

УДК 669.187.2.036.538

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-6>

## АНАЛІЗ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ФУТЕРІВКИ ІНДУКЦІЙНИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

**Кухар Володимир Валентинович,**

доктор технічних наук, професор,  
проректор з науково-дослідної роботи,  
професор кафедри металургії, матеріалознавства і організації виробництва  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

**Малій Христина Василівна,**

кандидат технічних наук,  
керівник науково-дослідного департаменту,  
доцент кафедри металургії, матеріалознавства і організації виробництва  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0002-9046-4268

**Кустіков Владислав Валерійович,**

здобувач вищої освіти, гр. 136С-23-1м  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

*Індукційні сталеплавильні печі мають суттєвий потенціал у металургійній промисловості, оскільки вони дають змогу швидко та ефективно проводити плавку, зокрема сталі, з використанням принципу індукції. Використання таких агрегатів сприяє покращенню екологічних показників у виробництві та реалізації концепції «зеленої сталі» під час переробки заліза прямого відновлення. Індукційні печі є більш енергоефективними порівняно з традиційними печами, такими як дугові печі, через знижений час плавлення. Це сприяє зменшенню викидів парникових газів, таких як вуглекислий газ, та зменшує вплив на зміну клімату. Індукційні печі дають змогу зменшити витрати на електроенергію порівняно з іншими видами електричних печей. Це допомагає знизити використання природних ресурсів та викиди шкідливих речовин. Індукційні печі можуть бути легко налаштовані для переробки вторинної сировини – металевих відходів. Це сприяє зменшенню відходів та сприяє принципам циркулярної економіки. Поміж очевидних переваг індукційних сталеплавильних тигельних печей, серед яких також широкі можливості отримання однорідного за хімічним складом сталевого розплаву, відомі нагальні недоліки, що виникають у зв'язку з особливостями перемішування, потоками рідкого металу та зниженою стійкістю футерівки. У дослідженні розглянуто конструкцію та принцип дії індукційних плавильних тигельних агрегатів. Проаналізовано умови експлуатації та виходу з ладу кислотої, основної та нейтральної футерівки. Висвітлено ключові аспекти функціонування індукційних сталеплавильних печей, зосереджено увагу на виявленні причин низької вогнетривкості та шлакотривкості їх тиглів внаслідок інтенсивної взаємодії гарячого рідкого розплаву з футерівкою. Із застосуванням літературних джерел визначено основні методи підвищення стійкості тиглів: вибір матеріалу тигля, забезпечення теплоізоляції та охолодження, керування температурними режимами, оптимізація процесу плавлення та конструкції тигля, моніторинг зношування та деформацій, регулярне технічне обслуговування і ремонт, застосування захисних покриттів, управління електромагнітним полем печі. Розкрито сутність кожного з цих методів із наведенням конкретних виробничих прикладів. Головним результатом проведеного дослідження є систематизація проаналізованих методів підвищення стійкості футерівки в індукційних сталеплавильних печах. Проведений аналіз дає змогу в перспективі визначити оптимальні методи контролю стану футерівки та вибрати виробничі стратегії підвищення стійкості тиглів, враховуючи конкретні умови виробництва.*

**Ключові слова:** індукційна сталеплавильна піч, тигель, підвищення стійкості, футерівка, розплав.

***Kukhar Volodymyr, Malii Khrystyna, Kustikov Vladyslav. Analysis and systematization of ways to increase the stability of the lining of induction steel melting furnaces***

Induction steelmaking furnaces have significant potential in the steel industry, as they allow for fast and efficient melting, including of steel, using the principle of induction. The use of such units helps to improve environmental performance in production and implement the green steel concept when processing direct reduced iron. Induction furnaces are more energy-efficient than traditional furnaces, such as arc furnaces, due to their shorter melting times. This helps to reduce greenhouse gas emissions, such as carbon dioxide, and reduces the climate change impact.

