

ОТРИМАННЯ ДЕФОРМОВАНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ ЦИРКОНІЄВОГО СПЛАВУ ІЗ ЗЛИВКІВ, ВИПЛАВЛЕНИХ СПОСОБОМ ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВУ З НЕВИТРАТНИМ ЕЛЕКТРОДОМ У ГАРНІСАЖНІЙ ПЕЧІ

О.Є. Капустян¹, І.А. Овчинникова²

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

Проведено роботи по дослідженню можливості отримання деформованих напівфабрикатів у вигляді прутків цирконієвого β-сплаву зі зливок дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі. Зливки діаметром 50 мм отримували шляхом однократного переплаву некомпактної шихти. Гарячу деформацію зливок для виготовлення прутків діаметром 30 мм проводили шляхом кування на молоті кувальному пневматичному. Наведено режими кування зливок. Проведена гаряча деформаційна обробка зливок цирконієвого сплаву призвела до розтріскування поковки. Розтріскування відбувалося по хаотично розташованим зонам. За місцем і формою переважають «зовнішні прості» тріщини глибиною до 5 мм. Дослідження структури металу зливка дослідного цирконієвого сплаву системи Zr–Nb–Ti, отриманого способом дугового переплаву із невитратним електродом у гарнісажній печі, показало відсутність мікропор, тріщин та інших дефектів. За допомогою метода мікрорентгеноспектрального аналізу встановлено наявність фази із підвищеною концентрацією цирконію та у 2,5...3,0 рази меншою концентрацією титану і ніобію у порівнянні з матричною фазою. Розмір фази складав від 1 до 30 мкм. Для отримання зливка із заданим гомогенним хімічним складом запропоновано використовувати подвійний переплав: після дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі використовувати вакуумно-дуговий з витратним електродом. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: вакуумно-дуговий переплав; цирконієвий сплав; зливки; хімічний склад; структура; деформаційна обробка; поковка; напівфабрикати

Останнім часом спостерігається значне підвищення обсягу дослідних робіт, метою яких є отримання сплавів з новим комплексом властивостей медичного призначення. Розвиток медицини вимагає значного збільшення обсягів виробництва спеціальних цирконієвих сплавів і розробки нових [1, 2]. Для організації в Україні виробництва напівфабрикатів зі сплавів цирконію необхідно провести дослідження з розробки оптимальних технологій виробництва, які забезпечать необхідні вимоги до якості та структури напівфабрикатів [1]. Тому ставилось завдання по розробці технологічних процесів отримання матеріалів, які мають високий

комплекс механічних властивостей та зазнають корозійний вплив.

Виробництво напівфабрикатів із цирконієвих сплавів пов'язано з цілим рядом технологічних операцій, для виконання яких необхідний високо-температурний нагрів з подальшою гарячою деформацією. До таких технологічних операцій слід віднести ковку, катання, калібрування. Кування є одною з основних операцій першої стадії деформаційної обробки зливок для одержання з них напівфабрикатів (сляб, прутки, лист) і кінцевих виробів (рис. 1).

Теплофізичні особливості цирконію та сплавів на його основі вимагають ретельного підходу до процесів їх деформаційної обробки. Це обумовлено тим, що цирконій та титан мають низькі коефіцієнти теплопровідності (22,7 та 21,9 Вт/(м·К)) відповідно [1], що призводить до виникнення значних внутрішніх напружень, а при перевищенні їх граничної межі й до тріщиноутворення внаслідок перепадів температури по перетину при нагріванні зливка перед та в процесі його деформаційної обробки, а також при охолодженні в процесі та після деформаційної обробки.

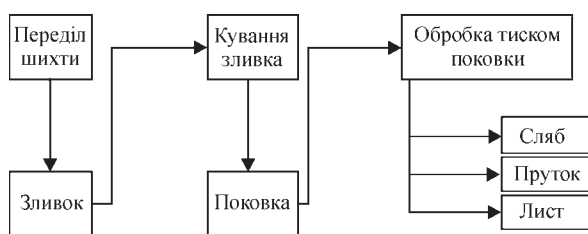


Рис. 1. Технологічна схема отримання напівфабрикатів шляхом кування зливка

О.Є. Капустян — Scopus Author ID: 57189211531, І.А. Овчинникова — <https://orcid.org/0000-0002-4035-129X>

Тому технології отримання сплавів цирконію складні й вимагають спеціального підходу як на стадії виплавки зливків [1], так і подальших обробок заготовок для виготовлення виробів або напівфабрикатів (рис. 1).

