

УДК 669.046.587.4

- Андрій Борковських аспірант кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: aayy6491@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3662-0597
- Сергій Лушин канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: luschin@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2135-0520
- Микола Борковських інженер, м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: borkovskihnikolaj@gmail.com, ORCID: 0009-0000-8283-4620

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ОТРИМАННЯ АЛЮМІНІЄВО-ЦИРКОНІЄВОЇ ЛІГАТУРИ МЕТАЛОТЕРМІЧНИМ СПОСОБОМ ІЗ ФТОРИДНО-ХЛОРИДНОГО РОЗПЛАВУ

**Мета роботи.** Розробка методу промислового отримання алюмінієво-цирконієвих лігатур металотермічним способом із фторидно-хлоридного розплаву.

**Методи дослідження.** Експериментальний метод отримання лігатури. Спектротричний аналіз. Теоретичний аналіз.

**Отримані результати.** Розроблено метод промислового отримання алюмінієво-цирконієвих лігатур металотермічним способом із фторидно-хлоридного розплаву. Алюмінотермічне відновлення оксиду цирконію з метою отримання алюмінієво-цирконієвих сплавів було вибрано як найбільш економічно доцільний метод. Наведено результати дослідно-промислового виробництва лігатури та вплив технологічних параметрів на техніко-економічні показники процесу. Проведено лабораторні випробування для оцінки оптимальних технологічних параметрів процесу алюмотермії. На отриманих металевих зразках виконувалося спектротричне визначення вмісту цирконію та проводився розрахунок повноти його вилучення. На основі отриманих результатів була обрана принципова технологічна схема для отримання лігатури з вмістом цирконію 5%. Встановлено, що зі зменшенням температури нагріву розплаву флюсу вилучення цирконію в алюмінієвій розплав збільшується. З метою підвищення вилучення цирконію було запропоновано введення флюсу для отримання алюмінієво-цирконієвої лігатури в роздавальну піч до введення в розплав алюмінію алюмінієво-цирконієвої лігатури.

**Наукова новизна.** Показано, що найбільша розчинність оксиду цирконію в криоліті спостерігається при криолітному числі рівному 3,0. Це підтверджує, що розчинником оксиду цирконію (як оксиду алюмінію) є іон  $AlF^6+$ . При зниженні температури процесу та збільшенні часу перемішування розплаву вилучення цирконію в лігатуру зростає. При вивченні різних способів введення шихти в піч максимальне вилучення цирконію в лігатуру в лабораторних дослідках досягнуто при введенні алюмінієвих гранул у сольовий розплав і досягало 92–93%. Попередня обробка розплаву алюмінію в роздавальній печі флюсом від отримання алюмінієво-цирконієвої лігатури дозволяє досягти 99,5% вилучення цирконію із  $ZrO_2$ .

**Практична цінність.** Наведено результати дослідно-промислового виробництва алюмінієво-цирконієвої лігатури металотермічним способом із фторидно-хлоридного розплаву на наявному пічному устаткуванні заводу з виробництва провідниково-кабельної продукції ТОВ «Крок ГТ» та вплив технологічних параметрів на техніко-економічні показники технологічного процесу промислового отримання лігатури.

**Ключові слова:** лігатура, алюміній, цирконій, алюмінотермія, фторидно-хлоридний розплав, флюс, вилучення.

### Вступ

Алюмінієві сплави з різними легуючими елементами завдяки своїм унікальним властивостям знайшли широке застосування в різних галузях промисловості: авіабудуванні, машинобудуванні, електротехніці тощо. Розвиток застосування різних виробів на основі алюмінієвих сплавів визначається наявністю технології їх виготовлення або можливістю розробки такої технології з прийнятними технічними та економічними показниками.

Серед іншого, досягнення високих експлуатаційних характеристик алюмінієвих сплавів ґрунтується

на використанні відповідних лігатур. Чим вищі вимоги пред'являються до споживчих властивостей кінцевого продукту, тим суворіші вимоги до прецизійності складу сплаву, стабільності технологічних параметрів його отримання та подальшої обробки.

