

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-05>

УДК 669.02/09.411

В. Г. Кисляков^{1,*}, к.т.н., зав. відділу, ORCID 0000-0002-1775-5050**І. О. Маначин**¹, к.т.н., с.д., с.н.с., ORCID 0000-0002-1031-3241**А. А. Похвалітий**², к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-9652-767X¹ *Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України*² *Дніпровський державний технічний університет*^{*} *Автор для листування: vovkdragon12@gmail.com*

ДОСЛІДЖЕННЯ НА "ГАРЯЧІЙ" МОДЕЛІ ПОВЕДІНКИ ДОМІШОК У ЧАВУНІ ПІД ЧАС КОМПЛЕКСНОЇ ОБРОБКИ

Анотація. Метою роботи є встановлення закономірностей поведінки та розподілу домішок у чавуні під час комплексної обробки на «гарячій» моделі, з урахуванням впливу термодинамічних і кінетичних факторів, для оптимізації процесів очищення та підвищення якості металу. Комплексна обробка розплавленого чавуну передбачає застосування декількох технологічних впливів, що дозволяє ефективніше контролювати хімічний склад і мікроструктуру металу. Актуальність такої обробки зумовлена необхідністю отримання високоякісних сплавів при одночасному зниженні витрат і підвищенні екологічної безпеки виробництва. Важливим інструментом удосконалення технології є моделювання процесів видалення та поведінки домішок у розплавленому металі. Особливої цінності набувають дослідження на так званих "гарячих" моделях, що передбачають роботу безпосередньо з рідким чавуном. Виконані розрахунки для умов інжекційної обробки чавуну з метою комплексного видалення домішок у лабораторній індукційній печі ємністю 100 кг. Побудована загальна схема теплових втрат рідкого чавуну при комплексному рафінуванні від домішок за рахунок інжектування реагентів у газі-носії. Варто відзначити той факт, що даний дозувальний пристрій вперше було застосовано для роботи з рідким чавуном. Перед проведенням "гарячих" обробок було виконано "холодні" випробування всього обладнання, яке показало готовність для проведення експериментальної частини досліджень. Було проведено 4 обробки. На початку і наприкінці кожної обробки було відібрано проби чавуну і шлаку, також проведено заміри температури. Проводилася фіксація виданого реагенту за показаннями ваг до і після обробки. Під час проведення обробок було відпрацьовано технологічні параметри інжектування, які дали змогу вести обробку технологічно, без підвищеної бурності. Проведений аналіз вмісту домішок у чавуні показав, що з урахуванням умов проведення експерименту мають місце процеси десульфурзації, знекремнювання та дефосфорації, у тому числі одночасно.

© В. Г. Кисляков, І. О. Маначин, А. А. Похвалітий, 2025

Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Ключові слова: чавун, комплексна обробка, сірка, кремній, фосфор, моделювання.

Посилання для цитування: Кисляков В. Г. , Маначин І. О., Похвалітий А. А. Дослідження на "гарячій" моделі поведінки домішок у чавуні під час комплексної обробки. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 78-88. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-05>

Стан питання. У сучасній чорній металургії особливу увагу приділяють підвищенню якості чавуну та сталі за рахунок зниження вмісту шкідливих домішок, зокрема сірки, кремнію та фосфору. Комплексна обробка розплавленого чавуну передбачає застосування декількох технологічних впливів, що дозволяє ефективніше контролювати хімічний склад і мікроструктуру металу. Актуальність такої обробки зумовлена необхідністю отримання високоякісних сплавів при одночасному зниженні витрат і підвищенні екологічної безпеки виробництва.

Важливим інструментом удосконалення технології є моделювання процесів видалення та поведінки домішок у розплавленому металі. Особливої цінності набувають дослідження на так званих "гарячих" моделях, що передбачають роботу безпосередньо з рідким чавуном. На відміну від моделей, які базуються на розрахунках або комп'ютерних симуляціях, "гарячі" моделі відображають реальні фізико-хімічні умови, включаючи вплив високих температур, кінетику реакцій та взаємодію розплаву з реагентами. Це дозволяє отримати більш достовірні результати щодо розчинності, швидкості видалення домішок та ефективності застосованих методів обробки.