Мета даної роботи — отримання напівфабрикатів шляхом гарячої деформаційної обробки (куванням) зливків сплаву системи Zr–Nb–Ti, виплавленого способом переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі та оцінка його гомогенності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс технологічних і матеріалознавчих задач, провести дослідження впливу хімічного складу та структури на процес обробки металів тиском (куванням), розробити технологічний процес виготовлення якісних бездефектних деформованих напівфабрикатів цирконієвого сплаву із заданим гомогенним хімічним складом, отриманого способом переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі.

Матеріали та методики досліджень. В якості вихідних матеріалів використовували зливки діаметром 50 мм, отримані способом дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі за технологією, яка розроблена в НДЦ «Титан Запоріжжя» НУ «Запорізька політехніка» [1]. Хімічний склад отриманих зливків приведено в табл. 1 [7, 8]. Цей сплав, можна використовувати як для лиття, так і для подальшої деформації.

Велике значення мають металургійні дефекти в середині та на поверхні зливків; структура та властивості, які максимально сприяють його подальшим деформаційній, термічній і механічній обробкам. Для дослідження наявності в зливках зі сплавів цирконію внутрішніх дефектів у вигляді неметалевих включень, пор і несущільностей використовували метод ультразвукової дефектоскопії. Дослідження проводили за допомогою ультразвукового дефектоскопу УД2-12 ехоімпульсним методом при контактному варіанті контролю.

Згідно з технологічною схемою (рис. 1) другою операцією є кування. З метою подальшого вивчення якості металу зливків сплаву цирконію, отриманих способом дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі, проведені комплексні дослідницькі роботи з виготовлення напівфабрикатів у вигляді поковок з подальшою обробкою тиском для отримання прутка.

Розробка технологічного процесу кування складається з наступних етапів: призначення ковальських переходів; вибір обладнання; визначення режимів нагрівання та охолодження.

Попередньо механічно оброблені зливки піддавали гарячому переділу для виготовлення прутків

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

Сплав	Zr	Nb	Ti	O
Zr–Nb–Ti	Основа	21,0	19,0	0,08
Zr–Ti [7]	55,0...63,0	16,0...24,0	16,0...23,0	–*

*Концентрація кисню згідно з вимогами міжнародного [8] стандарта на імплантати становить до 0,2 %.

діаметром 30 мм за допомогою молота кувального пневматичного М415А, основні технічні характеристики якого наступні:

номінальна маса частин, що падають, кг	400
хід баби, мм	700
число ударів, хв ⁻¹	130
висота робочої зони у світлі, мм	530
виліт від осі баби до станини, мм	520
потужність двигуна головного руху, кВт	37
габарити, мм:	
довжина	3200
ширина	1320
висота	2700
маса, кг	13100

Нагрівання зливків для пластичної деформації виконували в електропечі опору камерній СНЗ, основні технічні характеристики якої наступні:

розміри робочого простору, мм:	
ширина	600
довжина	1200
висота	500
номінальна потужність, кВт	45
напруга, В	380/220
число фаз	3
максимальна робоча температура, °С	1050
продуктивність, кг/год	200
час розігрівання холодної печі до 850°, год	7
маса з футеровкою, т	3,2
габарити, мм:	
ширина	1400
довжина	2200
висота	1750

У процесі обробки контролювали температуру у печі. Температура у робочому просторі печі вимірювали хромель-алюмелевим термоелектричним термометром градування ХА68, інформація з якого показувалася на вторинному приладі типу ДИСК-250 зі шкалою від 0 до 1300 °С та класом точності 0,5.

З метою оцінки якості зливків сплаву Zr–Nb–Ti і можливостей використання переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі для отримання заготовок медичного призначення, проводили вивчення однорідності хімічного складу і структури зразків, відібраних по довжині зливків в різних частинах (верхньої, середньої і нижньої). Для цього зливки механічно обробляли та розрізали посередині у повздовжньому та поперечному напрямках.