Прецизійність складу, у свою чергу, визначається рядом властивостей сировини та матеріалів (хімічний, фазовий, гранулометричний склад тощо), та технологічними параметрами процесів сплавлення, таких як температура, тривалість процесу, необхідність перемішування або, навпаки, створення умов для седиментації гетерофазної системи «розп-

лав–кристали». На все це накладаються обмеження щодо досягнення економічної ефективності процесу в цілому.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Розроблено та пройшли промислові випробування три способи отримання лігатур алюмінію з рідкісними та рідкісноземельними металами (РМ та РЗМ): пряме сплавлення, алюмініотермічне відновлення легуючих металів з їх солей та оксидів, а також електролітичне отримання лігатур [1–3].

Пряме сплавлення, яке передбачає попереднє отримання рідкісного та рідкісноземельного металу в металевому стані, дозволяє точно контролювати склад лігатури, але веде до підвищення собівартості процесу, оскільки вартість металу завжди значно вища, ніж його сполук з іншими елементами. Крім того, для сплавлення алюмінію з набагато більш тугоплавкими РМ або РЗМ необхідно створювати вищі температури порівняно з температурами переробки власне алюмінію та його сплавів (з 750–900 °С до 1200 °С і вище) [1–3].

Отримання алюмінієвих лігатур в електролізерах обмежує можливість вмісту РМ чи РЗМ трохи більше ніж 3%. Це визначається встановленням рівноваги в системі «розплав металу–розплав кріоліту» з відповідними сполуками РМ або РЗМ. При цьому необхідні вищі температури та більші кількості кріоліту порівняно з алюмініотермічним відновленням [4, 5].

Використання алюмініотермічного методу отримання алюмінієво-цирконієвих лігатур дозволяє використовувати вже встановлене промислове обладнання завдяки сумісності температур протікання процесів без його реконструкції, що є істотним фактором при прийнятті рішення про освоєння нового технологічного процесу [6–9]. Отримання сплавів алюмінію з цирконієм, гафнієм і скандієм зазвичай здійснюється шляхом введення фторцирконату (гафнату) калію в розплав хлоридів калію і натрію, після чого вводять хлорид (фторид) легуючого металу з подальшим введенням порцій алюмінієво-магнієвого сплаву [7].

Використання оксидів цирконію та гафнію для синтезу лігатури через їх низьку розчинність і високу корозійну стійкість вимагає високого відношення галогенідного розплаву до алюмінієво-магнієвого сплаву (від 1.2 до 1.6) і температури 1000 °С [7, 8]. Відновлення при більш низькій температурі та меншому співвідношенні сольового розплаву до сплаву можна проводити з використанням солей хлориду, проте це призводить до значного винесення рідкісних металів ( $\text{HfCl}_4 - t_{\text{востг}} = 315 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\text{ZrCl}_4 - t_{\text{востг}} = 333 \text{ }^\circ\text{C}$ ) та ймовірності вибухів при розгерметизації апарату. У зв'язку з вищевикладеним, автори [10,11] пропонують переведення оксидів цих металів в оксифториди. Одержання оксифторидів з їх діоксидів виділяється в окрему стадію процесу, що полягає в обробці концентрованими розчинами плавикової кислоти. В результаті в осаді виходять  $\text{Hf}(\text{Zr})\text{F}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , які при видаленні вологи на повітрі при температурі 200 °С дають оксо-

фториди. Продукти їхнього термічного розкладання мають склад: для гафнію –  $\text{Hf}_4\text{F}_{12}\text{O}_2$ , а для цирконію –  $\text{Zr}_4\text{F}_{10}\text{O}_3$  [10–12].

Найкращими показниками характеризується спосіб алюмініотермічного відновлення цирконію з фторцирконату калію або натрію, яким досягається вилучення цирконію в лігатуру до 90–95 %. Однак через високу вартість і дефіцит фторцирконату цей спосіб не знайшов широкого промислового застосування. Найбільш доступним з цирконійвмісних сполук є оксид цирконію –  $\text{ZrO}_2$ . Однак розчинність його у комплексних фтористих солях невисока. Так, у кріоліті при 1050 °С розчиняється всього 2,2 % [10].

