДП необхідно забезпечити суворе регулювання режимів плавки. У процесі плавки контролювали такі технологічні параметри: ступінь вакууму; температуру охолоджувальної рідини; положення валу редуктора приводу переміщення електрода; швидкість переміщення витратного електрода; електричні параметри (струм та напругу) дуги.

Числові значення напруги й струму контролювалися оператором за допомогою контрольно-вимірювальних приладів. Величина напруги дуги вимірювалась аналоговим вольтметром типу М 340 зі шкалою від 0 до 70 В та класом точності 1,5; струм дуги визначався за показами аналогового амперметра типу М 325 із діапазоном вимірювання від 0 до 6 кВ та класом точності 1,5; ступінь вакууму вимірювалась вакуумметром іонізаційно-термопарним ВИТ-2. Регулювання величини струму у дузі здійснювалося ЛАТРом. Продуктивність процесу плавлення регулювалась шляхом зміни положення витратного електрода та параметрами дуги. Температура охолоджувальних вузлів рідини — зміною витрати охолоджувальної рідини в системі. Положення витратного електрода контролювалось за допомогою механічної системи індикації, розташованої безпосередньо на печі.

Усі контрольно-вимірювальні прилади та органи керування процесом розташовані на пульті управління, що дозволяє оператору швидко реагувати на зміни у технологічному процесі. Керування процесом відбувалося у ручному режимі. Метрологічні характеристики приладів та засобів управління дозволяють підтримувати технологічні параметри процесу плавлення у межах, визначених режимною картою.

Механічну обробку зливка здійснювали: токарну — на токарно-гвинторізному верстаті 16К20; різання — на горизонтально-фрезерному верстаті моделі 6Р81.

Для дослідження наявності в зливках зі сплавів цирконію внутрішніх дефектів у вигляді неметалевих включень, пор і несцільностей використовували метод ультразвукової дефектоскопії. Дослідження проводили за допомогою ультразвукового дефектоскопа ехоімпульсним методом при контактному варіанті контролю. При контролі зливка використовували перетворювачі ультразвукової П111-2,5-К12-002 частотою 2,5 МГц та П121-1,25-Н-30 — 1,25 МГц.

Склад основних легуючих елементів по висоті зливка оцінювали спектральним методом за допомогою сканувального мікроскопу JSM-IT300LV (Jeol, Японія), обладнаного рентгенівським енергодисперсійним мікроаналізом X-Max 80 (Oxford Instruments, United Kingdom). Вміст кисню, визначали відповідно за допомогою газоаналізатора моделі TC-500 (LECO, США).

Результати експериментів та їх аналіз. За технологією [11] виплавили три зливка та провели їх механічну обробку (відрізали забруднений домішками торець та при обточуванні видаляли шар до 1 мм, після чого з'єднували по 3 шт в торець у витратний електрод (рис. 2) для подальшого переплаву у вакуумно-дуговій печі).

Наступним етапом підготовки електрода до плавки є приварка інвентарної головки 4, за допомогою якої здійснюється його кріплення до механізму вертикального переміщення печі. Інвентарна головка може бути виготовлена зі сплаву КТЦ-100 (КТЦ-110) або сплаву аналогічного електрода, що переплавляється. Зварювання проводили електродувим вольфрамовим електродом в інертному середовищі із використанням присадного прутка зі сплаву КТЦ-100. Цей спосіб забезпечує необхідні міцність та струмопровідність зварного з'єднання. Для цього використовували: спеціальне оснащення для отримання строгої співвісності електрода та головки; зварювальне обладнання (установку УДГУ-501 АС/DC SELMA, джерело живлення ВДУ-506).



Рис. 2. Загальний вигляд витратного електрода, $\times 0,1$: 1–3 — зливки, що отримані у гарнісажній печі; 4 — інвентарна головка



Рис. 3. Загальний вигляд зливка сплаву системи Zr–Nb–Ti після виплавки (а) та механічної обробки (б)

Перед зварюванням крайки деталей промивали і знежирювали спиртом-ректифікатом. Числові значення технологічних параметрів зварювання для злиwkів системи Zr–Nb–Ti наступні [16]:

струм, А	175...300
напруга, В	15...20
діаметр електрода, мм	3
діаметр присадного прутка, мм	3
захисна атмосфера He/Ar, %	73/27
рід струму	постійний
полярність струму	пряма

Після установки електрода піч герметизували та вакуумували до рівня залишкового тиску насосами АВЗ-20Д до 1 Па, 2НВБМ-160 до $1 \cdot 10^{-2}$ Па, яке підтримували протягом всієї плавки. Плавлення здійснювали у вакуумі в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі. В кінці плавки проводили вивід усадочної раковини при поступовому зниженні потужності обігріву верхнього торця зливка в кристалізаторі шляхом зниження значень струму з наступним контрольним проплавленням.

