

УДК 669.17.046.516.2:669-154.001.5

С. В. Греков^{1,*}, н.с., ORCID 0000-0003-2849-0999**В. П. Піптюк**¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-2915-1756**П. Г. Прокопенко**¹, пров. метролог**С. Є. Самохвалов**¹, д.т.н., с.н.с., проф. ORCID 0000-0002-7362-213X**Є. С. Какушкін**¹, пров. інж.¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України* Автор для листування: gsv4321@i.ua

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОЗАПІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ МЕТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ. ЧАСТИНА 1. ВИБІР МАТЕРІАЛІВ, ПІДГОТОВКА І ТЕСТОВЕ ВИПРОБУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ

Анотація. В переліку факторів впливу на процеси позапечної обробки металевих розплавів важливе місце займають умови перемішування рідкої металевої ванни в наповненому сталерозливному ковші за рахунок продування аргонем крізь донні продувні фурми з різною (від 50 до 1100 л/хв в залежності від виробничих умов) інтенсивністю при здійсненні цих операцій, марки і виду використовуваного легуючого матеріалу яким саме обробляється розплав, температурного стану ванни та деяких інших чутливих до впливу на ефективність застосування матеріалодобавки факторів. Виконаними в останній час особистими дослідженнями на прикладі грудкового феромарганцю марки ФМн78 методом математичного моделювання показано вплив кількості легуючого матеріалу на гідродинамічний і тепловий стан металевого розплаву в ковшах ємністю 60 та 250 т під час і в короткотривалий період після його введення. Визначено, що в прилеглих до добавки об'ємах розплаву відбуваються зміни швидкісних і температурних параметрів, що впливає на умови плавлення і розподілу його продуктів в ванні. На підставі цього зроблено припущення стосовно впливу кількісного фактору на ефективність процесу легування. З врахуванням відсутності на теперішній час надійних значень швидкісних параметрів вітання твердих легуючих добавок при введенні в рідку металеву ванну в ковші під час її продування аргонем в залежності від витрат газу, інших умов і неможливості відповідної адаптації розробленої математичної моделі, що описує процес легування, було вирішено додатково дослідити гідродинаміку ванни в відповідних умовах методом холодного фізичного моделювання. Запропонована стаття присвячена висвітленню підготовчого періоду до проведення намічених фізичних досліджень.

© С. В. Греков, В. П. Піптюк, П. Г. Прокопенко, С. Є. Самохвалов, Є. С. Какушкін, 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: модельні матеріали легуючих, трасери, критерії подоби, тестові випробування.

Посилання для цитування: Експериментальні дослідження процесів позапічного легування металевого розплаву методом холодного фізичного моделювання. Частина 1. Вибір матеріалів, підготовка і тестове випробування обладнання / С. В. Греков, В. П. Піптюк, П. Г. Прокопенко, С. Є. Самохвалов, Є. С. Какушкін // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 148-159. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-08>

Вступ. Незважаючи на значну кількість публікацій останнього часу що стосуються оцінки значення раніше виявлених і пошуку нових факторів впливу на ефективність процесів позапічної обробки сталі [1-16] певна черга питань залишається ще не вирішеними. До переліку таких важливих і не вирішених, на наш погляд, слід віднести кількісний фактор, а саме масу добавки яка додається у рідку металеву ванну, наприклад, з метою легування. Власними дослідженнями останніх років [17-19] методом математичного моделювання на прикладі шматкового феромарганцю марки ФМн78, що вводили в сталерозливні ковши ємністю 60 і 250 т, при легуванні металу в кількості 1-3 кг/т під час донної продувки аргонном з витратою газу від 50 до 1100 л/хв на установках ковш-піч (УКП) в залежності від технологічних і виробничих умов показано як, ймовірно, змінюються гідродинамічні і температурні параметри ванни на протязі короткотривалого (до 4,5 с) простеження перебування твердого матеріалу добавки в рідкому розплаві від моменту його потрапляння в метал. На підставі отриманих результатів зроблено припущення що до впливу кількості матеріалу добавки на умови плавлення останнього. Авторами статті також зроблено теоретичне припущення [20] відносно впливу матеріалу добавки з відмінною від металевого розплаву густиною на перебіг тепломасопереносних процесів. В зв'язку з тим що для остаточного визначення поведінки твердої добавки на протязі всього часу перебування в розплаві аж до моменту її розплавлення потрібно мати надійні гідродинамічні характеристики розплаву в залежності від ємності ванни, умов її продування, та кількості добавки, а також відсутністю відповідних літературних даних, було вирішено провести додаткові дослідження методом холодного фізичного моделювання.