#### Мета роботи

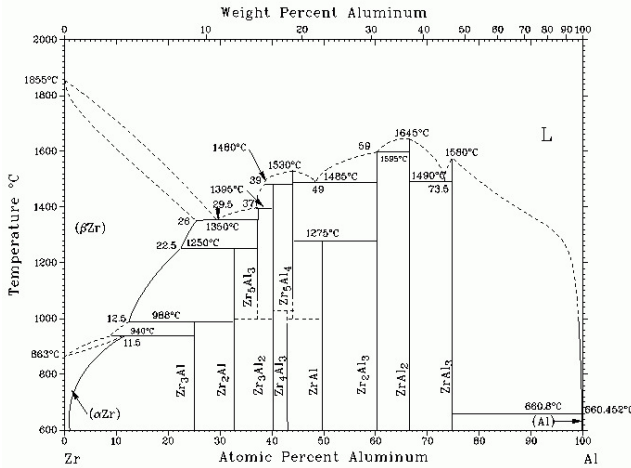
У цій роботі ставилась мета провести розробку технологічного процесу промислового отримання алюмінієво-цирконієвих лігатур на наявному пічному устаткуванні заводу з виробництва провідниково-кабельної продукції ТОВ «Крок ГТ». Технологічні параметри процесів та якісні характеристики сировини і готової алюмінієво-цирконієвої лігатури повинні забезпечувати можливість використання устаткування, що знаходиться в експлуатації, без його реконструкції. Крім того, на наявному устаткуванні було необхідно досягти порівнянних швидкостей (кг/год) виготовлення лігатури та її витрат у роздавальній печі для приготування алюмінієвого сплаву, легованого цирконієм, який може бути використаний в електротехнічній промисловості [13–15].

Таким чином, температура пічного переділу приготування алюмінієво-цирконієвої лігатури не повинна перевищувати 850–900 °С. Температура «засвоєння» лігатури у роздавальній печі також не повинна перевищувати 850–900 °С. При цьому час «засвоєння» має бути порівнянним із часом заповнення роздавальної печі розплавленим алюмінієм із шахтної печі. Під «засвоєнням» розуміється повний перехід всього цирконію в лігатуру в розчин цирконію в розплаві алюмінію без залишкової наявності фаз інтерметалідів складу  $\text{Al}_x\text{Zr}_y$  або випадання цих фаз внаслідок перекристалізації. Вміст цирконію в лігатурі має бути максимально допустимим за умови виконання зазначених вимог.

#### Матеріал і методика досліджень

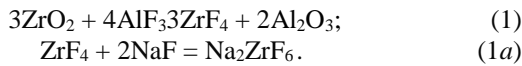
Як компоненти сольової системи при алюмініотермічному відновленні цирконію з  $\text{ZrO}_2$  у роботі були обрані фториди натрію, фторид алюмінію та хлорид калію. Хлорид калію служить середовищем (фоном) під час проведення процесу, забезпечуючи необхідну рідкопоточність сольового розплаву при помірно високих температурах. Фториди натрію та алюмінію беруть участь у комплексоутворенні при взаємодії з простими сполуками цирконію. Фторид алюмінію, крім того, має сильну фторуєчу дію на оксиди при високих температурах процесу [16]. Для оцінки ймовірності утворення інтерметалевих сполук у досліджуваних реакціях відновлення було розглянуто діаг-

рами фазової рівноваги металевих систем. Відповідно до [17–19], система Zr–Al (рис. 1) характеризується утворенням наступних інтерметалевих сполук: AlZr, AlZr<sub>2</sub>, AlZr<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>Zr, Al<sub>2</sub>Zr<sub>3</sub>, Al<sub>3</sub>Zr, Al<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Zr<sub>5</sub>, Al<sub>4</sub>Zr<sub>5</sub>, Al<sub>9</sub>Zr<sub>4</sub>. При температурах вище 1400 °C можливе утворення стабільних конгруентних інтерметалідів Al<sub>4</sub>Zr<sub>5</sub>, Al<sub>2</sub>Zr, Al<sub>3</sub>Zr.