Після плавки зливок знаходився в камері в умовах вакууму до повного його охолодження для уникнення окислення. Після охолодження зливка піч розвакуувували, вивантажували зливку і маркували його. Числові значення технологічних параметрів ВДП для злиwkів системи Zr–Nb–Ti такі:

Таблиця 2. Розподіл основних легуючих елементів у зливку цирконієвого сплаву, мас. %

Частина зливка	Zr	Nb	Ti
Верх	60,3	20,8	18,9
Середина	59,9	21,1	19,1
Низ	60,2	20,9	18,9
Середнє	60,1	20,9	19,0

маса витратного електрода, кг	7,0
струм, А	1500...2100
напруга, В	25...50
тиск вакуумування, Па	$1 \cdot 10^{-2}$
час відкачування вакууму, хв	3...5
час плавлення, хв	5...7
час охолодження у вакуумі, хв	60...90
діаметр кристалізатора, мм	120

В результаті плавок отримано зливку дослідного сплаву діаметром 120 мм, висотою 100 мм, який механічно обробляли й аналізували розподіл елементів в ньому за перетином. Стружку збирали, щоб після хімічного очищення та сушки повторно використовувати як вихідний матеріал для виплавки заготовок. Зовнішній вигляд заготовки після виплавки і механічної обробки представлено на рис. 3.

Проведено дослідження якості отриманого зливка ВДП діаметром 120 мм цирконієвого сплаву системи Zr–Nb–Ti. Візуальний огляд показав, що бокова поверхня отриманого зливка гладка, чиста, підвищена концентрація домішкових елементів на поверхні у вигляді окисненого шару відсутня. Середня глибина поверхневих дефектів типу «груба поверхня» становила не більше 2 мм, дефекти у вигляді пор, раковин, розривів, тріщин або несплавлення по всій поверхні зливка в стаціонарний період плавки відсутні.

При дослідженні злиwkів методом ультразвукової дефектоскопії доведено, що внутрішня структура злиwkів щільна, без дефектів. Несуцільностей, усадочних раковин, пористості або великих неметалевих включень не виявлено.

Згідно з аналізом хімічного складу металу односторонньо встановлено, що цирконій, ніобій, титан і кисень по висоті та перетину розглянутого зливка розподілені рівномірно без ознак зональної

ліквації. За основними компонентами склад зливка по висоті витримано в межах від 0,2 до 0,4 % (табл. 2). Концентрація кисню у всіх частинах зливка не перевищувала 0,1 %.

Таким чином, в роботі реалізована технологічна схема отримання сплаву типу Zr–Nb–Ti способом гарнісажного дугового виплавлення витратного електрода з наступним ВДП.

Подальші роботи будуть спрямовані на вивчення закономірностей розподілу хімічних елементів, структуроутворення злиwkів після деформаційної обробки (кування, катання, волочіння), відпрацювання режимів деформаційної обробки та дослідження фізико-механічних та корозійних властивостей металу після кожної стадії технологічного переділу.

Висновки

1. Проведено дослідження щодо реалізації технологічного процесу отримання злиwkів цирконієвого сплаву в вакуумно-дуговій печі ВД-2 діаметром 120 мм та висотою 100 мм з попереднім отриманням витратного електрода способом переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі. Проведений комплекс робіт дозволив визначити технологічні параметри ВДП з витратним електродом у вакуумній дуговій печі злиwkів цирконієвого сплаву системи Zr–Nb–Ti.

2. Відпрацьовано технологію виплавки якісних злиwkів цирконієвого сплаву заданого хімічного складу способом ВДП на основі цирконію.

3. Отримані результати можуть бути використані для подальшого виготовлення заготовок зі злиwkів цирконієвих сплавів.