Induction furnaces reduce energy costs compared to other types of electric furnaces. This helps to reduce the use of natural resources and emissions. Induction furnaces can be easily configured to process recyclable materials, such as metal waste. This helps to reduce waste and contributes to the principles of a circular economy. Among the obvious advantages of induction crucible steelmaking furnaces, including the wide possibilities of producing a homogeneous steel melt in terms of chemical composition, there are also urgent disadvantages arising from the peculiarities of mixing, liquid metal flows and reduced lining stability. This study considers the design and principles of operation of induction crucible melting units. The operating conditions and failures of acid, basic, and neutral linings are analyzed. The key aspects of the functioning of induction steelmaking furnaces are highlighted, with a focus on identifying the causes of low refractoriness and slag resistance of their crucibles due to the intensive interaction of the hot liquid melt with the lining. Using literature sources, the main methods of increasing the stability of crucibles are identified: selection of crucible material, provision of thermal insulation and cooling, control of temperature conditions, optimization of the melting process and crucible design, monitoring of wear and deformation, regular maintenance and repair, application of protective coatings, and control of the furnace electromagnetic field. The essence of each of these methods is revealed with specific production examples. The main result of the study is the systematization of the analyzed methods of increasing the lining stability in induction steelmaking furnaces. The analysis makes it possible to determine the optimal methods for monitoring the lining condition and select production strategies for improving crucible stability, taking into account specific production conditions.

**Key words:** induction steelmaking furnace, crucible, stability improvement, lining, melt.

Серед обмежень індукційної плавки, що заважають переходу на виплавку в індукційних печах, називають низьку стійкість їх футерівки [1]. Індукційні сталеплавильні агрегати характеризуються значною продуктивністю та успішно застосовуються для виплавки відносно невеликих об'ємів (від 5 кг до 60 т) високоякісних сталей у виробничих та лабораторних умовах. З технічної літератури відомі технології виплавки в індукційних печах високолегованих жаростійких сталей [2], конструкційних та низьковуглецевих сталей [3], кольорових металів [4] і сплавів спеціального призначення [5].

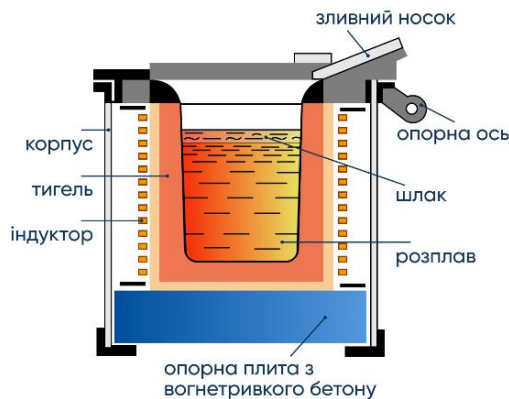
Особливістю роботи індукційної тигельної печі є подібність до функціонування трансформатора, коли первинною обмоткою є індуктор, а вторинною виступає матеріал у тиглі, розміщеним у центрі індуктора, який заживлюється від високочастотного генератора перемінного струму. Завдяки такій конструкції на метал, що розплавляється під дією токів Фуко, діють радіальні сили, направлені до центру ванни

розплавленого металу [6]. Дія таких сил приводить до витиснення рідкого металу по вертикальній осі тигля вгору та вниз, що сприяє електродинамічному перемішуванню шарів металу, забезпечуючи досягнення хімічної однорідності розплаву та флотації неметалічних включень. Активна циркуляція рідкого металу позитивно впливає на однорідність хімічного складу металів, що виплавляють, але негативно відбивається на такому показнику, як стійкість футерівки індукційних печей. Футерівка розташовується між рідким металом та індуктором (рис. 1), і, вочевидь, чим товще футерування печі, тим менший магнітний потік проникає в метал і тим нижче ефективність використання електроенергії під час плавки, тому товщина футерування має обмеження [7].

