

ТЕХНОЛОГІЯ ВИПЛАВКИ ЗЛИВКІВ ЦИРКОНІЄВОГО СПЛАВУ СПОСОБОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВУ З НЕВИТРАТНИМ ЕЛЕКТРОДОМ У ГАРНІСАЖНІЙ ПЕЧІ

О.В. Овчинников, О.Є. Капустян

Національний університет «Запорізька політехніка».
69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64. E-mail: aek@zntu.edu.ua

Наведено результати дослідження можливості отримання зливок цирконієвого сплаву системи Zr–Nb–Ti з використанням способу вакуумно-дугового переплаву шихтового матеріалу різного хімічного складу. Відпрацьовано технологію отримання цирконієвого сплаву заданого складу способом вакуумно-дугового переплаву з невитратним електродом у вакуумній дуговій гарнісажній печі. Вирішено комплекс технологічних і матеріалознавчих задач, проведено дослідження технологічних факторів, методів і процесів металургії, пов'язаних з вибором устаткування, оснащення і шихти для плавлення, розроблено технологічний процес отримання зливок із заданим гомогенним хімічним складом для подальшої деформаційної обробки з метою отримання вихідної заготовки. Вміст основних легуючих елементів оцінені за допомогою скануючого мікроскопа, а кисню — за допомогою газоаналізатора. Визначено технологічні параметри виплавки і встановлені коефіцієнти переходу елементів шихти при дуговому переплаві з невитратним електродом у вакуумній дуговій гарнісажній печі. Встановлено, що вміст цирконію і ніобію в зливках відповідає їх розрахунковому складу вихідної шихти, а вміст титану нижче. Виплавлені контрольні зливки діаметром 50 мм з урахуванням коефіцієнтів переходу способом вакуумно-дугового переплаву з невитратним електродом у вакуумній дуговій гарнісажній печі. Бібліогр. 15, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: вакуумно-дуговий переплав; пів; цирконієвий сплав; зливка; хімічний склад; коефіцієнт переходу

На сьогоднішній день цирконієві сплави застосовують в різних конструкціях широкого спектру призначення: ядерна енергетика, медицина і т.п. Залежно від функціонального призначення виробу до сплавів пред'являються різні вимоги по рівню властивостей. Властивості матеріалу формуються зміною хімічного складу і структури. На структуру значно впливає схема формоутворення: лиття, деформаційна обробка, зварювання та інші. Чим складніше технологія формоутворення, тим вище вимоги, що пред'являються до точності вмісту легуючих елементів, його однорідності хімічного складу, вмісту домішок та наявності дефектів, а також структурної та фазової гомогенності. Для забезпечення спеціальних властивостей, наприклад, низького модуля нормальної пружності сплаву, застосовуються складні системи легування, що істотно ускладнює дотримання перерахованих вище вимог, тому виготовлення високоякісних виробів на основі складнолегованих цирконієвих сплавів вимагає отримання вихідних зливок, які забезпечують задані вимоги по хімічній, структурній та фазовій однорідності.

Одним з визначальних факторів рівномірного розподілу легуючих і модифікуючих елементів є їх початковий стан у матеріалах шихти [1] і способи виплавки. Одна зі складностей при отриманні цирконієвих сплавів — їх висока хімічна активність, що призводить до необхідності прийняття спеціальних заходів для ефективного захисту розплавленого металу в інертному середовищі або вакуумі від газових домішок, таких як кисень, водень і азот, а також використання мідних або керамічних тиглів. Таким чином, технологія отримання промислових заготовок складне технічне завдання.

Найбільш поширеними способами виплавки цирконію та його сплавів вважаються електронно-променеве плавлення (ЕЛП) [2, 3] з проміжною ємністю, електронно-променеве гарнісажне плавлення і вакуумно-дуговий переплав (ВДП) [4–6]. На даний час перспективним способом по отриманню зливок цирконієвих сплавів є ВДП, який дозволяє мінімізувати зазначені недоліки ЕЛП. До переваг ВДП відноситься інтенсивне перемішування розплаву електродинамічними силами дуги, що дозволяє знизити кількість переплавів, використання різнофракційної шихти в широкому діапазоні вихідних розмірів, навіть порошків, а з використанням мідного водоохолоджуваного кристалізатора отримують метал високої якості за домішковими елементами [7]. Порівняльна оцінка зливка КТЦ-110 після ЕЛП і отриманого в результаті подвійного ВДП показала, що метал, отриманий способом ВДП, відрізняється