Метою запропонованої статті є перелічення завдань які були намічені і виконані авторами в період підготовки до проведення досліджень з холодного фізичного моделювання. Зміст статті включає використані пошукові підходи при обґрунтуванні вибору того чи іншого матеріалу для використання в якості аналогів легуючих добавок, а також трасерів, що імітуватимуть напрями потоків розплаву, для подальшого визначення його швидкісних характеристик. Наведені параметри фіксуючого фото-

відеообладнання, яке було обрано для використання під час експериментів, а також вживаного пристрою для введення матеріалів-аналогів добавок у ванну ковша.

Дослідження електропровідності передбачатиме виявлення особливостей розчинення шматкової добавки солі під час продування ковшової ванни з різною інтенсивністю та фіксації часу гомогенізації.

Особливості схеми лабораторного обладнання для холодного фізичного моделювання процесів позапічного легування металевого розплаву. На рис. 1 представлена схема лабораторного обладнання що буде використано для дослідження гідродинамічного стану рідкої металеві ванни методом холодного фізичного моделювання, а також для визначення часу усереднення розчиненої шматкової добавки солі при різних теплових умовах під час продування повітрям.

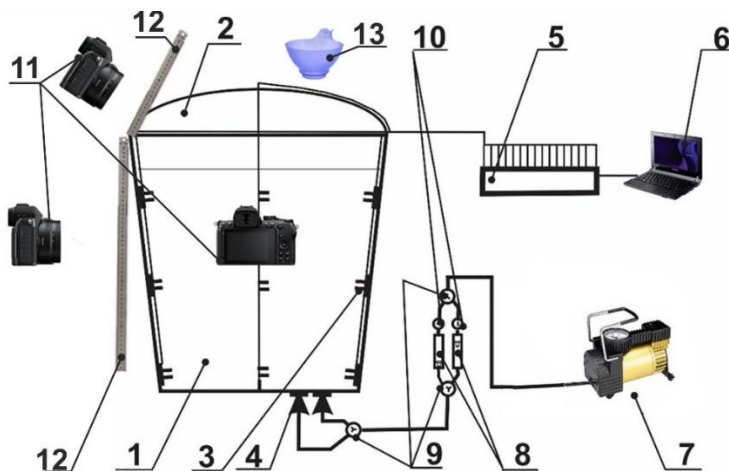


Рисунок 1 – Функціональна схема обладнання для холодного фізичного моделювання. Позначення: 1 – ківш холодного моделювання; 2 – кришка ковшу; 3 – реєстраційні датчики; 4 – донні продувні фурми; 5 – АЦП; 6 – комп'ютер; 7 – компресор з ресивером на 50 л; 8 – ротаметр; 9 – трійник; 10 – кран; 11 – камери для відеозйомки; 12 – вимірювальні металеві лінійки, 13 – воронка для введення добавок.

В якості моделі сталерозливного ковша застосовували раніше випробуваний прозорий ківш кафедри електрометалургії імені академіка М.І.Гасика Навчально-наукового інституту «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій [21]. В порівнянні з раніше використаною схемою лабораторного обладнання теперішній ківш додатково обладнали вимірювальними лінійками, які

закріпили у 3-х взаємоперпендикулярних напрямках (осі x, y, z) для можливості розрахунків швидкості потоків з фіксованих стоп-кадрів в різні моменти часу. Для синхронізації відеоспостереження з різних ракурсів за перебігом подій під час експериментів попередньо певним чином налаштували кожну з 3-х камер. Крім того, дві камери що повинні працювати в одній площині (осі x, y) були розташовані на одній відстані і одній висоті по відношенню до моделі ковша. Третя камера що працюватиме у положенні (під кутом до вісі z) була закріплена на спеціальному штативі на висоті нижче воронки для накопичення і скидання матеріалу-добавки у ванну з можливістю її переміщення в горизонтальній площині. З метою використання відповідних до промислових умов режимів продувки ванни ковша певної ємності виконали їх розрахунки з використанням критеріїв подібності (табл. 1). В табл. 2 наведені порівняні геометричні параметри ковшів підприємств, що розглядатимуться.

Таблиця 1 – Запропоновані експериментальні режими продувки ванни.