Тигель індукційної печі (рис. 1, б) виготовляють методами набивання або викладання вогнетривким матеріалом (цеглою). Тигель безпосередньо розташований в індукторі, який являє



а



б



в

Рис. 1. Розливка (а), схема (б) та зовнішній вигляд (в) індукційної тигельної плавильної печі

собою водоохолоджувану спіраль з мідної трубки з визначеною кількістю витків.

Набивний тигель з вогнетривкого порошкового матеріалу закріплюють у корпусі та встановлюють на плиті (основі) з вогнетривкого бетону. Випуск виплавленого металу відбувається через зливний носок під час повороту печі разом з корпусом відносно опорної осі [7]. Через фізичні особливості генерації тепла безпосередньо в металі підвищення температури плавки обмежується переважно стійкістю самого плавильного тигля. Тигель виконують із вогнетривкого матеріалу, яким може виступати кераміка, графіт або шамот-графіт [8]. Для підвищення термічної стійкості і зменшення термічного стресу тигля використовують системи охолодження водою і контролю за його температурою [9].

Величини температур переходу у рідку фазу марок сталей, які виплавляють в індукційних печах, обумовлюють використання футеровок тиглів трьох видів: (а) кислої, (б) основної і (в) нейтральної. Для кислої (а) футерівки застосовують вогнетриви на основі окису кремнію (90...98 %  $\text{SiO}_2$ ), борної кислоти (1...1,5 %) та невеликої кількості таких окислів металів, як  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ . Тривалість роботи тиглів з кислої футерівки складає 80...100 плавок. Для основної (б) футерівки використовують переважно магнезит (до 85%  $\text{MgO}$ ), рідке скло з домішками окислів типу  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  тощо. Стійкість таких тиглів знижується зі збільшенням об'єму печей і складає 20...50 плавок. Для нейтральної (в) футерівки застосовують матеріали на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з домішками магнезиту. Стійкість такої футерівки є вищою, ніж у двох попередніх варіантах [10].

У джерелі [11] серед переваг індукційних тигельних печей також зазначені широкі можливості їх автоматизації з використанням контролерів та висока екологічність агрегатів, а серед недоліків вказано на проблему низької стійкості футерівки. На думку авторів [7; 12], важливою частиною обслуговування, забезпечення ефективності й надійності обладнання та безпеки процесу плавки є контроль за зношуванням футерівки, який проводять автоматизовано. Отже, аналіз виробничого досвіду з підвищення стійкості футерівки та розроблення рекомендацій для підвищення ефективності контролю зношування футерівки індукційної тигельної плавильної печі є актуальним науково-практичним завданням.

Метою роботи є систематизація методів підвищення стійкості та контролю за станом футерівки індукційних сталеплавильних печей, що сприяє розвитку прогнозування зношування

тиглів та планування ремонтних робіт і витратних матеріалів.

Підвищення стійкості футерівки індукційної сталеплавильної печі є важливим напрямом забезпечення продуктивності та ефективності процесу виробництва сталі визначеної якості. Методологічні основи підвищення стійкості футерівки доволі різноманітні, але загалом можна виділити такі аспекти, що мають вплив на її стійкість:

- вибір матеріалу: важливо вибирати матеріал, який має високу термостійкість, механічну міцність і хімічну стійкість до дії розплавленого металу і шлаку;

- дизайн футерівки: геометрія і конструкція футерівки мають значення для її стійкості; оптимальний дизайн має забезпечити правильний розподіл тепла і матеріалів у футерівці, щоб уникнути перегріву або руйнування;

- оптимізація процесу плавлення: контроль за температурою, швидкістю плавлення, складом шлаку та іншими параметрами процесу допомагає уникнути агресивних умов для футерівки, що можуть призвести до її деградації;

- використання захисних покриттів: сприяє зменшенню впливу на неї агресивних середовищ, забезпечуючи додатковий захист від тепла і корозії;

- регулярне обслуговування та моніторинг: постійне спостереження за станом футерівки, вчасне виявлення пошкоджень або зношення і вчасний ремонт допомагають підтримувати її стійкість на високому рівні.