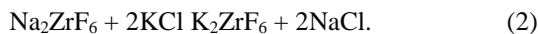


Рисуюнок 1. Фазова діаграма системи Zr – Al [19]

Комплексні фториди цирконію утворюються в системі NaF–ZrF<sub>4</sub> [19], що визначає метод їх отримання шляхом сплавлення відповідних компонентів фторидів лужних металів з фторидом цирконію:



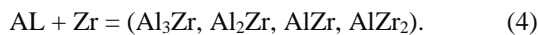
При сплавленні Na<sub>2</sub>ZrF<sub>6</sub> з хлоридом калію утворюється гексофторцирконат калію:



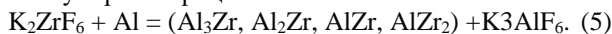
Процес алюмінотермічного відновлення фторцирконату калію протікає за реакцією:



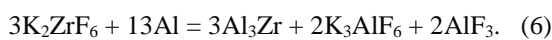
Відновлений цирконій взаємодіє з алюмінієм:



Сумарний процес:



За даними багатьох досліджень і з фотографій шліфів можна дійти невтішного висновку, що утворюється Al<sub>3</sub>Zr [18,19]. Таким чином, за реальних умов організації процесу реакція має вигляд:

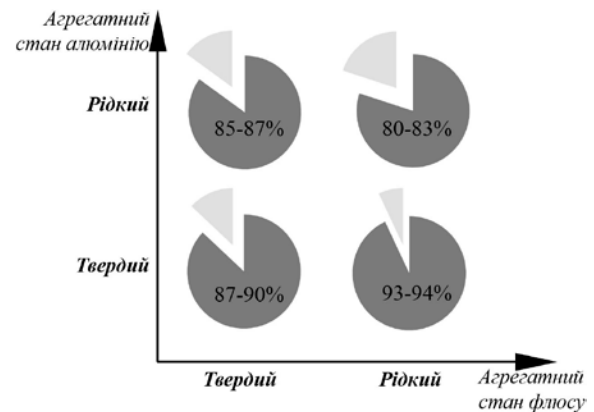


Визначення вмісту цирконію в дослідних зразках алюмінієво-цирконієвих лігатур виконувалось спектрометричним методом на іскровому спектрометрі Spectrolab.

### Результати досліджень

Одержання лігатури Al–Zr проводили в печі опору САТ-0,16. (Виробник: ТОВ «ЛК «МЕЛТ», м. Мелітополь, Україна).

Для оцінки оптимальних технологічних параметрів процесу алюмотермії було проведено лабораторні випробування. Для цього в три алунові тигли була поміщена суміш сухих ZrO<sub>2</sub>, NaF, AlF<sub>3</sub>, KCl. Після цього тигли по черзі встановлювалися в лабораторну муфельну піч, де проводився нагрівання до обраної температури. Після досягнення заданої температури та повного розплаву флюсу вводилася розрахована кількість алюмінію у вигляді нарізаного дроту. Маса алюмінію вибиралася стехіометричною з введеним у флюс оксидом цирконію. Після введення алюмінію кожні п'ять хвилин проводилося перемішування трубою алуновою. Одночасно з перемішуванням проводився відбір отриманого металевого розплаву цієї алунової трубою шляхом нанесення краплі розплаву на поліровану сталеву плиту. На отриманих металевих зразках виконувалось спектрометричне визначення вмісту цирконію та проводився розрахунок повноти його вилучення. Отримані дані представлені на рис. 2.



Рисуюнок 2. Вилучення цирконію в лігатуру (Al–5Zr%) залежно від різного агрегатного стану компонентів шихти (без перемішування) при температурі 800–850 °C, час витримки розплаву – 20 хв. Умовні позначення: темно-сірий – відсоток вилучення Zr в лігатуру; світло-сірий – відсоток Zr, що залишився у флюсі

На основі отриманих результатів була обрана принципова технологічна схема для отримання лігатури з вмістом цирконію 5%, яка представлена на рис. 3.