Токарну механічну обробку зливка здійснювали на токарно-гвинторізному верстаті 16К20,

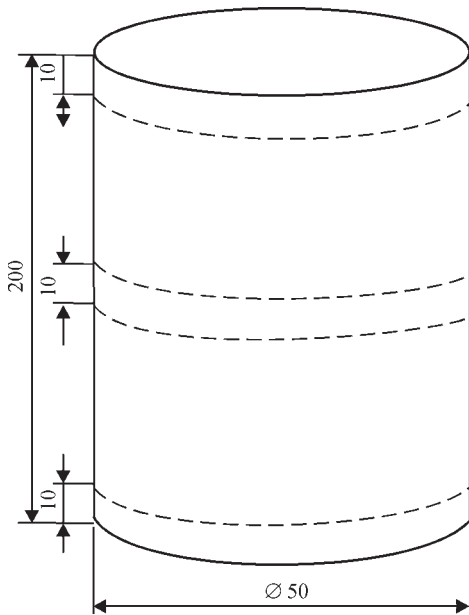


Рис. 2. Схема розкрою зливка

різання — на горизонтально-фрезерному верстаті моделі 6P81.

Дослідження структури, визначення елементного складу зразків, а також якості розподілу основних легуючих елементів в них методом рентгеноспектрального мікроаналізу проводили на базі аналітичного комплексу, що складався з електронного растрового мікроскопу JSM-IT300LV



Рис. 3. Процес кування цирконієвого сплаву системи Zr–Nb–Ti на молоті

(Jeol, Japan), укомплектованого рентгенівським енергодисперсійним спектрометром (ЕДС) X-Max 80 (Oxford Instruments, United Kingdom) для аналізу елементів (від берилію до урану) з зображенням усього знайденого спектру в режимі реального часу. Енергетична роздільна здатність по енергії на лініях спектру $MnK\alpha$ $E = 123$ еВ, діаметр електронного зонду — 1 мкм.

Для проведення досліджень структури зливки розрізали по висоті на темплети товщиною 10 мм. Темплети вирізали на відстані 5...10 мм від верху і низу злиwkів, а також з їх середини. Схема розкрою зливка показана на рис. 2. Для дослідження мікроструктури з темплетів вирізали зразки розміром $10 \times 10 \times 10$ мм у поздовжньому і поперечному напрямках.

Зразки для металографічних досліджень виготовляли послідовним шліфуванням і поліруванням. Для приготування шліфів вирізані зразки закріплювали в струбцинах і шліфували вручну водостійким шліфувальним папером різної зернистості з поступовим переходом від більш грубого (150 мкм) до мілкового абразиву (10 мкм). Полірування шліфів здійснювали на кругах, обтягнутих сукном з грубої вовни. Як абразивний матеріал застосовували суспензію з кип'яченої води й фільтрованого окису хрому (100 г/1,5 л води). Остаточне полірування виконували на кругах, обтягнутих оксамитом, за допомогою чистого бензину. Полірування проводили до надання шліфу дзеркального блиску [9]. Хімічне травлення шліфів для виявлення структури здійснювали з використанням реактивів, що складаються з суміші кислот (сірчана-воднева ГОСТ 2567–89, азотна ГОСТ 11125–84) і перекису водню або гліцерину [10].

Результати експериментів та їх аналіз. При дослідженні злиwkів методом ультразвукової дефектоскопії спостерігалися типові для литого металу множинні відбивання малої амплітуди — відбивання від границь зерен. Внутрішня структура злиwkів щільна, несущільностей, усадочних раковин, пористості або великих неметалевих включень не виявлено.

Гаряча обробка цирконієвих сплавів не рекомендована при температурі нижче 800 °С, оскільки це пов'язано з небезпекою розтріскування зливка. Тому всі технологічні операції деформаційної обробки заготовок діаметром 50 мм з цирконієвого сплаву проводили при температурі не нижче 850 °С [3] за наступним технологічним режимом:

нагрівання заготовок у печі до температури 950 °С з витримкою протягом 7 хв із застосуванням спеціального кувального мастила;



Рис. 4. Вид зливку дослідного сплаву Zr–Nb–Ti, отриманого способом дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі, після деформаційної обробки (кування): *a* — з боку; *б* — з торця

кування заготовок вздовж осі зливка на молоті плоскими бойками (рис. 3) з 4-ма проміжними нагріваннями за схемою прямокутник–полоса до досягнення ступеня деформації 65 %;

деформування заготовок за один прохід — 5...10 мм (19...36 %);

температура закінчення кування не менш 850 °С;

деформація у струбчині для надання прокату круглого профілю;

охолодження заготовок на повітрі до температури навколишнього середовища.