Дослідники різних країн проводили роботи по моделюванню технологічних процесів на «гарячих» моделях. Так, наприклад, вітчизнянні дослідники [1] відповідно до запропонованої технологічної схеми проводили моделювання одностадійного видалення частини кремнію і десульфурацію передільного чавуну. Була запропонована наступна схема: початкова обробка розплаву присадкою чушкового алюмінію під час наповнення ковша; подальше вдування реагентів через дві заглибні фурми, які пов'язані з двома моно- або коінжекційними системами подачі порошків, які працюють незалежно одна від одної; вдування через заглибну фурму типу "труба в трубі" порошкоподібного вапна в потоці кисню в кільцевій оболонці азоту; подавання диспергованого магнію або суміші ($\text{CaO}+\text{Mg}$) у потоці азоту через другу занурювальну фурму; введення алюмінієвої катанки в межах вторинної зони спільного видалення кремнію і сірки з метою

підтримання заданого складу шлаку системи ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$) і розкислення відокремленої зони десульфурзації.

Серед закордонних дослідників можна відзначити роботу [2], в якій оцінено здатність видалення фосфору і сірки з розплавленого металу за допомогою флюсів $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$. Для зміни кисневого потенціалу розплавленого заліза використовували певні добавки FeO і Na_2O . Експерименти проводили у відкритій індукційній печі об'ємом 10 кг з використанням вогнетриву Al_2O_3 в діапазоні температур 1350- 1400 °С.

Також можна відзначити роботу [3], в якій автори в лабораторних умовах досліджували реакції десульфурзації та дефосфоризації у розплавленому металі. Сплави плавили в потоці гелію і додавали попередньо нагріту кальциновану соду, проби металу відбирали через певні проміжки часу і аналізували на вміст сірки, фосфору і вуглецю. Зразки газу, що утворився, також відбирали через певні проміжки часу і аналізували.

Слід зазначити відсутність інформації про "гаряче" моделювання з використання суміші на основі $\text{CaO-Na}_2\text{CO}_3\text{-FeO}$ з присадкою алюмінію для здійснення комплексної обробки чавуну для видалення домішок.

Мета роботи. Встановити закономірності поведінки та розподілу домішок у чавуні під час комплексної обробки на «гарячій» моделі, з урахуванням впливу термодинамічних і кінетичних факторів, для оптимізації процесів очищення та підвищення якості металу.

Основні результати дослідження. Враховуючи, що на практиці металургійного виробництва інжекція реагентів у розплав супроводжується зниженням його температури, то основним завданням з етапу досліджень на гарячому металі є визначення теплових втрат при обробці та розробка рекомендацій з їх покриття. Подальші розрахунки проводяться для умов інжекційної обробки чавуну з метою комплексного видалення домішок у лабораторній індукційній печі ємністю 100 кг.

Загальна схема теплових втрат рідкого чавуну при комплексному рафінуванні від домішок за рахунок інжектування реагентів у газі-носії представлений на рис. 1.

Для лабораторних умов (інтенсивність введення суміші 1 кг/хв, витрати газу-носія 60 л/хв, довжина фурми 0,8 м, діаметр фурми 0,1 м) здійснення процесу комплексного рафінування чавуну від домішок втрати теплоти з дзеркала металу випромінюванням та з охолодженням індуктора печі складають 522 КДж/хв. Витрати на нагрівання газу носію складають 5,4 КДж/хв. Теплові втрати на нагрівання та дисоціацію складових суміші для рафінування, що вводяться у розплав складають 4328,4 КДж/хв. Крім того до загальних витрат теплоти додано кількість

теплоти для нагрівання занурної фурми до робочої температури – 11172 КДж. Таким чином загальні втрати теплоти на процес обробки рідкого чавуну з метою комплексної обробки складають - 16027,8 КДж/хв. Зазначені значення отримані з урахуванням основних теплофізичних особливостей реального виробничого процесу та методик представлених у роботі [4].