Підвищення стійкості тигля вимагає комплексного підходу, який включає як вибір відповідних матеріалів, так і правильне управління процесом експлуатації. Процес футерування є доволі складним та супроводжується значним обсягом як ручної, так і механізованої праці. На рис. 2 наведено основні етапи набивки тигля індукційної сталеплавильної печі фірми EGES (Туреччина) ємністю 3 тони в умовах ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод».

Для передбачення стратегій підвищення стійкості футерівки індукційної сталеплавильної печі, забезпечення надійності та продуктивності процесу плавлення в результаті аналізу літературних джерел та практичного досвіду були виділені загальні методи, які використовують у промислових та лабораторних індукційних печах (табл. 1).

Рекомендується ухвалювати рішення після консультування з виробниками або фахівцями з металургійного обладнання.

Регулярний та комплексний контроль за станом футерівки дає змогу вчасно виявляти





а

б

в

г

**Рис. 2. Робота та футерування трьохтонної індукційної печі (виробництва EGES, Туреччина): а – загальний вигляд печі; б – робочий простір печі після випуску металу; в – процес футерування днища печі; г – завантаження машини для футерівки печі в піч краном**

Таблиця 1

**Систематизація методів підвищення стійкості футерівки індукційних сталеплавильних печей**

№	Метод підвищення стійкості	Сутність методу
1	2	3
1	Вибір відповідного матеріалу тигля	Використання високоякісних матеріалів, що мають високу теплостійкість і міцність та відповідають вимогам конкретного процесу. Використання спеціальних матеріалів, таких як карбід кремнію або оксид цирконію, які можуть мати покращену термічну та хімічну стійкість [7; 13].
2	Теплоізоляція	Забезпечення ефективної теплоізоляції футерівки для уникнення тепловтрат, перегріву та зношування в умовах високих температур. Застосовують для концентрування тепла в потрібних областях. Термоізоляційні покриття використовують для зменшення тепловтрат та збереження тепла внутрішньої області тигля. Ці матеріали можуть допомагати утримувати стабільні температурні умови та зменшувати енерговитрати [14].
3	Системи охолодження	Використання систем охолодження для контролю температури футерівки і попередження перегріву [15]. Застосування футерівки з прокладеними каналами для водяного охолодження, прокачування та циркуляція охолоджуючої рідини (води). Введення охолоджуючого середовища (холодного газу) в сам тигель; застосування додаткового активного охолодження (наприклад, Peltier-елементами [16]).
4	Моніторинг температурного режиму та автоматизоване керування ним	Встановлення систем моніторингу температур для постійного слідкування за робочими параметрами і вчасного виявлення аномалій задля уникнення різких змін температури, які можуть призвести до термічного шоку тигля. Підтримка стабільного температурного режиму й здійснення плавного нагріву та охолодження. Встановлення терморпар та датчиків для постійного моніторингу температури тигля та вчасного реагування на будь-які зміни. Використання автоматичних систем контролю температури, які можуть регулювати подачу охолоджуючої рідини або газу залежно від потреби [17].
5	Оптимізація процесів плавлення та конструкції тигля	Аналіз і оптимізація технологічних процесів для зменшення надмірного гідродинамічного тертя і термічного впливу на футерівку. Дослідження гідродинаміки плавлення для визначення місць, де виникає надмірне тертя. Використання комп'ютерного моделювання для аналізу та вдосконалення гідродинамічних процесів та теплових моделей для визначення розподілу тепла й ідентифікації зон із зайвим тепловим впливом. Внесення змін у форму та конфігурацію футерівки для зменшення опору тертя. Забезпечення правильної конструкції тигля, враховуючи параметри, такі як товщина стінок, форма та розміри. Зменшення ризику термічного шоку шляхом вибору оптимальних параметрів дизайну [18].