В процесі другого заходу гарячої деформаційної обробки зливків, отриманих способом дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі, відбулося їх розтріскування по

хаотично розташованим областям (рис. 4). Відповідно до механізмів руйнування металів при обробці їх тиском дані тріщини по зовнішньому вигляду можна віднести до тріщин, які виникають при негативних (зсувних) напруженнях і деформаціях після значної пластичної деформації. За місцем і формою переважали зовнішні прості тріщини [12] глибиною до 5 мм, мали місце поодинокі глибокі тріщини в кутах заокруглення поковки. Дане руйнування можливо при нерівномірному розподілі легуючих елементів і домішок у зливку, яке виникає в результаті недосконалості технології виплавлення сплаву або температурно-деформаційної обробки зливка. Через те, що схема деформації й режими були досить «м'якими», це дозволяє говорити про низькі показники техноло-

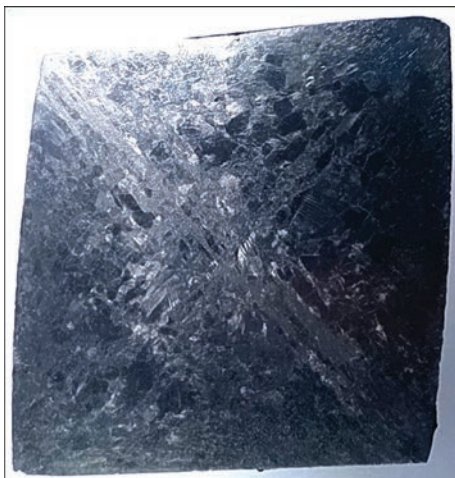


Рис. 5. Макроструктура дослідного зливка, отриманого способом дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі

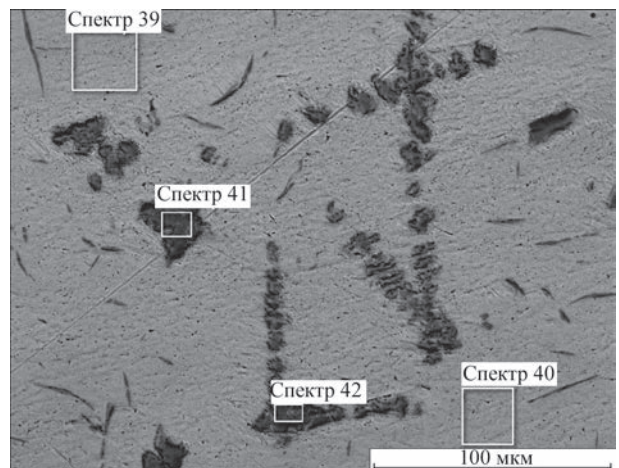


Рис. 6. Хімічний склад фаз дослідного сплаву після деформаційної обробки

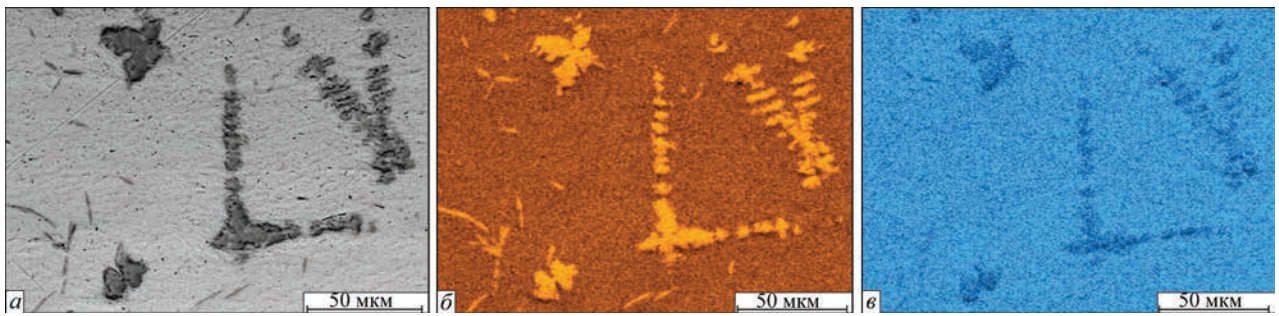


Рис. 7. Мікроструктура дослідного зливка, отриманого способом дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі (а), та розподіл елементів в ньому цирконію (б), ніобію (в)

Таблиця 2. Хімічний склад фаз у дослідному сплаві згідно з рис. 6, мас. %

Спектр	Zr	Nb	Ti	Сума
39	60,15	20,38	19,48	100,00
40	61,18	20,52	18,30	100,00
41	83,45	8,94	7,61	100,00
42	85,84	7,23	6,93	100,00

гічної пластичності матеріалу і металургійної якості зливків.

