

**АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ
ЖАРОСТІЙКОГО СПЛАВУ ЗІ ЗНИЖЕНОЮ ЩІЛЬНІСТЮ**

Гречаний О.М.¹ [ORCID], Васильченко Т.О.² [ORCID],

Заневський А. Ю.³ [ORCID], Обуденіков Б.С.⁴ [ORCID]

¹Запорізький національний університет, Ph.D., доцент, Україна, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Ph.D., доцент, Україна

²Запорізький національний університет, к.т.н., доцент, Україна, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, к.т.н., доцент, Україна

³Запорізький національний університет, магістрант, Україна

⁴Запорізький національний університет, магістрант, Україна

Анотація. Виконано системний аналіз сучасного електротермічного обладнання, що використовується для отримання високоміцних жаростійких сплавів на основі нікелю зі зниженою щільністю в лабораторних умовах. Актуальність дослідження обумовлена потребами авіаційної та енергетичної галузей у матеріалах, здатних працювати при високих температурах, циклічних навантаженнях та агресивних середовищах при одночасному зниженні масових характеристик конструкцій. Проведено порівняльний аналіз електродугових печей, вакуумно-дугового та електрошлакового переплаву, вакуумно-індукційних і електронно-променевих систем. Встановлено, що вакуумно-індукційне плавлення забезпечує оптимальний баланс між чистотою металу, точністю легування, гомогенністю структури та енергоефективністю. Показано перспективність створення мобільних лабораторних комплексів для дослідження жаростійких сплавів нового покоління.

Ключові слова: жаростійкі сплави, нікелеві сплави, вакуумно-індукційне плавлення, електротермічне обладнання, легування, вакуум.

Вступ. Сучасне авіабудування та енергетичне машинобудування потребують матеріалів, здатних працювати в умовах високих температур, змінних навантажень та агресивних середовищ [1]. Особливий інтерес представляють жаростійкі нікелеві сплави зі зниженою щільністю, що дозволяють підвищити ресурс газотурбінних установок при одночасному

зниженні маси конструкційних елементів. Суттєвим стримуючим фактором у розробці жаростійких сплавів нового покоління є обмеженість подальшого вдосконалення традиційних нікелевих систем. В умовах інтенсивного розвитку сучасних технологій застосування «класичних» нікелевих жаростійких сплавів поступово втрачає актуальність. Зокрема, в авіаційній галузі потенціал жаростійких нікелевих матеріалів практично вичерпаний, що обумовлено роботою при температурах до 85 % температури солідуса, що фактично відповідає граничному рівню їх експлуатаційної жаростійкості [2, 3].

За таких умов особливої актуальності набуває проведення комплексного системного аналізу сучасних технологічних підходів до отримання експериментальних жаростійких нікелевих сплавів V покоління в умовах дослідницьких лабораторій. У зв'язку з цим науково-практична задача дослідження полягає у формуванні науково обґрунтованих критеріїв вибору технологічного обладнання та визначенні його найбільш раціонального типу, здатного забезпечити лабораторне отримання експериментальних сплавів із заданим комплексом фізико-механічних та експлуатаційних властивостей. Реалізація такого підходу дозволить підвищити ефективність досліджень і забезпечити відтворюваність характеристик перспективних жаростійких матеріалів в умовах лабораторного виробництва.

Основний матеріал. Аналіз джерел у вільному доступі дозволив визначити, що для отримання жаростійких сплавів можуть використовуватися електродугові печі, установки вакуумно-дугового переплаву, електрошлакового переплаву, вакуумно-індукційні та електронно-променеві системи.

Встановлено, що електродугові печі характеризуються відносною технологічною простотою та можливістю плавлення широкого спектра металевої сировини, включаючи тугоплавкі компоненти. Разом з тим їх застосування супроводжується підвищеним ризиком забруднення металу неметалевими включеннями та складністю забезпечення високої стабільності хімічного складу [4, 5].

Технології вакуумно-дугового та електрошлакового переплаву забезпечують високий рівень рафінування металу та формування однорідної структури зливка. Однак їх використання в лабораторних умовах обмежується високими енергетичними витратами, складністю технологічної підготовки та необхідністю використання попередньо виготовлених електродів [6, 7].