Закінчення табл. 1

1	2	3
6	Експертна оцінка, моніторинг зношування і деформацій	Залучення спеціалізованих експертів для систематичної оцінки стану футерівки і виявлення будь-яких ознак або ризиків зношування. Проведення візуальних оглядів для виявлення будь-яких слідів зношення чи деформацій. Використання методів неруйнівного контролю (наприклад, ультразвукового обстеження) для виявлення внутрішніх дефектів [7; 10; 12].
7	Регулярне технічне обслуговування та ремонт	Проведення регулярного технічного обслуговування футерівки для вчасного виявлення ознак зношування, будь-яких дефектів та забезпечення її стійкості. Проведення планових ремонтів, відновлення або заміни тигля [19].
8	Застосування захисних покриттів	Застосування захисних покриттів, які можуть зменшити вплив хімічних реакцій та зношування на поверхні тигля [20; 21]. Графітові покриття використовуються для захисту тигля від ерозії та окислення за високих температур (графіт є хімічно стійким та витримує високі температури, що робить його ефективним матеріалом для захисту тигля). Керамічні покриття використовуються для створення термічно та хімічно стійкого шару, який захищає тигель від агресивних середовищ (деякі види керамічних покриттів мають високу термічну шоківу стійкість). Оксидно-керамічні матеріали, такі як оксид алюмінію чи оксид цирконію, застосовують для захисту тигля від окислення та агресивних реакцій за високих температур. Деякі виробники пропонують спеціальні покриття, розроблені спеціально для металургійних застосувань та індукційного плавлення. Вони можуть бути оптимізовані для конкретних умов експлуатації. Емалі та керамічні покриття, які мають низький коефіцієнт тертя, можуть використовуватися для зменшення опору тертя та покращення роботи тигля.
9	Управління електромагнітним полем	Оптимізація конструкції та розташування тигля для зменшення впливу електромагнітного поля на його стійкість [22; 23]. Перехід на інноваційні рішення електромагнітного холодного тигля (electromagnetic cold crucible – EMCC) [42–45], тобто використання сегментованого водоохолоджуваного мідного тигля для індукційної плавки у вакуумі або контрольованій атмосфері без застосування вогнетривких матеріалів. EMCC починають використовуватись у двох типах промислових застосувань: як періодичні тиглі для підготовки розплаву, як бездонні циліндричні форми для безперервного лиття. Переваги EMCC: зменшення ефекту тертя в системі формування (мінімізація контакту розплаву з тиглем), тобто значне збільшення стійкості тигля, відсутність забруднень і включень у плавці, створення умов потоку рідини, які можуть контролювати структуру зерна та прискорювати хімічну онлайн-обробку (висока якість відливок), зменшення циклу [23].

будь-які зміни в її стані та уникати можливих аварій чи проблем у виробництві.

Показані переваги індукційних сталеплавильних печей, що полягають у кращому перемішуванні шарів рідкого металу в процесі плавки, що дає змогу отримувати більш однорідний метал за хімічним складом. Визначені перспективи використання індукційних печей для виплавки високоякісних сталей та кольорових металів і їх

сплавів. Виконані розвернутий огляд та систематизація методів підвищення стійкості тигля індукційної печі. Отримані результати можуть бути використані на практиці для визначення термінів ремонтів, визначення стратегій подовження спроможності до функціонування тиглів, оцінювання кількості витратних матеріалів для ремонту футерівки індукційних сталеплавильних печей.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Смірнов О.М., Тімошенко С.М., Нарівський А.В. Відновлення та інноваційний розвиток виробництва сталі в Україні в контексті енергоефективності та європейського зеленого курсу. *Вісник НАН України*. 2023. № 4. С. 21–38.
2. Ren W., Wang L. Precipitation behavior of M23C6 in high nitrogen austenitic heat-resistant steel. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 905.
3. Bedarkar S.S., Singh R. Removal of Phosphorous from Steel Produced by Melting Sponge Iron in Induction Furnace. *Trans. Indian. Inst. Met.* 2013. Vol. 6. P. 207–211.
4. Верховлюк А.М., Русаков П.В., Лахненко В.Л., Петровський Р.В., Червоний І.Ф. Процес одержання вторинних кольорових сплавів з використанням індукційної плавки. *Процеси лиття*. 2019. Т. 134. № 2. С. 40–48.
5. Li H., Wang A., Liu T., Chen P., He A., Li Q., Luan J., Liu C.-T. Design of Fe-based nanocrystalline alloys with superior magnetization and manufacturability. *Materials Today*. 2021. Vol. 42. P. 49–56.