О.В. Овчинников — <https://orcid.org/0000-0002-5649-1094>, О.Є. Капустян — <http://orcid.org/0000-0002-8979-8076>

© О.В. Овчинников, О.Є. Капустян, 2020

більшою чистотою і стабільністю за вмістом домішок, відсутністю дефектів металургійного походження (раковини, сторонні включення, пори) та формуванням більш сприятливої макроструктури [6]. До недоліків ВДП відноситься необхідність отримання витратного електроду.

На сьогодні використовують декілька способів отримання витратних електродів: лиття шляхом попередньої виплавки шихти в тиглі і заливкою в кокіль та методами обробки тиском. Основним способом виготовлення витратних електродів для ВДП є пресування. Однак використання цього способу призводить до виникнення багатьох причин, що вкрай негативно позначаються на якості одержуваного зливка [8]. Більш ефективним і технологічним є спосіб виготовлення витратних електродів литтям, що повністю виключає ризики способу пресуванням та дозволяє при переплаві провести попередній рівномірний розподіл легуючих компонентів. Для ефективного отримання хімічно активних і складнолегованих сплавів існує спосіб плавлення металів невитратним електродом у вакуумно-дугових гарнісажних печах. Важливою перевагою гарнісажного плавлення є отримання зливка однорідного хімічного складу і завершення всіх фізико-хімічних процесів за рахунок великих обсягів рідкого металу і досить тривалого перебування металу в рідкому стані, що сприяє повному розчиненню легуючих компонентів [9]. У гарнісажній печі менш вірогідне утворення дефектів з великовагових включень, які випадають на дно ванни у гарнісаж [10].

Також необхідно враховувати, що описані вище експерименти були проведені в основному при виплавленні цирконієвих зливків для потреб ядерної енергетики (КТЦ-110 (Zr1Nb), КТЦ-12, E110, E125, E635). На сьогоднішній день у світі існує потреба в отриманні пруткових заготовок довжиною більше трьох метрів із цирконієвих сплавів, наприклад, для виготовлення імплантатів. Сплави на основі цирконію для медичного використання отримували в основному на лабораторних установках без урахування масштабного фактору. Отримання зливка вироблялося шляхом багаторазового (3...10 разів) переплаву, що для серійної промислової технології економічно недоцільно.

Тому виникла потреба у зливках цирконію для дрібносерійного виробництва.

Можна припустити, що при плавленні високолегованих зливків цирконію для дрібносерійного виробництва параметри технологічного процесу плавлення, розподіл компонентів сплаву, його структура та властивості будуть відрізнятися від отриманих в лабораторних умовах значень. Отримання напівфабрикатів із нових матеріалів у промислових умовах вимагає досконалого відпрацювання технологічного процесу на кожному етапі — вибір шихтових матеріалів, їх підготовка, плавлення, обробка тиском та термічна обробка. Технологічна схема повинна забезпечувати отримання бездефектних заготовок з мінімальними хімічними і структурними неоднорідностями [11].

Мета даної роботи — відпрацювання технології отримання цирконієвого сплаву заданого складу способом вакуумно-дугового переплаву з невитратним електродом у вакуумній дуговій гарнісажній печі, що дозволяє отримувати гомогенні зливки для подальшого виготовлення деформованого прутка з однорідними властивостями.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс технологічних і матеріалознавчих задач, провести дослідження технологічних факторів, методів і процесів металургії, пов'язаних з вибором устаткування, оснащення і шихти для плавлення, розробити технологічний процес отримання зливків із заданим гомогенним хімічним складом для подальшої деформаційної обробки та отримання вихідної заготовки.

Матеріали та методики досліджень. Як об'єкт досліджень розглядалися кілька цирконієвих сплавів, які застосовуються в імплантології — Zr1Nb [12], Zr30Ti20A125Pd25, Zr60A115Ni15Cu5Co5 та ін. Для досліджень обрано сплав вітчизняної розробки (Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України) наступного хімічного складу, мас. %: Zr — 59,57; Ti — 19,02; Nb — 21,41. Сплав відноситься до біосумісних матеріалів із низьким модулем пружності ($E = 47...55$ ГПа) на основі системи цирконій–титан та може бути використаний для виготовлення медичних імплантатів в хірургії, ортопедії, травматології, стоматології та ін. [13].