Підприємство	Промисловий ківш			Модельний ківш			Критерій Архімеда
	Витрати аргону, л/хв	Об'ємні витрати аргону, $\times 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$	Швидкість виходу аргону, м/с	Витрати повітря, л/хв	Об'ємні витрати повітря, $\times 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$	Швидкість виходу повітря, м/с	
ПрАТ «ДСС»*	50	8,33	6,94	0,238	3,97	1,250	36,66
	100	16,67	13,89	0,477	7,95	2,501	146,76
	150	25,00	20,83	0,715	11,92	3,752	330,31
	200	33,33	27,78	0,954	15,90	5,002	787,06
	300	50,00	41,67	1,431	23,85	7,504	1321,23
ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»*	400	66,67	46,30	0,756	12,61	6,933	1490,74
	800	133,33	92,59	1,513	25,21	13,865	5962,95
	1200	200,00	138,89	2,269	37,82	20,798	13416,64
	1600	266,67	185,19	3,026	50,43	27,731	23851,80
	2200	366,67	254,63	4,160	69,34	38,129	45094,82

*) ПрАТ «ДСС» - Приватне акціонерне товариство Завод «ДніпроСпецСталь» ім. А.М.Кузміна» (м. Запоріжжя); ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» - Приватне акціонерне товариство Металургійний комбінат «КАМЕТ-СТАЛЬ» (м. Кам'янське)

Таблиця 2 – Співвідношення геометричних параметрів ідеалізованого і модельного ківшів.

Підприємство	Ідеалізований ківш			Модельний ківш			<i>m</i>
	Діаметр днища, м	Верхній діаметр, м	Висота ванни, м	Діаметр днища, м	Верхній діаметр, м	Висота ванни, м	
ПрАТ «ДСС»	2,12	2,333	2,210	0,345	0,3797	0,3597	6,145
ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»	3,07	3,469	4,135	0,345	0,3898	0,4647	8,899
Підприємство	Площа днища, м ²	Загальна площа сопел, ×10 ⁴ м ²	Об'єм, м ³	Площа днища, м ²	Загальна площа сопел, ×10 ⁶ м ²	Об'єм, м ³	<i>m</i> ²
ПрАТ «ДСС»	3,53	1,2	8,6121	0,0935	3,18	0,0371	37,76
ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»	7,40	1,44	34,7589	0,0935	1,82	0,0493	79,18

Вибір імітаторів добавок (феромарганцю та феросиліцію) сферичної форми здійснювали враховуючи критерій гомохронності ($Ho = idem$) - подібності співвідношення густини води (імітатора сталі) та гранули (імітатора шматка феросплаву). Тобто $Ho_{FeMn}=7.05/6.94=1.0159$, де 7.05 т/м³- густина ФМн78, 6.94 т/м³- густина рідкої сталі. Для феросиліцію це співвідношення дорівнює $Ho_{FeSi}=5.12/6.94=0.7377$, де 5.12 т/м³ - густина ФС45. Для модельного імітатора феросплавів густина повинна бути $Ho_{FeMn}/1,000=1.0159$ $Ho_{FeSi}/1,000=0.7377$ відповідно, де 1,000 т/м³ - густина води. Згідно даними в публікації [22] знаходили, що для феромарганцю підходить матеріал полістерол, а для феросиліцію вироби з дерева. Вибирали великий та малий діаметр для визначення впливу розмірів добавок-імітаторів на гідродинамічний стан і швидкісні характеристики потоків води. Також попередньо розраховували кількість матеріалів-аналогів легуючих добавок і трасерів (табл. 3).

Таблиця 3 – Кількість легуючих добавок

Імітатор добавки	Діаметр, мм	Маса 1шт, г	ПрАТ«ДСС»			ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»		
			1 кг/т	2кг/т	3кг/т	1 кг/т	2кг/т	3кг/т
ФМн78	20	3,58	10	20	30	14	28	42
	12	0,87	42	84	126	56	112	168
ФС45	19	1,15	32	62	124	42	84	126
	12	0,54	68	136	204	91	182	273
Трасер	8	0,26	50	50	50	50	50	50

На рис. 2 зображено зважування дерев'яних і полістерольних кульок.

Для перевірки впливу густини розплаву на його електропровідність здійснили налаштування схеми лабораторного обладнання з розміщенням 12

електродів по внутрішнім стінкам ванни ковша, як це показано на рис. 2 і 3 згідно з даними статті [21]. В тестовому випробуванні налаштованого для експериментів лабораторного обладнання використовували шматкову добавку повареної солі у кількості еквівалентній 1 кг/т. У попередніх дослідженнях [23] по усередненню ковшової ванни використовувався заморожений оцетовий розчин з перманганатом калію в якості індикатора добавки, у теперішніх дослідженнях електропровідності шарів розплаву наближених до стінки ванни використовували брикетовану поварену сіль подрібнену на шматки (рис. 4).



Рисунок 2 – Зважування полістерольних (ліворуч) і дерев'яних (праворуч) кульок.



Рисунок 3 – Під час тестування лабораторного обладнання. Зліва направо – вид збоку, спереду та згори під кутом.



Рисунок 4 – Шматки повареної солі після подрібнення брикетів.

На рис. 5 наведені зафіксовані на реєстраторі (АЦП) результати зміни електропровідності водяної ванни за рахунок розчинення добавки солі.