Враховуючи, що додатковим джерелом кисню для окислення алюмінію можуть бути оксиди заліза, що входять до складу суміші для рафінування, то залишковий тепловий дефіцит може бути покритий саме цими процесами відповідно до рівняння [5]:

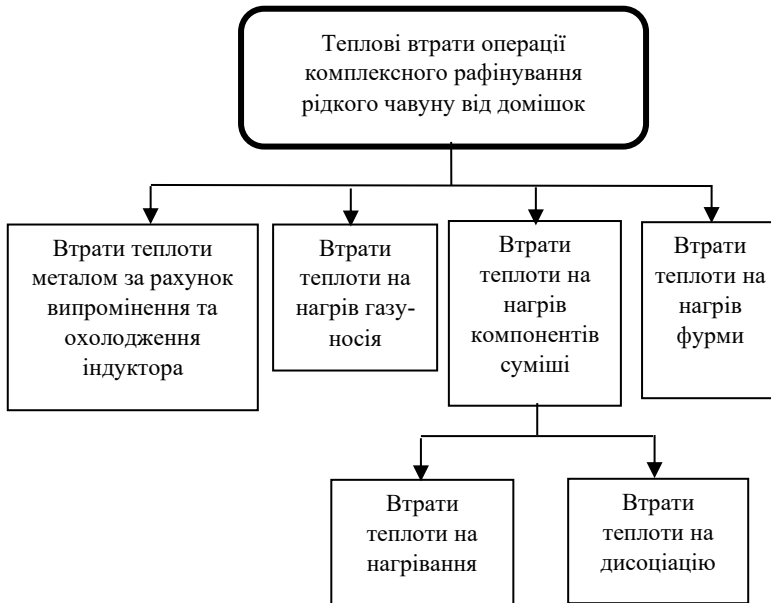
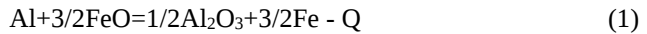


Рисунок 1 – Загальна схема класифікації теплових втрат при комплексному рафінуванні чавуну від домішок.

На 1 моль окисленого алюмінію відповідно до рівняння (1) виділяється 4270 КДж теплоти. Розрахунок необхідної кількості алюмінію для компенсації теплових втрат становить $((16027,8 - 27,9) / 4270) * 27 = 101,17$ г. Таким чином, загальна кількість

алюмінію, що повинна бути засвоєна металевою ванною в лабораторних умовах повинна складати 101,17 г/хв.

Відомості про тепловий ефект процесу окислення алюмінію при різних умовах були обчислені з урахуванням роботи [6].

Отже, для здійснення процесу комплексного рафінування рідкого чавуну в лабораторних умовах без істотного зниження температури розплаву необхідно забезпечити присутність у металевій ванні 101,17 г/хв металевого алюмінію. З урахуванням особливостей проведення експерименту пропонується виконувати попереднє розкислення шляхом примусового занурення кускового алюмінію у кількості 600 г кожні 1,5 хв.

Для проведення лабораторних досліджень із гарячим чавуном за основу було взято лабораторну установку (рис. 2), на якій проводилися налагодження технології на "холодних" моделях. [7].