Встановлено, що макроструктура металу поковки цирконієвого сплаву системи Zr–Nb–Ti (рис. 5), отриманого способом дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі, щільна, однорідна, із відсутністю різного травлення зон по перетину зливка. Внутрішніх металургійних макро- та мікродфектів у вигляді неметалевих включень, пор, порожнин, нещільностей, раковин, тріщин, розшарувань не виявлено. Спостерігалася істотна різниця в структурі центральної та периферійної зон зливка. Центральна зона та одна діагональ зливка мала однорідну зеренну структуру, обумовлену деформаційною обробкою. Спостерігалася невелика витягнутість зерен вздовж цієї діагоналі, пов'язана зі схемою деформації металу. На периферії зливка залишалася літа структура з рівновісними зернами розміром 4...8 мм.

Висока якість вихідного зливка є важливим фактором, що впливає на якість заготовок, виготовлених зі сплавів із спеціальними властивостями. Навіть дуже малий вміст домішок в цирконієвому сплаві може спричинити зміну механічних, корозійних і експлуатаційних властивостей напівфабрикатів і готових виробів і, як наслідок, зміну режимів їх деформаційної та термічної обробки [13].

Аналіз дослідження розподілу основних легуючих елементів у зливку дослідного сплаву системи Zr–Nb–Ti, отриманого способом дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі, наведено на рис. 6, 7.

Встановлено, що як у повздовжньому, так і у поперечному перетинах структура сплаву пред-

ставлена світло-сірого кольору суцільною матричною фазою та більш темною фазою.

За допомогою метода мікрорентгеноспектрального аналізу (рис. 6) встановлено, що хімічний склад включень більш темної за кольором фази містить у 2,5...3,0 рази меншу кількість титану та ніобію у порівнянні з матричною фазою (табл. 2). В таблиці представлені тільки основні хімічні елементи сплаву — Zr, Nb, Ti. При цьому добре проявляється неоднорідність за розмірами та формою (рис. 6, 7) включень із підвищеною концентрацією цирконію. Поряд з невеликими за розмірами ($\approx 1 \times 30$ мкм) поодинокими витягнутими пластинами довільної форми, наявні скупчення більш крупних ($\approx 10 \times 200$ мкм).

Зменшити рівень такої хімічної неоднорідності шляхом термічної або термомеханічної обробки практично неможливо. Тому уникнути утворення неоднорідностей можна тільки на стадії виплавки зливків. Для отримання цирконієвих сплавів використовують переважно подвійний або потрійний вакуумно-дуговий переплав (ВДП) [5]. Тому запропоновано використовувати подвійний переплав: після переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі проводити ВДП з витратним електродом. В даному випадку другий ВДП буде виступати як гомогенізуючий переплав цирконієвого сплаву [14], отриманого дуговою гарнісажною плавкою.

Висновки

1. На підставі аналізу стану розвитку медицини в Україні показана актуальність розробки технологій виробництва сплавів зі спеціальними властивостями. На прикладі сплаву системи Zr–Nb–Ti сформульовано основні напрями досліджень. Показано, що основною первинною операцією формування напівфабрикатів зі зливків є деформаційна обробка.

2. Проведено дослідження якості зливків діаметром 50 мм, отриманих способом однократного переплаву некомпактної шихти з невитратним електродом у гарнісажній печі, методом ульт-

тразвукової дефектоскопії. Внутрішніх дефектів у структурі зливків не виявлено.

3. Проведені металографічні дослідження і кількісна оцінка структур на РЕМ. Метал зливків дослідного цирконієвого сплаву системи Zr–Nb–Ti, отриманого дуговим перепадом з невитратним електродом у гарнісажній печі, характеризується відсутністю дефектів (пор, раковин, включень низької та високої щільності). За допомогою метода мікрорентгеноспектрального аналізу встановлено наявність фази із підвищеною концентрацією цирконію та у 2,5...3,0 рази меншою концентрацією титану та ніобію у порівнянні з матричною фазою. Розмір фази складав від 1 до 30 мкм.