Таблиця 1. Хімічний склад шихтових матеріалів, які застосовуються для отримання сплаву, мас. % (не більше)

Марка	Основа	Ti	Fe	Si	Ni	C	Cl	N	O
ТГ-90 ДСТУ 3079–95	Титан	–	0,05	0,01	0,04	0,02	0,08	0,020	0,04
НбШ 1 ГОСТ 16100–79	Ніобій	0,070	0,08	0,03	–	0,06	–	0,050	–
КТЦ-100 ТУ 95.2185–90	Цирконій	0,007	0,03	0,01	0,01	0,02	0,003	0,006	0,14

Таблиця 2. Хімічний склад і кількість легуючих елементів у сплаві типу Zr–Nb–Ti, мас. %/г

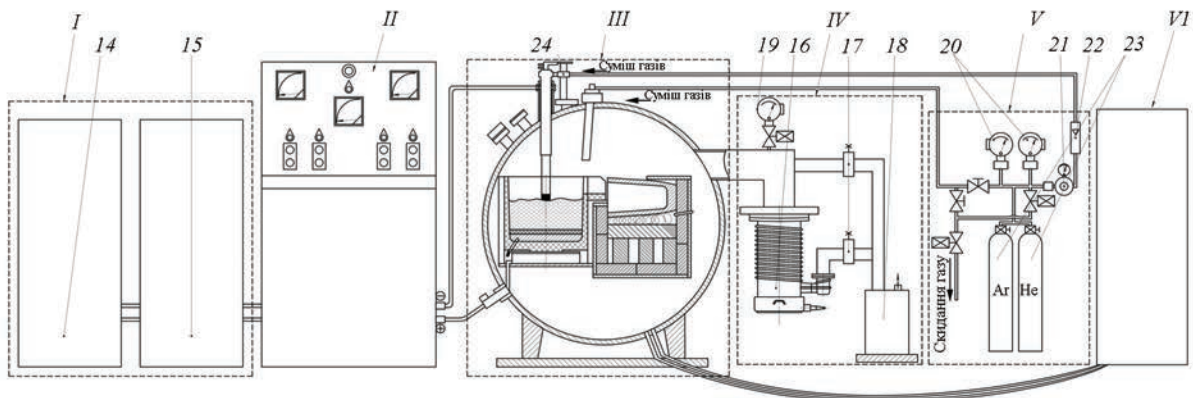
Zr	Nb	Ti	Всього
60/1800	21/630	19/570	100/3000

В якості вихідних шихтових матеріалів використовували цирконій КТЦ-100 електронно-променевого плавлення у вигляді порізаного на шматки зливка, ніобієві штабіки розміром 18×22×550 мм і титанову губку ТГ-90 (фракційний склад — 12 + 2 мм) (табл. 1). Суворих вимог до дисперсності і гранулометричного складу губки не висували.

Перед початком робіт надані матеріали попередньо подрібнювали до фракції 5...15 мм шляхом механічного дроблення, різання, перемішували і шихтували. Вибір фракційного складу шихти виходить із необхідності повного розплавлення і рівномірного розподілу в ванні рідкого металу. Шихту готували з урахуванням теоретичного коефіцієнту переходу елементів дослідного складу.

Розрахунок шихти проводили з урахуванням ваги зливка, яка дорівнює 3,0 кг (табл. 2). Зважування вихідних матеріалів здійснювали на вагах настільних циферблатних ВНЦ-2М.

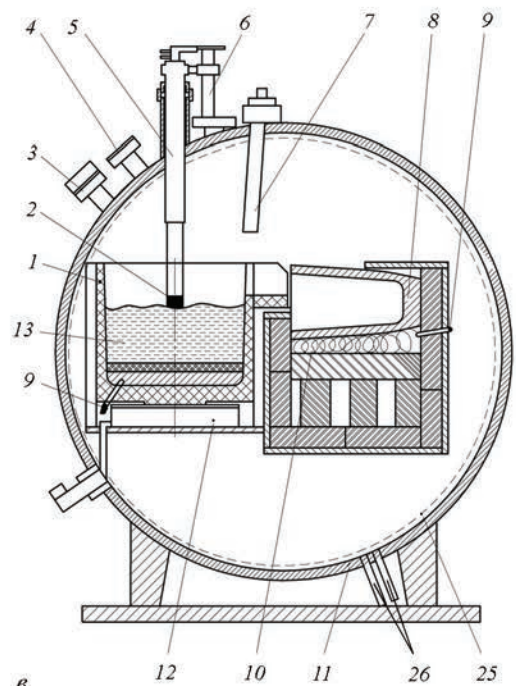
Виплавку зливок дослідного сплаву системи Zr–Nb–Ti виконували способом ВДП з невитрат-