6. Patil D.D., Ghatge D.A. Parametric Evaluation of Melting Practice on Induction Furnace to Improve Efficiency and System Productivity of CI and SGI Foundry – A Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. Special Issue 1. P. 159–163.
7. Козлов Г.О., Тополов В.Л. Індукційні печі: навчальний посібник для студентів ВНЗ. Нікополь: НТ НМетАУ, 2008. 32 с.
8. Середенко В.О., Середенко О.В., Паренюк О.А. Виплавка металів та сплавів з високою електропровідністю в індукційних тигельних печах. *Литво. Металургія*. Запоріжжя: АА Тандем. 2019. С. 180–182.
9. Khaydarov A.K., Karimov B.Y. Features of the use of induction crucible furnaces for melting metals. *International Journal of Social Science & Interdisciplinary Research*. 2022. Vol. 11 (03). P. 33–39.
10. Rudnev V., Fett G.A., Griebel A., Tartaglia J. Principles of induction hardening and inspection. *Induction heating and heat treatment, ASM handbook. ASM International*. 2014. Vol. 4.
11. Razzhivin O., Markov O., Subotin O. Automated Melt Temperature Control System in Induction Furnace. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, 2022. P. 1–4.
12. Dötsch, E. Operation of Induction Furnaces in Iron Foundries. In: Rudnev V.T., Totten G.E. (eds). *Induction heating and heat treatment, ASM handbook. ASM International*. 2014. Vol. 4C.
13. Кущенко П.О., Шулик І.Г., Кущенко К.І., Крахмаль Ю.О., Ткаченко Л.П., Мішньова Ю.Є. Залежність властивостей високоглиноземної зернистої маси та зразків з неї від виду добавки ZrO<sub>2</sub>. *Технологія та застосування вогнетривів і технічної кераміки у промисловості* : тези Міжнародної науково-технічної конференції. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2021. С. 11–12.
14. Dötsch E., Nacke B. Components and Design of Induction Crucible Furnaces. In: Rudnev V.T., Totten G.E. (eds). *Induction heating and heat treatment, ASM handbook. ASM International*. 2014. Vol. 4C.
15. Umbrasko A., Baake E., Nacke B., Jakovics A. Numerical studies of the melting process in the induction furnace with cold crucible. *COMPEL: The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2008. Vol. 27. No. 2. P. 359–368.
16. Freer R., Powell A.V. Realizing the potential of thermoelectric technology: a Roadmap. *Journal of Materials Chemistry C*. 2020. Vol. 8. P. 441–463.
17. Demin D. Constructing the Parametric Failure Function of the Temperature Control System of Induction Crucible Furnaces. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2020. Vol. 6. P. 19–32.
18. Przyłucki R., Golak S., Oleksiak B., Blacha L. Influence of the geometry of the arrangement inductor – crucible to the velocity of the transport of mass in the liquid metallic phase mixed inductive. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011. Vol. 11. P. 171–179.
19. Ung D. Enhancing crucible performance in non-ferrous applications. *Foundry Practice*. 2023. Vol. 272. P. 13–17.
20. Prokhorova I.Y., Novikova O.V., Lazarev V.V., Sergeev B.I. A protective coating for the tamped lining of induction furnaces. *Refractories*. 1981. Vol. 22. P. 522–525.
21. Черепова Т.С., Тісов О.В., Кіндрачук М.В., Юрчук А.О., Радіоненко О.В. Триботехнічні властивості порошкового сплаву системи Со-ТіС в умовах високотемпературного фретингу. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 3 (88). С. 99–108.
22. Buliński P., Smolka J., Golak S., Przyłucki R., Palacz M., Siwiec G., Lipart J., Białecki R., Blacha L. Numerical and experimental investigation of heat transfer process in electromagnetically driven flow within a vacuum induction furnace. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 124. P. 1003–1013.
23. Смірнов О.М., Осипенко В.В., Семірягін С.В., Горюк М.С., Семенко А.Ю., Скоробагатько Ю.П. Перемішування металевих розплавів як засіб підвищення ефективності функціонування агрегату «ківш-піч». Новий метод електромагнітного перемішування металевих розплавів в агрегаті «ківш-піч». *Процеси лиття*. 2023. № 2 (152). С. 3–15.