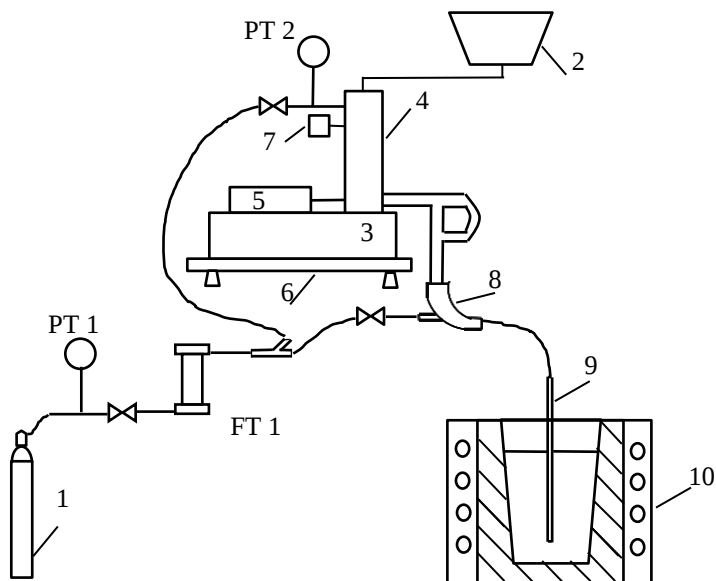


Рисунок 2 – Схема лабораторної установки для «гарячого» моделювання: 1-газовий балон, 2-видатковий бункер реагентів, 3-корпус, 4-дозуючий пристрій, 5-привод, 6- ваговимірювальний пристрій, 7-вібратор, 8-аерокамера, 9-фурма, 10-індукційна піч з ківшом.

Лабораторні дослідження проводилися на базі лабораторії кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова Дніпровського державного технічного університету (м. Кам'янське).

Виконаний монтаж і налагодження обладнання містив у собі вибір місця і розміщення дозувального пристрою, встановлення сполучних шлангів, усунення недоліків, пов'язаних з експлуатацією обладнання. Було відпрацьовано методику обслуговування обладнання та усунення можливих аварійних ситуацій. На рис. 3, представлено зовнішній вигляд лабораторного обладнання, яке було задіяно під час проведення обробок на гарячому металі. Варто відзначити той факт, що даний дозувальний пристрій вперше було застосовано для роботи з рідким чавуном.



Рисунок 3 – Лабораторне обладнання для «гарячого» моделювання комплексної обробки чавуну.

Суміш реагентів для інжектування попередньо просіювали на ситі з розміром комірки 1 мм. Співвідношення компонентів становило: CaO – 60 %, FeO – 30 %, Na_2CO_3 – 10 %, що є оптимальним для проведення комплексного рафінування чавуну відповідно до результатів попередніх досліджень [6]. Алюміній також попередньо підготували: розсортували та зважили необхідну кількість, яку згодом вводили в рідкий чавун.

Важливою складовою проведення обробок був відбір проб чавуну та шлаку, а також вимірювання температури в процесі експерименту. Пробу чавуну отримували шляхом наливу порції чавуну у пробницю. Температуру вимірювали за допомогою ручного пірометра «Смотрич 5М».

Перед проведенням «гарячих» обробок було здійснено «холодні» випробування всього обладнання, які підтвердили його готовність до виконання експериментальної частини досліджень.

Для отримання рідкого розплаву використовували чушки чавуну, які попередньо зважували та поступово завантажували в піч у міру їх розплавлення. Загальна маса завантаженого чавуну становила 72,5 кг. Тривалість процесу плавлення чушок складала 1 годину 20 хвилин. Протягом цього часу шляхом розсіву було підготовлено суміш реагентів, яку засипали в дозувальний пристрій у міру витрачання. Після отримання рідкого розплаву в нього вводили алюміній, масу якого фіксували в протоколі плавки.

Було проведено 5 обробок (табл. 1). На початку і наприкінці кожної обробки було відібрано проби чавуну і шлаку, також проведено заміри температури. Проводилася фіксація кількості виданого реагенту за показаннями ваг до і після обробки.

Під час проведення обробок було відпрацьовано технологічні параметри інжектування, які дали змогу вести обробку технологічно, без підвищеної бурності (рис. 4).

На основі даних хіманаліза чугуна был выполнен анализ эффективности удаления примесей чугуна при применении рафинирующей смеси на основе $\text{CaO-Na}_2\text{CO}_3\text{-FeO}$ с присадкой алюминия. Полученные зависимости приведены на рис. 5.



Рисунок 4 – Відеокадр лабораторної обробки чавуну.

Таблиця 1 – Технологічні параметри лабораторних обробок.