а



б



в

Рис. 1. ВДП: а — загальна схема; б — зовнішній вид плавильного простору; в — схема плавильного простору: I — система живлення; II — система керування (шафа керування та реєстрації); III — плавильний простір; IV — вакуумна система; V — система подачі захисного газу; VI — система охолодження; 1 — тигель; 2 — неплавкий електрод; 3 — оглядове вікно із відеореєстрацією; 4 — оглядове вікно; 5 — електродотримач; 6 — привод переміщення електроду; 7 — підведення аргону; 8 — кокіль; 9 — термопара; 10 — нагрівачі; 11 — плавильна камера; 12 — анод; 13 —металева ванна; 14 — трансформатор; 15 — діодний блок; 16 — ресивер; 17 — вакуумний вентиль; 18 — форвакуумний насос; 19 — вакуумметр; 20 — манометр; 21 — редуктор; 22 — ротаметр; 23 — балони із захисним газом; 24 — колектор; 25 — пристрій обертання; 26 — патрубки охолоджуючої рідини

ним електродом у вакуумно-дуговій гарнісажній печі (ВДГП) (рис. 1, технічні характеристики наведені нижче). Плавлення вели мідним водоохолоджуваним електродом із вольфрамівим наконечником у тиглі, який виготовлено з графіту марки МПГ-7 [14].

Технічні характеристики вакуумно-дугової гарнісажної печі

Встановлена потужність, кВт	80
Номинальна потужність, кВт	50
Діапазон робочого тиску, мм. рт. ст.	$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-5}$
Максимальний хід штока, мм	380
Швидкість вертикального переміщення штока, мм/хв.	≤ 1050
Максимальний внутрішній діаметр тигля, мм	190
Максимальна внутрішня висота тигля, мм	170
Максимальний внутрішній діаметр кокілю, мм	150
Максимальна внутрішня висота кокілю, мм	220
Максимальна сила струму плавлення, А	3500
Максимальна напруга плавлення, В	55
Ємність номінальна, кг	25
Час розплавлення під струмом, хв.	15...30
Витрата води на охолодження печі, м ³ /год	8
Займана площа (без джерела живлення), м ²	5

У подальшому в роботі вивчали розподіл хімічних елементів. Для цього зливки механічно обробляли та розрізали у повздовжньому напрямі (рис. 2). Механічну обробку зливка здійснювали на токарно-гвинторізному верстаті 16К20, різання — на горизонтально-фрезерному верстаті моделі 6Р81.

Склад основних легуючих елементів оцінювали за допомогою скануючого мікроскопа JSM-IT300LV (Jeol, Японія), обладнаного рентгенівським енергодисперсійним мікроаналізом X-Max 80 (Oxford Instruments, United Kingdom). Вміст кисню визначали відповідно за допомогою газоаналізатора моделі ON900 фірми «ELTRA».

Результати експериментів та їх аналіз. Для отримання заданого хімічного складу проводили вибір і розрахунок шихтових матеріалів, а також коефіцієнтів переходу легуючих елементів з шихтових матеріалів в зливки. Цирконій і титан активно взаємодіють як з газами (кисень, азот, водень) під час технологічного процесу їх отримання, так і з вуглецем й металами. Наявність домішок призводить до зміцнення та підвищення нормального

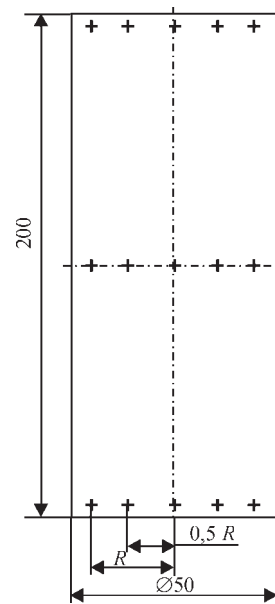


Рис. 2. Схема аналізу хімічного складу зразків дослідних плавлень: + — місця визначення хімічного складу