Для випробування в печі опору САТ-0,16 було обрано варіант введення твердого алюмінію в розплав флюсу. Одержання алюмінієво-цирконієвої лігатури проводили для трьох температур: 850, 880 та 920 °C. Проби металевого розплаву відбиралися кожні п'ять

хвилин після розплавлення алюмінію. Результати представлені у табл. 1.

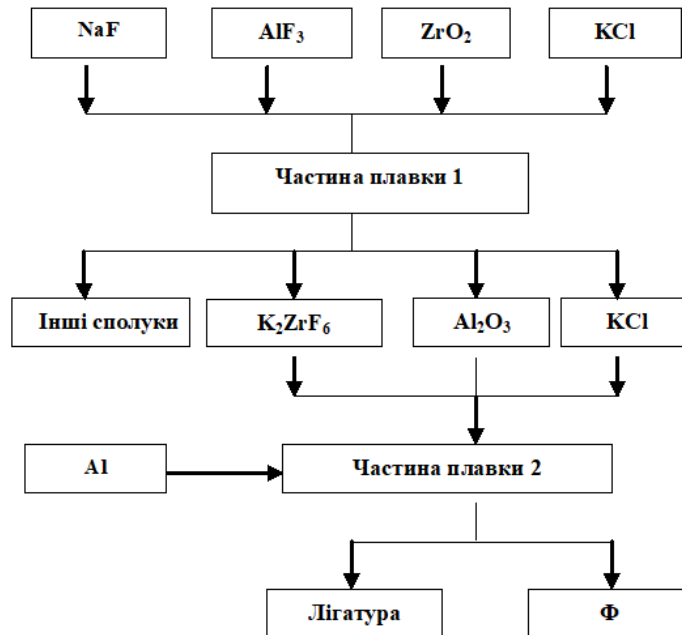


Рисунок 3. Технологічна схема виробництва алюмінієво-цирконієвих лігатур

Таблиця 1 – Залежність вилучення цирконію від часу витримки розплаву

Час експозиції, хв	Вилучення Zr, у залежності від температури, %		
	850 °C	880 °C	920 °C
5	50	65	89
10	70	80	88
15	81,5	95	87,5
20	88	93,5	86,5
25	91	92,5	85,5
30	95	91	84
35	93	90,5	83
40	92,5	90	82

З розгляду даних таблиці 1 видно, що зі зменшенням температури нагріву флюсу розплаву вилучення цирконію в алюмінієвий розплав збільшується. Час витримки при кожній температурі характеризується наявністю екстремуму для виходу цирконію в алюмінієвий розплав.

Для оптимального технологічного режиму була обрана температура 850 °C і витримка розплаву протягом 25–30 хвилин. З метою підвищення вилучення цирконію було запропоновано введення флюсу для отримання алюмінієво-цирконієвої лігатури в роздавальну піч до введення в розплав алюмінію алюмінієво-цирконієвої лігатури.

## Висновки

1. Застосування оксиду цирконію, як найбільш доступного із цирконієвих сполук, для отримання алюмінієво-цирконієвої лігатури металотермічним способом є найбільш сприятливим.

2. Найбільша розчинність оксиду цирконію в кріоліті спостерігається при кріолітному числі рівному 3,0. Це підтверджує, що розчинником оксиду цирконію (як оксиду алюмінію) є іон  $AlF_6^{4-}$ .

3. При зниженні температури процесу та збільшенні часу перемішування розплаву вилучення цирконію в лігатуру зростає.

4. При вивченні різних способів введення шихти в піч максимальне вилучення цирконію в лігатуру в лабораторних дослідах досягнуто при введенні алюмінієвих гранул у сольовий розплав і досягало 92–93 %.

5. Попередня обробка розплаву алюмінію в роздавальній печі флюсом від отримання алюмінієво-цирконієвої лігатури дозволяє досягти 99,5% вилучення цирконію із  $ZrO_2$ .