4. Проведено дослідження процесів отримання деформованих напівфабрикатів цирконієвого сплаву із зливків, виплавлених способом дугового перепаду з невитратним електродом у гарнісажній печі. Деформування зливків проводилось методом вільного кування на молоті при високій температурі зливків діаметром 50 мм на діаметр 30 мм. Відбулося розтріскування зливків, отриманих способом однократного дугового перепаду з невитратним електродом у гарнісажній печі, що говорить про низькі показники технологічної пластичності матеріалу і металургійної якості зливків.

5. Доведено, що якісні показники зливка (рівномірність розподілу хімічних елементів у зливку) забезпечують можливість успішної деформаційної обробки. Встановлено, що рівень гомогенності металу зливків після однократного дугового перепаду з невитратним електродом у гарнісажній печі не дозволяє отримувати напівфабрикати шляхом подальшої гарячої деформаційної обробки — куванням зливків.

6. Отримання якісних напівфабрикатів сплаву системи Zr–Nb–Ti потребує подальших досліджень з метою покращення якості зливків — забезпечення гомогенного хімічного складу. Для цього запропоновано внести зміни до технологічної схеми виготовлення напівфабрикатів: замість однократного використовувати подвійний перепад: після дугового перепаду з невитратним електродом у гарнісажній печі виконувати вакуумно-дуговий перепад з витратним електродом.

Список літератури

1. Mishchenko O., Ovchynnykov O., Kapustian O., Pogorelov 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.
2. Капустян О.Є., 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.
3. Патон Б.Е., Ахонин С.В., Березос В.А. (2018) Развитие технологий электронно-лучевой плавки металлов в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. *Современная электрометаллургия*, 4, 19–35 DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.04.01>.
4. Смитлз К.Дж. (1980) *Металлы*. Справ. изд., пер. с англ. Металлургия, Москва.
5. Ажажа В.М., Бутенко И.Н., Борц Б.В. и др. (2007) Сплав Zr1Nb для атомной энергетики Украины. *Ядерная физика та енергетика*, 21(3), 67–75.
6. Овчинников О.В., Капустян О.С. (2020) Технології виплавки зливків цирконієвого сплаву способом вакуумно-дугового перепаду з невитратним електродом у гарнісажній печі. *Сучасна електрометалургія*, 4, 32–38. <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.06>
7. Івасишин О.М., Скиба І.О., Карасевська О.П., Марковський П.Є. (2013) *Біосумісний сплав із низьким модулем пружності на основі системи цирконій–титан (варіант)*. Інститут металознавства ім. Г.В. Курдюмова НАН України. Україна, Пат. 102455.
8. ISO 5832-3:2016: *Implants for surgery — Metallic materials. Part 3: Wrought titanium 6-aluminium 4-vanadium alloy*.
9. Бутенко И.Н., Пельх В.Н., Тур Ю.В. (2006) Металлографические исследования сплава Zr1Nb. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*, 15(1), 170–173.
10. Беккерт М., Клемм Х. (1988) *Способы металлографического травления*. Справ. изд., пер. с нем. Металлургия, Москва.
11. Дриц М.Е. (1985) *Свойства элементов*. Справ. изд. Металлургия, Москва.
12. Охрименко Я.М., Тюрин В.А. (1977) *Теория процессовковки*. Высшая школа, Москва.
13. Колобов Г.А., Павлов В.В., Карпенко А.В., Колобова А.Г. (2015) Рафинирование тугоплавких редких металлов IV группы периодической системы элементов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, 1, 89–95.
14. Ладохин, С.В., Вахрушева, В.С. (2008), Перспективы применения электронно-лучевой плавки для получения сплавов циркония в Украине. *Современная электрометаллургия*, 4, 22–26.