модуля пружності. Цю проблему вирішували шляхом використання шихти високої чистоти. При виборі шихтових матеріалів було застосовано попередній досвід виплавлення цирконієвих сплавів [15], де проведено аналіз і дослідження по підбору шихтових матеріалів для реалізації отримання дослідного сплаву. Встановлено найбільш раціональні шихтові матеріали, зокрема замість дорогого йодідного цирконію застосовується цирконієвий сплав, в даному випадку КТЦ-100. При цьому для забезпечення допустимої концентрації кисню, яка не повинна перевищувати відповідні значення для нелегованого титану і сплаву ВТ6 (ISO 5832-2 та ISO 5832-3) використовували титанову губку ТГ-90. Тому в даній роботі використана шихта, яка дозволяє, не впливаючи на хімічний склад і механічні властивості, застосовувати доступну сировину, яка знизить підсумкову вартість продукту.

З метою відпрацювання режимів і коефіцієнтів переходу елементів при гарнісажному плавленні отримували зливки дослідного сплаву системи Zr-Nb-Ti. Завалку в графітовий тигель всіх компонентів проводили одночасно. Основна вимога при цьому — забезпечення максимально можливої щільності укладки матеріалів. Перед початком плавлення піч вакуумували. Після чого її заповню-

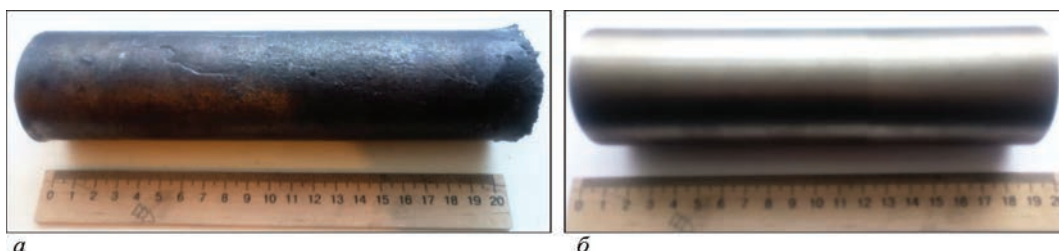


Рис. 3. Вид зливка сплаву після виплавлення (а) і механічної обробки (б)

Таблиця 3. Розподіл легуючих елементів і домішок зразків цирконієвого сплаву, мас. %

Частина зливка	Місце відбору проб	Zr	Nb	Ti	O
<i>Середнє значення п'яти плавок</i>					
Верх	0·R	60,11	22,45	17,31	0,13
	0,5·R	60,47	21,99	17,41	
	R	61,36	21,18	17,33	
Середина	0·R	59,81	22,34	17,74	0,11
	0,5·R	60,07	21,98	17,84	
	R	60,30	21,78	17,81	
Низ	0·R	60,99	21,46	17,43	0,12
	0,5·R	60,66	21,85	17,37	
	R	60,39	22,17	17,32	
Середнє	–	60,46	21,91	17,51	0,12
<i>Контрольне плавлення</i>					
Верх	0·R	60,89	20,48	18,5	0,13
	0,5·R	60,72	20,01	19,14	
	R	59,35	21,40	19,12	
Середина	0·R	59,23	21,45	19,21	0,11
	0,5·R	60,1	20,80	18,99	
	R	59,39	21,37	19,13	
Низ	0·R	59,88	21,4	18,60	0,12
	0,5·R	60,31	20,61	18,96	
	R	59,69	21,02	19,17	
Середнє	–	59,95	20,95	18,98	0,12
<i>Примітка.</i> 0·R — вісь зливка; 0,5·R — середина радіусу; R — периферійна зона (5 мм від поверхні зливка) (див. рис. 2).					

вали сумішшю інертних газів (аргон + гелій). Після розплавлення і перемішування (за допомогою управління дугою) розплав виливали в графітовий кокіль висотою 220 мм, де він і охолоджувався. Контроль температури здійснювали посередньо термопарою ВР5/20 А-1 діаметром 0,5 мм, яка розташована в днищі тигля, і безпосередньо пірометром через оглядове вікно.