№	Маса чавуну, кг	Маса реагенту, кг	Час обробки, хв:сек	Витрата газаносія, нм ³ /год	Тиск у трасі, МПа	Температура до/ після обробки, °С	Маса алюмінію, кг
1	72,5	1	1:00	3,6-4,8	0,1	1280	0,685
2	70,5	1	1:00	2,4-3,6	0,1	1350	-
3	69,5	1	1:00	3	0,1	1350	0,715
4	68,5	1	1:00	3	0,1	1450	0,770
5	67,5	1	1:00	3	0,1	1450	0,860

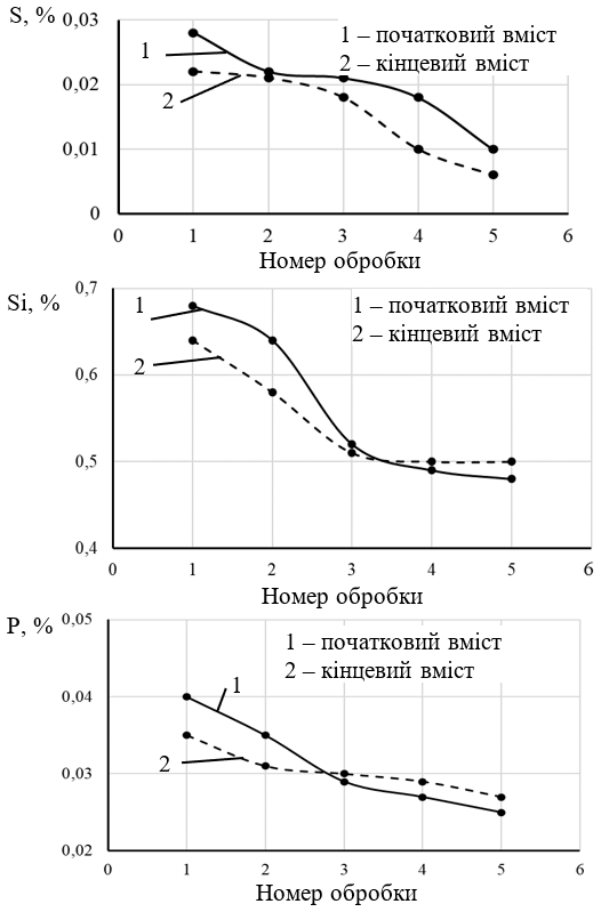


Рисунок 5 – Ефективність видалення домішок в лабораторних дослідженнях.

Висновки

1. Проведені на «холодних» моделях попередні розрахунки обладнання для інжектування дали змогу реалізувати введення реагенту у розплав чавуна.

2. Визначено параметри газодинамічної системи інжектування та технологічні параметри введення суміші, які забезпечили технологічність проведення обробки.

3. Проведено аналіз вмісту домішок у чавуні, який показав, що з урахуванням умов проведення експерименту мають місце процеси десульфурзації, знекремнювання та дефосфорації, у тому числі одночасно, що дає змогу казати про перспективність суміші, що застосовувалася.

Перелік посилань.

1. Chernyatevich A. G., Sigarev E. N., Berezina A. V. Refining of hot metal with organization of isolated reaction zones for the removal of silicon and sulphur. *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41, No. 4. P. 307–310. <https://doi.org/10.3103/S0967091211040036>

2. Hernandez A., Romero A., Chavez F., Angeles M., Moral R. D. Dephosphorization and Desulfurization Pretreatment Iron with CaO-SiO₂-CaF₂-FeO-Na₂O Slags. *ISIJ International*. 1998. Vol. 38, No. 2. P. 126-131. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.126>

3. Mori K., Wada H., Pehlke R. D. Simultaneous desulfurization and dephosphorization reactions of molten iron by soda ash treatment. *Metall Trans B*. 1985. Vol. 16. P. 303–312. <https://doi.org/10.1007/BF02679721>

4. Эллиот Д. Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. М. : Металлургия, 1969, 252 с.

5. Кньюпель Г. Раскисление и легирование стали / Перевод с нем. Г.Н. Еланского. М. : Металлургия, 1973, 312 с.

6. Пушкаренко М. В., Кисляков В. Г., Молчанов Л. С., Чубін К. І., Похвалітій А. А. Термодинамічний аналіз технологічної операції рафінування чавуну сумішшю оксидних компонентів системи CaO-FeO-Na₂CO₃ *Збірник наукових праць ДДТУ*, 2022, № 2(41). С. 26-35.