Список літератури

1. Топольский В.Ф., Ахонин С.В., Григоренко Г.М., Петриченко И.К. (2012) Разработка новых титановых биосовместимых сплавов для медицинского применения. *Современная электрометаллургия*, **1**, 22–25.
2. Левицкий М.И., Мірошніченко В.І., Анікін Ю.П. та ін. (2002) *Ливарний сплав на основі титану*. Україна, Пат. 51032.
3. Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н., Ясенчук Ю.Ф. и др. (2006) *Никелид титана. Медицинский материал нового поколения*. Томск, МИЦ.
4. Fisk A., Demchyshin A., Kuzmenko M. et al. (2014) *Titanium based ceramic reinforced alloy for use in medical implants*. USA, Pat. № US2014105781.
5. Гречанюк Н.И., Кулак Л.Д., Смашнюк Ю.А. и др. (2017) Выплавка слитков титановых сплавов системы Ti–Nb–Si–Zr способом электронно-лучевой плавки. *Современная электрометаллургия*, **2**, 17–20. <https://doi.org/10.15407/sem2017.02.03>
6. Горна І.Д., Валуйська К.О., Талаш В.М. та ін. (2018) Вплив скандію на властивості біосумісних титанових сплавів Ti–23Nb–2Zr–X. *Титан 2018. Производство и применение в Украине. 11–13 июня 2018 г., Киев, Украина*, 40–43.

7. Горна І.Д., Буланова М.В., Валуйська К.О. та ін. (2018) Вплив низькомодульної інтерметалідної фази Ti₃Sn на механічні властивості евтектичних сплавів системи Ti–Si–Sn. *Там само*, 36–39.
8. Капустян О.С., Овчинников О.В., Волчок І.П. (2020) Дослідження можливості застосування Zr–Ti–Nb сплавів замість титанового сплаву Ti–6Al–4V для виробів біомедичного призначення. *Вісник ХНАДУ*, **91(1)**, 15–22.
9. Mishchenko O., Ovchynnykov O., Kapustian O., Pogorielov M. (2020) New Zr–Ti–Nb alloy for medical application: development, chemical and mechanical properties, and biocompatibility. *Materials*, **13(6)**, 1306. DOI: 10.3390/ma13061306
10. Івасишин О.М., Скиба І.О., Карасевська О.П., Марковський П.С. (2013) *Біосумісний сплав із низьким модулем пружності на основі системи цирконій–титан (варіанти)*. Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України. Україна, Пат. 102455.
11. Овчинников О.В., Капустян О.С. (2020) Технології виплавки злиwkів цирконієвого сплаву способом вакуумно-дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі. *Сучасна електрометалургія*, **4**, 32–38. <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.06>
12. Капустян О.С., Овчинникова І.А. (2021) Отримання деформованих напівфабрикатів цирконієвого сплаву із злиwkів, виплавлених способом дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі. *Там само*, **3**, 28–34. <https://doi.org/10.37434/sem2021.03.05>
13. Жарди А. (2013) Численное моделирование и экспериментальные исследования процессов переплава. *Современная электрометаллургия*, **4**, 54–59.
14. Савенко В.А., Харитоновна Е.А. (2016) Электронно-лучевая выплавка бинарного сплава цирконий–гафний ядерной чистоты. *Там же*, **4**, 28–38.
15. Потапов В.И. (2005) *Теплофизические процессы при вторичном рафинирующем переплаве и их совершенствование методами математического моделирования*: дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск.
16. Гуревич С.М. (1990) *Справочник по сварке цветных металлов*. 2-е изд. Киев, Наукова думка.

References

1. Topolsky, V.F., Akhonin, S.V., Grigorenko, G.M., Petrichenko, I.K. (2012) Development of new titanium biocompatible alloys for medical applications. *Advances in Elektrometallurgy*, **1**, 24–28.
2. Levytskyi, M.I., Miroshnychenko, V.I., Anikin, Yu.P. et al. (2002) *Titanium based casting alloy*. Pat. 51032 Ukraine [in Ukrainian].
3. Gunter, V.E., Khodorenko, V.N., Yasenchuk, Yu.F. et al. (2006). *Titanium nickelide. New generation medical material, MITs, Tomsk* [in Russian].
4. Fisk, A., Demchyshin, A., Kuzmenko, M. et al. (2014) *Titanium based ceramic reinforced alloy for use in medical implants*. Pat. US2014105781 USA.
5. Grechanyuk, N.Y., Kulak, L.D., Smashnyuk, Yu.A. et al. (2017) Melting of titanium alloy ingots of the Ti–Nb–Si–Zr system by electron beam melting. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 17–20 [in Russian]. <https://doi.org/10.15407/sem2017.02.03>
6. Horna, I.D., Valuiska, K.O., Talash, V.M. et al. (2018) Influence of scandium on the properties of biocompatible titanium alloys Ti–23Nb–2Zr–X. In: *Proc. of Conf. on Titanium 2018. Production and Application in Ukraine (Kyiv, Ukraine, 11–13 June, 2018)*, 40–43 [in Ukrainian].
7. Horna, I.D., Bulanova, M.V., Valuiska, K.O. et al. (2018) Influence of the low-modulus intermetallic phase Ti₃Sn on the