Електронно-променеве плавлення забезпечує отримання матеріалів надвисокої чистоти та є перспективним для переробки високореакційної або спеціальної металевої сировини. Водночас значна вартість обладнання та складність експлуатації обмежують широке використання даної технології в лабораторній практиці [8].

Найбільш універсальною технологією для лабораторного отримання експериментальних сплавів є вакуумно-індукційне плавлення. Даний метод забезпечує ефективне видалення газових домішок, точне дозування легуючих елементів та інтенсивне електромагнітне перемішування розплаву, що сприяє підвищенню хімічної та структурної однорідності матеріалу [9]. Додатковою перевагою є відносно компактні габарити обладнання та можливість його адаптації до умов дослідницьких лабораторій з обмеженими енергетичними ресурсами.

Висновки. Підсумовуючи все вищесказане можна відзначити, що проведений системний аналіз електротермічного обладнання для отримання жаростійких нікелевих сплавів у лабораторних умовах, вказує на те, що вакуумно-індукційне плавлення є найбільш ефективним методом отримання сплавів зі зниженою щільністю. Завдяки обґрунтування дослідження визначена перспективність створення мобільних лабораторних комплексів для дослідження нових жаростійких матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Potapov O. M. Composites: prospects for the use in the space and rocket equipment. *Kosmična nauka i tehnologija*. 2015. Vol. 21, no. 5(96). P. 69–74. <https://doi.org/10.15407/knit2015.05.069>
2. Zalewski P., Kachel S., Motyl K. Space rocket for air-rocket system. *Journal of Konbin*. 2023. Vol. 53, no. 2. P. 45–64. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.7125>.

3. Aircraft Gas Turbine Engine Testing / S. Fábry et al. *Acta Avionica Journal*. 2019. P. 39–44. <https://doi.org/10.35116/aa.2019.0016>
4. Visuri V.-V., Echterhof T. Electric Arc Furnace Steelmaking. *Metals*. 2025. Vol. 15, no. 12. P. 1285. URL: <https://doi.org/10.3390/met15121285>
5. Some Problems on Large Electric Arc Furnace. *DENKI-SEIKO[ELECTRIC FURNACE STEEL]*. 1960. Vol. 31, no. 4. P. 206–213. URL: <https://doi.org/10.4262/denkiseiko.31.206>
6. 14. Gruber H. Consumable-electrode vacuum arc melting. *JOM*. 1958. Vol. 10, no. 3. P. 193–198. URL: <https://doi.org/10.1007/bf03397883>
7. Physicochemical comparison of electroslag remelting with consumable electrode and electroslag refining with liquid metal / G. Polishko et al. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 46, no. 8. P. 789–793. URL: <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1428419>
8. On the melting of zirconium alloys from scraps using electron beam and induction furnaces – recycling process viability / L. A. T. Pereira et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, no. 3. P. 4867–4875. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.006>
9. Casting of Titanium Alloys in Centrifugal Induction Furnaces / A. Karwiński et al. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014. Vol. 59, no. 1. P. 403–406. URL: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0068>

ANALYSIS OF EQUIPMENT FOR CREATING A HEAT-RESISTANT ALLOY WITH REDUCED DENSITY IN LABORATORY CONDITIONS

Oleksii Hrechanyi, Tetiana Vasilchenko, Anton Zanevskyi, Bohdan Obudenikov

Abstract. *A systematic analysis of modern electrothermal equipment used to obtain high-strength heat-resistant nickel-based alloys with reduced density in laboratory conditions has been performed. The relevance of the study is due to the needs of the aviation and energy industries for materials capable of operating at high temperatures, cyclic loads and aggressive environments while simultaneously reducing the mass characteristics of structures. A comparative analysis of electric arc furnaces, vacuum arc and electroslag remelting, vacuum induction and electron beam systems has been performed. It has been established that vacuum induction melting provides an optimal balance between metal purity, alloying accuracy, structural homogeneity and energy efficiency. The prospects for creating mobile laboratory complexes for studying new generation heat-resistant alloys have been shown.*

Keywords: *heat-resistant alloys, nickel alloys, vacuum induction melting, electrothermal equipment, alloying, vacuum*