7. Кисляков В. Г., Манахин І. О., Єлісеєв В. І., Руденко О. Л. Дослідження інжекційного введення газопорошкових струменів методами «холодного» моделювання. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 186-198. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-186-198>

References

1. Chernyatevich, A. G., Sigarev, E. N., & Berezina, A. V. (2011). Refining of hot metal with organization of isolated reaction zones for the removal of silicon and sulphur *Steel in Translation*, 41(4), 307–310. <https://doi.org/10.3103/S0967091211040036>

2. Hernandez, A., Romero, A., Chavez, F., Angeles, M., & Moral, R. D. (1998). Dephosphorization and Desulfurization Pretreatment Iron with CaO-SiO₂-CaF₂-FeO-

Na₂O Slags. *ISIJ International*, 38(2), 126-131
https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.126

3. Mori, K., Wada, H. & Pehlke, R. D. (1985). Simultaneous desulfurization and dephosphorization reactions of molten iron by soda ash treatment. *Metall Trans B*, 16, 303–312. https://doi.org/10.1007/BF02679721

4. Elliot, D. F., Glaser, M., & Ramakrishna, V. (1969). *Thermochemistry of steelmaking processes*. Metallurgy

5. Knüppel G. (1973). Deoxidation and alloying of steel. *Metallurgy*

6. Pushkarenko, M. V., Kislyakov, V. G., Molchanov, L. S., Chubin, K. I., & Chubin, A. A. (2022). Thermodynamic analysis of the technological operation of cast iron refining with a mixture of oxide components of the CaO-FeO-Na₂CO₃ system *Collection of scientific works of DSTU*, 2(41), 26-35

7. Kislyakov, V. G., Manachin, I. O., Eliseev, V. I., & Rudenko, O. L. (2024). Investigation of the injection of gas-powder jets by cold modeling methods. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 186-198. https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-186-198

V. H. Kysliakov¹, Ph. D. (Tech.), Head of Department, ORCID 0000-0002-1775-5050

I. O. Manachyn¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-1031-3241

A. A. Pokhvaliyi², Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-9652-767X

¹Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

²Dniprovsky State Technical University

*Corresponding author: vovkdragon12@gmail.com

RESEARCH ON THE "HOT" MODEL OF IMPURITIES BEHAVIOR IN CAST IRON DURING COMPLEX PROCESSING

Abstract. The aim of this work is to establish the regularities of behavior and distribution of impurities in cast iron during complex treatment on a hot model, taking into account the influence of thermodynamic and kinetic factors, to optimize the cleaning processes and improve the quality of the metal. The complex treatment of molten iron involves the use of several technological effects, which allows for more effective control over the chemical composition and microstructure of the metal. The relevance of this treatment is driven by the need to produce high-quality alloys while reducing costs and improving environmental safety. An important tool for improving the technology is modeling the removal processes and the behavior of impurities in molten metal. Of particular value is research on so-called "hot" models that involve working directly with liquid iron. Calculations were performed for the conditions of injection treatment of cast iron for the purpose of complex removal of impurities in a laboratory induction furnace with a capacity of 100 kg. A general scheme of heat losses of liquid cast iron during complex refining from impurities by injecting reagents into carrier gases was constructed. It is worth noting the fact that this dosing device was first used to work with liquid cast iron. Prior to the "hot" treatments, cold tests of all equipment were performed, which showed that it was ready for the

experimental part of the research. Four treatments were carried out. At the beginning and end of each treatment, samples of cast iron and slag were taken, and temperature measurements were also made. The amount of reagent dispensed was recorded according to the readings of the scales before and after the treatment. During the treatments, the technological parameters of the injection were worked out, which made it possible to carry out the treatment technologically, without increased turbulence. The analysis of the content of impurities in cast iron showed that, taking into account the conditions of the experiment, desulfurization, desilting and dephosphorization processes occur, including simultaneously.

Key words: cast iron, complex processing, sulfur, silicon, phosphorus, modelling.

For citation: Kysliakov, V. H., Manachyn, I. O., & Pokhvalityi, A. A. (2025). Research on the "hot" model of impurities behavior in cast iron during complex processing. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 78-88. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-05>

Рукопис надійшов до редакції / Received 14.07.2025

Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025