## Подяки

Стаття присвячується світлій пам'яті Чадова Олега Олексійовича директора ТОВ «Крок-ГТ», який виступив ініціатором робіт з отримання кабельно-провідникової продукції на основі сплавів цирконію та алюмінію, надав потужності свого заводу для про-

ведення робіт та вирішив багато організаційних питань.

### Список літератури

1. Juneja, J. M. Preparation of aluminium-zirconium master alloys // *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. – 2002. – Vol. 9 (June). – P. 187–190.
2. Kubínáková, E., Danielik, V., Híves, J. Al–Zr alloys synthesis: Characterization of suitable multi-component low-temperature melts // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8, № 6. – P. 6053–6061. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.10.088.
3. Knych, T., Piwowska-Uljasz, M., & Uljasz, P. Aluminium alloys with zirconium additions, in the range from 0.05 to 0.32%, intended for applications in the overhead electrical power engineering // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2014. – Vol. 59, № 1. – P. 313–317. doi: 10.2478/amm-2014-0056.
4. Kolobov, G. A., Karpenko, A. V. Refining of light rare, rare earth and radioactive metals // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2016. – № 1. – P. 3–9.
5. Тітов, О. О. Дослідження електрохімічного отримання сплаву магній-неодим із оксифторидних серед / О. О. Тітов, В. Х. Новічков, Н. М. Степарьова, Н. Л. Ополченова // *Кольорові метали*. – 2004. – № 8. – С. 49–52.
6. Method for preparing titanium or titanium aluminum alloy and byproduct – titanium-free cryolite through two-stage aluminothermic reduction. Патент EP на винахід / Naixiang Feng, Kun Zhao, Yaowu Wang, Jianping Peng, Yuezhong Di. – № 3327154B1; МПК C22B 34/12, C22B 5/04; published 17.07.2019, Bulletin № 2019/29.
7. Process for producing improved grain refining aluminum–titanium–boron master alloys for aluminum foundry alloys. Патент US / Yucel Birol. – № 8992827B2; МПК C22C 1/05, C22C 1/04; published 31.03.2015.
8. Liu, F. Preparation of Aluminum-Zirconium Master Alloy by Aluminothermic Reduction in Cryolite Melt / F. Liu, C. Ding, W. Tao, X. Hu, B. Gao, Z. Shi, Z. Wang. // *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. – 2017. – Vol. 69, № 12. – P. 4589–4594. doi: 10.1007/s11837-017-2548-7.
9. Ri, E. H. Production of aluminum alloys modifier from ligature / E. H. Ri, Hosen Ri, S. N. Khimukhin, M. A. Ermakov, T. S. Khimukhin // *RPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 13, № 4. – P. 1265–1271. – ISSN 1819-6608.
10. Щека, И. А. Химия гафния / И. А. Щека, К. Ф. Карлышева. – К. : Наукова думка, 1972. – 456 с.
11. Clark, R. J. H., Bradley, D. C., Thornton, P. The Chemistry of Titanium, Zirconium and Hafnium / R. J. H. Clark, D. C. Bradley, P. Thornton. – Pergamon Texts in Inorganic Chemistry, 2018. – 150 p. – ISBN 9781483159218.
12. Likhatskyi, I. F. World experience of aluminum master alloys application and advanced Ukrainian developments in this field / I.F. Likhatskyi, M.M. Voron, K.V. Mikhaleukov // *Metal and Casting of Ukraine*. – 2020. – Vol. 28, № 4. – P. 63–68. doi: 10.15407/steelcast2020.04.063.
13. Lushchin, S.P. Analysis of electrotechnical properties of innovative high-temperature wires for overhead power transmission lines / S.P. Lushchin, A.V. Borkovskih, M.V. Borkovskih // *Electrical engineering and power engineering*. – 2018. – 2. – P. 37–44. doi: 10.15588/1607-6761-2018-2-4.
14. IEC 62004. Thermal-resistant aluminium alloy wire for overhead line conductor. First edition, 2007-02. – International Electrotechnical Commission, 2007. – 16 p.
15. ASTM B941-16. Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes. – 4 p.
16. Посыпайко, В. И. Диаграммы плавкости солевых систем / В. И. Посыпайко, Е. А. Алексеева. – М.: Металлургия, 1977. – 415 с.
17. Хансен, М., Структуры двойных сплавов. Т. 1 / М. Хансен, К. М. Адерко. – М. : Гос. науч.-тех. изд-во лит-ры по чер. и цвет. металлургии, 1962. – 608 с.
18. Murray, J., The Al–Zr (Aluminum–Zirconium) System / J. Murray, A. Peruzzi, J. P. Abriata // *J. of Phase Equilibria*. – 1992. – Vol. 13, № 3. – P. 277–291.
19. Massalski, T. B. Binary Alloy Phase Diagrams / T. B. Massalski. – 2nd ed. – Ohio, USA: ASM International Materials Park, 1990. – 3503 p.