#### REFERENCES:

1. Smirnov O.M., Timoshenko S.M., Narivskiy A.V. (2023). Vidnovlennia ta innovatsiyni rozvytok vyrobnytstva stali v Ukraini v konteksti enerhoefektyvnosti ta yevropeiskoho zelenoho kursu [Restoration and innovative development of steel production in Ukraine in the context of energy efficiency and the European green course]. *Visnyk NAN Ukrainy*. No 4. P. 21–38. [in Ukrainian]
2. Ren W., Wang L. (2022). Precipitation behavior of M23C6 in high nitrogen austenitic heat-resistant steel. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 905.
3. Bedarkar S.S., Singh R. (2013). Removal of Phosphorous from Steel Produced by Melting Sponge Iron in Induction Furnace. *Trans. Indian. Inst. Met.* Vol. 6. P. 207–211.



4. Verkhovliuk A.M., Rusakov P.V., Lakhnenko V.L., Petrovskiy R.V., Chervonyi I.F. (2019). Protses oderzhannia vtorynnykh kolorovykh splaviv z vykorystanniam induktsiinoi plavky. [The process of obtaining secondary non-ferrous alloys using induction melting]. *Protsesy lyttia*. No. 134(2). P. 40–48. [in Ukrainian]
5. Li H., Wang A., Liu T., Chen P., He A., Li Q., Luan J., Liu C.-T. (2021). Design of Fe-based nanocrystalline alloys with superior magnetization and manufacturability. *Materials Today*. Vol. 42. P. 49–56.
6. Patil D.D., Ghatge D.A. (2017). Parametric Evaluation of Melting Practice on Induction Furnace to Improve Efficiency and System Productivity of CI and SGI Foundry – A Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. Vol. 4. Special Issue 1. P. 159–163.
7. Kozlov H.O., Topolov V.L. (2008). Induktsiini pechi: navchalnyi posibnyk dlia studentiv VNZ [Induction furnaces: a study guide for university students]. Nikopol: NT NMetAU. 32 s. [in Ukrainian]
8. Seredenko V.O., Seredenko O.V., Pareniuk O.A. (2019). Vyplavka metaliv ta splaviv z vysokoju elektroprovodnistiu v induktsiinykh tyhelnykh pechakh [Smelting of metals and alloys with high electrical conductivity in induction crucible furnaces]. *Lytvo. Metalurhiia*. Zaporizhzhia: AA Tandem. P. 180–182. [in Ukrainian]
9. Khaydarov A.K., Karimov B.Y. (2022). Features of the use of induction crucible furnaces for melting metals. *International Journal of Social Science & Interdisciplinary Research*. Vol. 11 (3). P. 33–39.
10. Rudnev V., Fett G.A., Griebel A., Tartaglia J. (2014). Principles of induction hardening and inspection. In: Rudnev V.T., Totten G.E. (eds). *Induction heating and heat treatment, ASM handbook*. ASM International. Vol. 4.
11. Razzhivin O., Markov O., Subotin O. (2022). Automated Melt Temperature Control System in Induction Furnace. In *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. P. 1–4.
12. Dötsch, E. (2014). Operation of Induction Furnaces in Iron Foundries. In: Rudnev V.T., Totten G.E. (eds). *Induction heating and heat treatment, ASM handbook*. ASM International. Vol. 4C.