References

1. Mishchenko, O., Ovchynnykov, O., Kapustian, O., Pogorelov, 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.
2. Kapustian, O.E., Ovchynnykov, O.V., Volchok, I.P. (2020) Examination of possibility for application of Zr–Ti–Nb alloys instead of Ti–6Al–4V titanium alloy for biomedical purpose products. *Visnyk KhNADU*, 91(1), 15–22 [in Ukrainian].
3. Paton, B.E., Akhonin, S.V., Berezos, V.A. (2018) Development of technologies of electron beam melting of metals at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. *Suchasna Elektrometal.*, 4, 19–35 [in Russian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.04.01>.
4. Smitlz, K.J. (1980) *Metals*: Refer. Book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

5. Azhazha, V.M., Butenko, I.N., Borts, B.V. et al. (2007) Alloy Zr1Nb for power engineering of Ukraine. *Yaderna Fizyka ta Energetyka*, 21(3), 67–75 [in Russian].
6. Ovchynnykov, O.V., Kapustian, O.E. (2020) Technology for smelting zirconium alloy ingots by vacuum arc remelting with a non-consumable electrode in a skull furnace. *Suchasna Elektrometal.*, 4, 32–38. <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.06>.
7. Ivasyshyn, O.M., Skyba, I.O., Karasevska, O.P., Markovskiy, P.Ie. (2013) *Biocompatible alloy with low modulus of elasticity based on zirconium-titanium system (variants)*. IMP, Pat. 102455, Ukraine [in Ukrainian].
8. ISO 5832-3:2016: *Implants for surgery — Metallic materials*. Pt 3: Wrought titanium 6-aluminium 4-vanadium alloy.
9. Butenko, I.N., Pelykh, V.N., Tur, Yu.V. (2006) Metallographic examinations of Zr1Nb alloy. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. Seriya: Vacuum, Chistye Materialy, Sverkhprovodniki*, 15(1), 170–173 [in Russian].
10. Bekkert, M., Klemm, H. (1988) *Methods of metallographic etching*: Refer. Book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Drits, M.E. (1985) *Properties of elements*: Refer. Book. Moscow, Metallurgiya, [in Russian].
12. Okhrimenko, Ya.M., Tyurin, V.A. (1977) *Theory of forging processes*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
13. Kolobov, G.A., Pavlov, V.V., Karpenko, A.V., Kolobova, A.G. (2015) Refinement of refractory rare metals of IV group of periodic table. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metalurgii ta Mashynobuduvanni*, 1, 89–95 [in Russian].
14. Ladokhin, S.V., Vakhrusheva, V.S. (2008) Prospects of using electron beam melting for production of zirconium alloys in Ukraine. *Advances in Electrometallurgy*, 4, 15–19.

MANUFACTURING DEFORMED SEMI-FINISHED ZIRCONIUM ALLOY PRODUCTS FROM INGOTS, MELTED BY THE METHOD OF NONCONSUMABLE-ELECTRODE ARC REMELTING IN A SKULL FURNACE

O.Ye. Kapustian¹, I.A. Ovchynnykova²

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 possibility of manufacturing deformed semi-finished products in the form of rods of zirconium β -alloy from ingots produced by nonconsumable-electrode arc remelting in a skull furnace was studied. Ingots of 50 mm diameter were produced by single remelting of an uncompacted charge. Hot deformation of the ingots to produce 30 mm diameter rods was performed by forging in a pneumatic forging hammer. Ingot forging modes are given. Performed hot deformation processing of zirconium alloy ingots led to cracking of the forging. Cracks developed in chaotically located zones. «Outer simple» cracks of up to 5 mm depth prevail by the location and shape. Structural studies of metal of an ingot of experimental zirconium alloy of Zr–Nb–Ti system, produced by the method of nonconsumable-electrode arc remelting in a skull furnace, revealed absence of micropores, cracks or other defects. The method of X-ray microprobe analysis was used to establish the presence of a phase with higher zirconium concentration and 2.5...3.0 times lower concentration of titanium and niobium, compared to the matrix phase. Phase size was from 1 to 30 μm . In order to produce an ingot with the specified homogeneous chemical composition, it was proposed to apply double remelting: use consumable-electrode vacuum-arc remelting after nonconsumable-electrode arc remelting in a skull furnace. Ref. 14, Tabl. 2, Fig. 7.

Key words: vacuum-arc remelting; zirconium alloy; ingot; chemical composition; structure; deformation processing; forging; semi-finished products

Надійшла до редакції 20.05.2021

ЖУРНАЛИ для професіоналів



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



Видється з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0657-798X
doi.org/10.37434/trwj
Передплатний індекс 21791



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



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