Чисельні значення технологічних параметрів гарнісажного плавлення для зливок системи Zr–Nb–Ti наступні:

маса завантаження, кг	3,0
сила струму I, А	1000...1800
напряга U, В	25...50
тиск вакуумування P, Па	99·10 ⁻⁷
час відкачування вакууму, хв	10...15
тиск робочого середовища P, Па	3500...10000
робоче середовище суміш газів Ar/He, %	70/30
час підігрівання кокілю перед плавленням, хв	30...35
час плавлення, хв	25...30
температура розплаву перед заливкою, °С	1550...1750
час охолодження металу в кокілі, хв	60...90
діаметр зливка, мм	50

В результаті плавлень отримані п'ять зливок дослідного сплаву системи Zr–Nb–Ti діаметром 50 мм, довжиною 215...220 мм і масою 2,3...2,5 кг. Зливки механічно обробляли, після чого аналізу-

вали розподіл елементів по перетину. Зовнішній вигляд заготовки після виплавлення і механічного оброблення представлений на рис. 3.

Проведено дослідження якості отриманого зливка цирконієвого сплаву системи Zr–Nb–Ti діаметром 50 мм способом ВДП із невитратним електродом у вакуумній дуговій гарнісажній печі. Візуальний огляд показав, що бічна поверхня отриманого зливка чиста, підвищена концентрація домішкових елементів на поверхні у вигляді окисненого шару відсутня. Дефекти у вигляді розривів, тріщин або несплавлення відсутні.

Згідно аналізу хімічного складу металу, який визначено спектральним методом (табл. 3), цирконій, ніобій, титан і кисень по висоті і перетину розглянутого зливка розподілені рівномірно, розходження у вмісті елементів знаходиться в межах похибки аналізу. Порівняння даних табл. 2 та 3 дозволило встановити, що хімічний склад зливка не відповідав вимогам поставленого завдання, тому виконано уточнення коефіцієнтів переходу та коригування складу шихти. Для встановлення коефіцієнтів переходу компонентів шихти при виплавленні зливок проводили порівняння хімічного складу, який регламентували при розрахунку шихти і хімічного складу, фактично отриманого за середнім значенням табл. 3. Порівняння даних табл. 2 та 3 дозволяє розрахувати коефіцієнти переходу елементів лігатури: Zr — 1,00; Nb — 1,00; Ti — 0,95.

Таким чином, з аналізу даних табл. 3 випливає, що для забезпечення необхідної концентрації хімічних елементів у сплаві необхідно коригувати склад шихти з урахуванням коефіцієнтів переходу. Для остаточного висновку про відповідність дослідного сплаву необхідним вимогам провели контрольне плавлення з урахуванням коефіцієнтів переходу, які визначені експериментально. В результаті хімічний склад отриманого зливка, який визначено спектральним методом, відповідав вимогам завдання (табл. 3).

Висновки

1. Проведено аналіз способів отримання зливок із сплавів цирконію. Показано, що з найбільш поширених методів, з урахуванням специфіки шихтових матеріалів, а також отримання зливка, найбільш перспективною є схема, що включає ВДП з попереднім отриманням витратного електрода з різнофракційної та різнокомпонентної шихти.

2. Проведено дослідження щодо реалізації технологічного процесу отримання цирконієвого сплаву із застосуванням дугової печі типу УПДА для отримання витратного електрода діаметром 50 мм. Проведений комплекс робіт дозволив ви-

значити технологічні параметри ВДП з невитратним електродом у вакуумній дуговій гарнісажній печі зливків дослідного цирконієвого сплаву системи Zr–Nb–Ti і встановити коефіцієнти переходу елементів шихти. Оцінка переходу елементів сплаву дозволила встановити коефіцієнти переходу для Zr (1,00), Nb (1,00), Ti (0,95).