13. Kushchenko P.O., Shulyk I.H., Kushchenko K.I., Krakhmal Yu.O., Tkachenko L.P., Mishnova Yu.Ye. (2021). Zalezhnist vlastyvoitei vysokohlynozemoi zernystoi masy ta zrazkiv z nei vid vydu dobavky ZrO<sub>2</sub> [Dependence of the properties of high-alumina granular mass and samples from it on the type of ZrO<sub>2</sub> additive]. *Mizhnarodna naukovo-tekhnicna konferentsiia "Tekhnolohiia ta zastosuvannia vohnetryviv i tekhnichnoi keramiky u promyslovosti": tez. dop.* Kh.: DISA PLLuS. P. 11–12. [in Ukrainian]
14. Dötsch E., Nacke B. (2014). Components and Design of Induction Crucible Furnaces. In: Rudnev V.T., Totten G.E. (eds). *Induction heating and heat treatment, ASM handbook*. ASM International. Vol. 4C.
15. Umbrasko A., Baake E., Nacke B., Jakovics A. (2008). Numerical studies of the melting process in the induction furnace with cold crucible. *COMPEL: The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. Vol. 27. No. 2. P. 359–368.
16. Freer R., Powell A.V. (2020). Realizing the potential of thermoelectric technology: a Roadmap. *Journal of Materials Chemistry C*. Vol. 8. P. 441–463.
17. Demin D. (2020). Constructing the Parametric Failure Function of the Temperature Control System of Induction Crucible Furnaces. *EUREKA: Physics and Engineering*. Vol. 6. P. 19–32.
18. Przyłucki R., Golak S., Oleksiak B., Blacha L. (2011). Influence of the geometry of the arrangement inductor – crucible to the velocity of the transport of mass in the liquid metallic phase mixed inductive. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Vol. 11. P. 171–179.
19. Ung D. (2023). Enhancing crucible performance in non-ferrous applications. *Foundry Practice*. Vol. 272. P. 13–17.
20. Prokhorova I.Y., Novikova O.V., Lazarev V.V., Sergeev B.I. (1981). A protective coating for the tamped lining of induction furnaces. *Refractories*. Vol. 22. P. 522–525.
21. Cherepova T.S., Tisov O.V., Kindrachuk M.V., Yurchuk A.O., Radionenko O.V. (2020). Trybotekhnichni vlastyvoitei poroshkovoho splavu systemy Co-TiC v umovakh vysokotemperaturnoho fretynhu [Tribotechnical properties of the powder alloy of the Co-TiC system under conditions of high-temperature fretting]. *Problemy tertia ta znoshuvannia*. No. 3 (88). P. 99–108. [in Ukrainian]
22. Buliński P., Smolka J., Golak S., Przyłucki R., Palacz M., Siwiec G., Lipart J., Białecki R., Blacha L. (2017). Numerical and experimental investigation of heat transfer process in electromagnetically driven flow within a vacuum induction furnace. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 124. P. 1003–1013.
23. Smirnov O.M., Osypenko V.V., Semiriahin S.V., Horiuk M.S., Semenko A.Yu., Skorobahatko Yu.P. (2023). Peremishuvannia metalevykh rozplaviv yak zasib pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia ahrehatu "kivsh-pich". Novyi metod elektromahnitnoho peremishuvannia metalevoho rozplavu v ahrehati "kivsh-pich" [Mixing of metal melts as a means of increasing the efficiency of the ladle-furnace unit. A new method of electromagnetic mixing of metal melt in the ladle-furnace unit]. *Protsesy lyttia*. No. 2 (152). P. 3–15. [in Ukrainian]