Одержано 12.11.2024

## DEVELOPMENT OF THE METHOD OF OBTAINING ALUMINUM-ZIRCONIUM MASTER ALLOY BY METALOTHERMAL METHOD FROM FLUORIDE-CHLORIDE MELT

Andriy Borkovskykh	Postgraduate student of the Department of Physics, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : aayy6491@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3662-0597
Sergiy Lushchin	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : luschin@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2135-0520
Mykola Borkovskykh	Engineer, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : borkovskihnikolaj@gmail.com, ORCID: 0009-0000-8283-4620

**Purpose.** Development of a method for the industrial production of aluminum-zirconium master alloy by a metal-thermal method from a fluoride-chloride melt.

**Research methods.** Experimental method of obtaining a master alloy. Spectrometric analysis. Theoretical analysis.

**Results.** A novel industrial production method for an aluminum-zirconium master alloy by metal-thermal method from fluoride-chloride melt has been developed. The most economically feasible method was determined to be the aluminum-zirconium alloy production process, which involves the reduction of zirconium oxide through an aluminothermic reaction. The findings of the research and industrial production of the master alloy, along with the impact of the technological parameters on the technical and economic indicators of the process, are presented. Laboratory tests were conducted with the objective of identifying the optimal technological parameters for the aluminothermy process. The zirconium content of the obtained metal samples was determined by means of spectrometry, and the completeness of its extraction was calculated. In light of the findings, a fundamental technological scheme was selected for the production of a master alloy with a zirconium content of 5%. It was established that a reduction in the heating temperature of the melt flux results in an enhanced extraction of zirconium into the aluminum melt. In order to enhance the extraction of zirconium, it was suggested to introduce a flux for obtaining an aluminum-zirconium master alloy into a distribution furnace before introducing an aluminum-zirconium master alloy into the aluminum melt.

**Scientific novelty.** The highest solubility of zirconium oxide in cryolite is observed at a cryolite number of 3.0, as demonstrated in the findings. This finding confirms that the solvent of zirconium oxide (like aluminum oxide) is the  $AlF_6^+$  ion. As the temperature of the process decreases and the mixing time of the melt increases, the extraction of zirconium into the master alloy increases. In the course of investigating various methodologies for introducing the charge into the furnace, the maximum extraction of zirconium in the master alloy in laboratory experiments was achieved when aluminum granules were introduced into the salt melt and reached 92–93%. The preliminary treatment of the aluminum melt in the distribution furnace with flux derived from the production of aluminum-zirconium master alloy has been demonstrated to facilitate the extraction of zirconium from  $ZrO_2$  to a level of 99.5%.

**Practical value.** The results of the experimental and industrial production of an aluminum-zirconium master alloy by the metallothermal method from a fluoride-chloride melt on the existing furnace equipment of the plant for the production of conductor and cable products of “Krok GT” LLC and the influence of technological parameters on the technical and economic indicators of the technological process of the industrial obtaining of master alloy are given.