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

Список літератури

1. Ивченко З.А., Лунев В.В. (2010) Изготовление и использование прессованных титановых брикетов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **1**, 90–92.
2. Ахонин С.В., Пикулин А.Н., Березос В.А. и др. (2019) Лабораторная электронно-лучевая установка УЭ-208М. *Современная электрометаллургия*, **3**, 15–22.
3. Ахонин С.В., Фирстов С.А., Северин А.Ю. и др. (2019) Электронно-лучевая выплавка жаропрочных титановых композитов системы Ti–Si–Al–Zr–Sn. *Там же*, **2**, 7–12.
4. Ладохин С.В., Вахрушева В.С. (2018) Применение электронно-лучевой плавки для получения сплавов циркония в Украине. *Там же*, **4**, 36–41.
5. Аржакова В.М., Федотов С.Ф., Ермакова Л.Ф. (2000) Исследование структурного состояния циркониевых слитков сплавов Э110 и Э125 двойного вакуумно-дугового переплава с использованием радиоактивных индикаторов. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*, **2**, 94–97.
6. Ажажа В.М., Болков А.Ф., Борц Б.В. и др. (2005) Вакуумно-дуговой способ получения трубной заготовки из сплава Zr1%Nb. *Там же*, **5**, 110–114.
7. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. (2008) *Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорреакционных металлов*. Киев, Наукова думка.
8. Ахонин С.В., Пикулин О.М., Березос В.О. та ін. (2019) Формування витратних електродів з брикетованого губчастого титану в електронно-променевої установці. *Современная электрометаллургия*, **2**, 26–31.
9. Агеев С.В., Москвичев Ю.П. (2003) *Способ вакуумно-плазменной плавки металлов и сплавов в гарнисажной печи и устройство для его осуществления*. РФ, Пат. 2346221.
10. Волохонский Л.А. (1985) *Вакуумные дуговые печи*. Москва, Энергоатомиздат.
11. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.О. та ін. (2020) Одержання великогабаритних зливків алюмінідів титану способом ЕПП. *Сучасна електрометалургія*, **2**, 18–22.
12. Пилипенко Н.Н., Дробышевская А.А., Ажажа Р.В. и др. (2013) Материалы на основе циркония для создания медицинских имплантатов. *Journal of Kharkiv National University: Physical series «Nuclei, Particles, Fields»*, 1059, **3/59**, 105–109.
13. Івасишин О.М., Скиба І.О., Карасевська О.П., Марковський П.Є. (2013) *Біосумісний сплав із низьким модулем пружності на основі системи цирконій–титан (варіанти)*. Україна, Пат. 102455.
14. Ефанов В.С., Джуган А.А., Овчинников А.В. и др. (2019) Усовершенствование технологии выплавки слитков из никелевого сплава методом вакуумно-дугового переплава. *Сб. науч. тр. «Строительство, материаловедение, машиностроение», Стародубовские чтения 2019*, сс. 122–126.
15. 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.

References

1. Ivchenko, Z.A., Lunev, V.V. (2010) Manufacturing and application of titanium pressed briquettes. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metalurgii na Mashynobuduvanni*, **1**, 90–92 [in Russian].
2. Akhonin, S.V., Pikulin, A.N., Berezos, V.A. et al. (2019) Laboratory electron beam unit UE-208M. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **3**, 15–22 [in Russian].
3. Akhonin, S.V., Firstov, S.A., Severin, A.Yu. et al. (2019) Electron beam melting of heat-resistant titanium composites of Ti–Si–Al–Zr–Sn system. *Ibid.*, **2**, 7–12 [in Russian].
4. Ladokhin, S.V., Vakhrusheva, V.S. (2018) Application of electron beam melting for producing zirconium alloys in Ukraine. *Ibid.*, **4**, 36–41 [in Russian].
5. Arzhakova, V.M., Fedotov, S.F., Ermakova, L.F. (2000) Investigation of structural state of zirconium ingots of E110 and E125 alloys of double vacuum arc remelting using radioactive indicators. *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki, Seriya: Fizika Radiatsionnykh Povrezhdenii i Radiatsionnoe Materialovedenie*, **2**, 94–97 [in Russian].
6. Azhazha, V.M., Bolkov, A.F., Borts, B.V. et al. (2005) Vacuum-arc method for producing a pipe billet from an alloy Zr1%Nb. *Ibid.*, **5**, 110–114 [in Russian].
7. Paton, B.E., Trigub, H.P., Akhonin, S.V. (2008) *Electron beam melting of refractory and high reactive metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
8. Akhonin, S.V., Pikulin, O.M., Berezos, V.O. et al. (2019) Forming consumable electrodes from briquetted sponge titanium in electron beam unit. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **4**, 26–31 [in Russian].
9. Ageev, S.V., Moskvichev, Yu.P. (2003) *Method of vacuum-plasma melting of metals and alloys in skull furnace and equipment for its implementation*. RF, Pat. 234622, LLC SFERAMET [in Russian].
10. Volokhonsky, L.A. (1985) *Vacuum arc furnaces*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
11. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O. et al. (2020) Producing large-sized ingots of titanium aluminides by EBM method. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **2**, 18–22 [in Ukrainian].
12. Pilipenko, N.N., Drobyshevskaya, A.A., Azhazha, R.V. et al. (2013) Zirconium-based materials for creation of medical implants. *Zh. KhNU: Series Nuclei, Particles, Fields*, 1059(3/59), 105–109 [in Russian].
13. 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)*. Ukraine, Pat. 102455, IMP [in Ukrainian].
14. Efanov, V.S., Dzhugan, A.A., Ovchinnikov, A.V. et al. (2019) Improvement of technology for smelting nickel alloy ingots by vacuum arc remelting method. *Starodubovskie Chteniia 2019. Stroitelstvo, Materialovedenie, Mashinostroenie*, 122–126 [in Russian].
15. 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.