- mechanical properties of eutectic alloys of the system Ti–Si–Sn. *Ibid.*, 36–39 [in Ukrainian].
8. Kapustian, O.Ye., Ovchynnykov, O.V., Volchok, I.P. (2020) Investigate the possibility of using Zr–Ti–Nb alloys instead of titanium alloy Ti–6Al–4V for biomedical products. *Visnyk KhNADU*, 91(1), 15–22 [in Ukrainian].
 9. Mishchenko, O., Ovchynnykov, O., Kapustian, O., Pogorielov, M. (2020) New Zr–Ti–Nb alloy for medical application: Development, chemical and mechanical properties, and biocompatibility. *Materials*, 13(6), 1306. DOI: 10.3390/ma13061306.
 10. Ivasyshyn, O.M., Skyba, I.O., Karasevska, O.P., Markovskiy, P.Ye. (2013) *Biocompatible alloy with low modulus of elasticity based on zirconium–titanium system (options)*. Pat. 102455 Ukraine [in Ukrainian].
 11. Ovchynnykov, O.V., Kapustian, O.Ye. (2020) Technologies for smelting zirconium alloy ingots by vacuum arc remelting with a non-consumable electrode in a skull furnace. *Su-chasna Elektrometal.*, 4, 32–38 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.06>
 12. Kapustian, O.Ye., Ovchynnykova, I.A. (2021) Production of deformed semi-finished products of zirconium alloy from ingots smelted by arc remelting method with a non-consumable electrode in a skull furnace. *Ibid.*, 3, 28–34 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/sem2021.03.05>
 13. Gardy, A. (2013) Numerical simulation and experimental studies of remelting processes. *Advances in Electrometallurgy*, 4, 314–321.
 14. Savenko, V.A., Kharitonova, E.A. (2016) Electron beam melting of zirconium-hafnium binary alloy of nuclear purity binary. *Sovrem. Elektrometal.*, 4, 28–38 [in Russian].
 15. Potapov, V.I. (2005) *Thermophysical processes in secondary refining remelting and their improvement by methods of mathematical modeling*: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree. Chelyabinsk [in Russian].
 16. Gurevich, S.M. (1990) *Reference book on non-ferrous metal welding*. 2nd ed. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

TECHNOLOGY FOR SMELTING ZIRCONIUM ALLOY INGOTS BY VACUUM ARC REMELTING WITH CONSUMABLE ELECTRODE

O.Ye. Kapustian¹, I.A. Ovchynnykova², V.A. Zhdan², Yu.M. Savonov¹

¹Zaporizhzhia Polytechnic National University.

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

²Zaporizhzhia National University.

66 Zhukovsky Str, 69063, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: iaov31@gmail.com

The results of studying the possibility of obtaining ingots from zirconium alloy of Zr–Nb–Ti system, using the method of vacuum arc remelting with a consumable electrode, are presented. Ingots of 50 mm diameter produced by remelting with a non-consumable electrode in a skull furnace were used as consumable electrodes. The technology of producing a zirconium alloy of a given composition by the method of vacuum-arc remelting of a consumable electrode into a copper mould has been developed. A complex of technological and material science problems was solved, a study of technological factors, metallurgical methods and processes, associated with selection of melting equipment and fixtures was carried out, a technological process was developed for obtaining ingots of a given homogeneous chemical composition for further deformation processing and producing an initial billet. An ingot of 120 mm diameter was melted in a vacuum arc furnace. The technological parameters of melting during arc remelting with a consumable electrode in a vacuum arc furnace were determined. A study of ingot metal of an experimental alloy of Zr–Nb–Ti system by the method of ultrasonic flaw detection showed absence of internal structural defects, namely discontinuities, shrinkage cavities, porosity or large non-metallic inclusions. Ref. 16, Table. 2, Fig. 3.

Key words: vacuum arc remelting; furnace; electrode; arc; vacuum; zirconium alloy; ingot; technology; quality

Надійшла до редакції 06.10.2021

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



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



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