**Key words:** master alloy, aluminum, zirconium, aluminothermy, fluoride-chloride melt, flux, extract.

## References

1. Juneja, J. M. (2002). Preparation of aluminium-zirconium master alloys. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 9(June), 187-190.
2. Kubináková, E., Danielik, V., & Híves, J. (2019). Al-Zr alloys synthesis: Characterization of suitable multi-component low-temperature melts. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6053-6061. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.10.088.
3. Knych, T., Piwowska-Uliasz, M., & Uliasz, P. (2014). Aluminium alloys with zirconium additions, in the range from 0.05 to 0.32%, intended for applications in the overhead electrical power engineering. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(1), 313–317. doi: 10.2478/amm-2014-0056.
4. Kolobov, G.A., Karpenko, A.V. (2016). Refining of light rare, rare earth and radioactive metals. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1, 3–9.
5. Titov, O. O., Novichkov, V. Kh., Stepareva, N. M., & Opolchenova, N. L. (2004). Doslidzhennya elektrohimichnogo otrymannya splavu magnii-neodym iz oksifitoridnyh sered. *Kolyorovi metaly*, 8, 49–52.
6. Feng, N., Zhao, K., Wang, Y., Peng, J., & Di, Y. (2019). Method for preparing titanium or titanium aluminum alloy and byproduct-titanium-free cryolite through two-stage aluminothermic reduction. *European Patent №. 3327154B1. C22B 34/12, C22B 5/04. Published 17.07.2019, Bulletin 2019/29.*

7. Birol, Y. (2015). Process for producing improved grain refining aluminum-titanium-boron master alloys for aluminum foundry alloys. U.S. Patent № 8992827B2. C22C 1/05, C22C 1/04. Published 31.03.2015.
8. Liu, F., Ding, C., Tao, W., Hu, X., Gao, B., Shi, Z., & Wang, Z. (2017). Preparation of Aluminum-Zirconium Master Alloy by Aluminothermic Reduction in Cryolite Melt. *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 69(12). doi:10.1007/s11837-017-2548-7.
9. Ri, E. H., Ri, H., Khimukhin, S. N., Ermakov, M. A., Khimukhin, T. S. (2018). Production of aluminum alloys modifcator from ligature. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13, (4), 1265-1271. ISSN 1819-6608.
10. Shcheka, I. A., & Karlysheva, K. F. (1972). *Khimiya gafniya*. Kyiv: Naukova Dumka, 456.
11. Clark, R. J. H., Bradley, D. C., Thornton, P. (2018). *The Chemistry of Titanium, Zirconium and Hafnium Pergamon Texts in Inorganic Chemistry*. – 150. ISBN: 9781483159218.
12. Likhatskyi, I.F., Voron, M., Mikhalenkov, K.V. (2020). World experience of aluminum master alloys application and advanced Ukrainian developments in this field. *Metal and Casting of Ukraine*, 28(4), 63–68. doi: 10.15407/steelcast2020.04.063.
13. Lushchin, S.P., Borkovskih, A.V., Borkovskih, M.V. (2018). Analysis of electrotechnical properties of innovative high-temperature wires for overhead power transmission lines. *Electrical engineering and power engineering*, 2, 37-44. doi: 10.15588/1607-6761-2018-2-4.
14. IEC 62004. (2007) Thermal-resistant aluminium alloy wire for overhead line conductor. first edition 2007-02. International electrotechnical commission, 16.
15. ASTM B941-16. Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes, 4.
16. Posypaiko, V. I., & Alekseeva, E. A. (1977). Diagrammy plavkosti solevykh system. *Metallurgiya*, 415.
17. Hansen, M., Aderko, K. M. (1962). *Struktury dvojnnyh splavov*. T.I. Gos. nauch.-teh. izd-vo lit-ry po cher. i cvet. metallurgii, 608.
18. Murray, J. A. Peruzzi, A., Abriata, J.P. (1992). The Al – Zr (Aluminum – Zirconium) System. *J. of Phase Equilibria*. 13(3), 277 – 291.
19. Massalski, T. B. (1990). *Binary alloy phase diagrams* (2nd ed.). Ohio, USA: ASM International Materials Park, 3503.