TECHNOLOGY FOR SMELTING ZIRCONIUM ALLOY INGOTS
BY VACUUM ARC REMELTING WITH A NON-CONSUMABLE ELECTRODE
IN A SKULL FURNACE

O.V. Ovchynnykov, O.E. Kapustian

Zaporizhzhia Polytechnic National University.

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

The results of studying the possibility of obtaining ingots of zirconium alloy of the Zr–Nb–Ti system using the method of vacuum-arc remelting of charge material of various chemical compositions are presented. A technology was developed for producing a zirconium alloy of a given composition by vacuum-arc remelting with a non-consumable electrode in a vacuum-arc skull furnace. A complex of technological and material science problems was solved, a study of technological factors, methods and processes of metallurgy associated with the choice of equipment, tooling and charge for melting was carried out, a technological process for obtaining ingots with a given homogeneous chemical composition was developed for further deformation processing, in order to obtain an initial billet. The content of the main alloying elements was estimated using a scanning microscope, and of oxygen — using a gas analyzer. The technological parameters of smelting are established and the transition coefficients of the charge elements during arc remelting with a non-consumable electrode in a vacuum-arc skull furnace are determined. It was established that the content of zirconium and niobium in the ingots corresponds to the calculated composition of the initial charge, and the titanium content is lower. Control ingots of 50 mm diameter were melted taking into account the transition coefficients by the method of vacuum-arc remelting with a non-consumable electrode in a vacuum-arc skull furnace. Ref. 15, Tabl. 5, Fig. 3.

Key words: vacuum-arc remelting; furnace; zirconium alloy; ingot; chemical composition; transition coefficient

Надійшла до редакції 30.09.2020

**XX МІЖНАРОДНИЙ
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ - 2021**
МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

**16 - 19
ЛИСТОПАДА**

МЕТАЛІ-ОБРОБКА УЗОРОВАВАННЯ ГІДРАВЛІКА ПНЕВМАТИКА ВІДШИВНИКІ ЗАХИСТ УКРАЇНО УКРАЇНОМ АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ ЕТАЛОНИ, БРИЛАДИ ІНФОРМАЦІЙНО-ТРАНСПОРТНЕ СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА



Вхід вільний, тільки по онлайн реєстрації!

НОВА КНИГА



Молтагасов А.В., Клочков И.Н., Мотрунич С.И. **Расчет усилий при контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы.** Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2020. — 122 с.

Монография посвящена разработке методик расчёта усилий, затрачиваемых на преодоление сопротивления деформированию шунтирующей части заготовок изделий замкнутой формы при их изгибе в процессе контактной стыковой сварки. При помощи инженерных методов, основанных на гипотезах сопротивления материалов, получены формулы для определения затрачиваемого на изгиб и разрывного усилий при сварке звеньев цепей.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся определением силовых параметров процесса контактной стыковой сварки оплавлением или сопротивлением изделий замкнутой формы, расчётом и проектированием приводов осадки контактных сварочных машин. Может быть полезна студентам, аспирантам и преподавателям высших технических учебных заведений машиностроительных и сварочных специальностей.