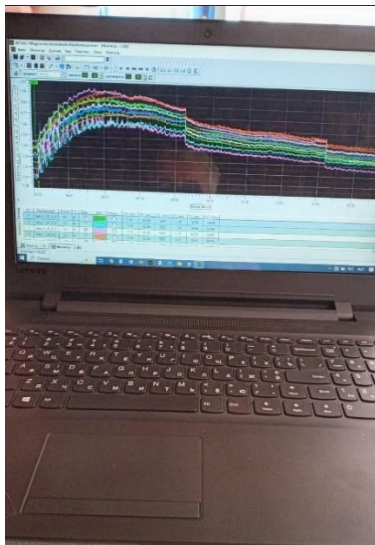


Рисунок 5 – Зафіксовані параметри електропровідності під час тестування до експерименту.

Висновки

1. Обґрунтовано наведені матеріали-аналоги легуючих добавок і трасерів для дослідження методом холодного фізичного моделювання швидкісних характеристик розплаву і умов розчинення легуючих в ньому під час позапічної обробки металу на УКП.

2. З метою коректності запланованих досліджень і збереження умов їх адекватності в лабораторних експериментах, враховуючи критерії подібності до відповідних промислових даних, розраховані технологічні вимоги і кількісні параметри матеріалів, які повинні використовуватись.

3. Проведені тестові випробування дієздатності підготовленої до використання в експериментах методом холодного фізичного моделювання схеми лабораторного обладнання. Визначена можливість проведення запланованих досліджень.

Перелік посилань

1. Fluid Flow and Mixing Phenomena in the Ladle Stirred by Argon through Multi-Tuyere / Zhu M. Y., Inomoto T., Sawada I., Hsiao T. C. // ISIJ International, Vol.35. 1995, No 5, pp. 472-479.

2. Cold Model Investigation of Fluid Flow and Mixing Characteristics by Bottom-blowing in Discontinuous Metallurgical Reactors / Koch K., Roth C., Peter M. // ISIJ International, Vol. 36. 1996, Supplement, pp. S50-S53.

3. In-situ Observation of Growth and Melting of a Solid Particle Using Transparent Organic Alloys / Esaka H., Itoga Y., Shinozuka K., Tamura M. // ISIJ International, 2006, Vol.46, Iss.6, pp. 864-870.

4. Mathematical Modeling of the Melting Rate of Metallic Particles in the Electric Arc Furnace / Gonzalez O. J. P., Ramirez-Argaez M. A., Conejo A. N. // ISIJ International, 2010, Vol.50, Iss.1, pp. 9-16.

5. Numerical Study of Multiphase Flow Dynamics of Plunging Jets of Liquid Steel and Trajectories of Ferroalloys Additions in a Ladle during Tapping Operations Rodriguez-Avila J., Morales R. D., Najera-Bastida A. // ISIJ International. 2012. Vol. 52. Iss. 5. P. 814-822.

6. Modeling and Optimisation of Gas Stirred Ladle Systems / Mazumdar D., Dhandapani P., Sarvanakumar R. // ISIJ International, 2017, Vol. 57, No. 2, pp. 286–295.

7. Gas-stirring mixing in steelmaking ladles: A review / Liu X., Li B., Zhang L. & Yang Y. // Metallurgical and Materials Transactions B. 2018, 49(2), 477–495.

8. Effect of superheat and particle size on dissolution and mixing of alloy additions in ladles / Duan C., Zhang M., Wang, H., Wang X. // Steel Research International 2019, 90 (10).

9. Numerical simulation of dissolution kinetics of alloy lumps in steel ladles / Wang Z., Jiang M., Zang J. 765 // Metals, 2023, 13(4).

10. Effect of ladle geometry and plug configuration on mixing time: A CFD study / Zang Y., Wang X. // Processes, 2023, 11(8).

11. Mixing in steelmaking ladles with slag cover / Sahai Y., Guthrie R. I. L. // ISIJ International. 2010, 50(6), 813–822.

12. CFD and plant validation of copper alloy dissolution in ladle refining / Smith J., Brown A., Lee, D. // In AISTech Conference Proceedings. 2023. P. 1123–1135

13. Wire feeding of Ca for inclusion modification: Simulation and experiments / Kumar P., Singh R., Patel S. // Journal of Metallurgical Engineering, 2022, 11(2), 145–158.

14. Effect of the Location of Tracer Addition in a Ladle on the Mixing Time through Physical and Numerical Modeling / Mario Herrera-Ortega, José Ángel Ramos-Banderas,

Constantin Alberto Hernández-Bocanegra, José Julián Montes-Rodríguez// *ISIJ International*, 2021, Vol. 61, No. 8, pp. 2185–2192.

15. Fluid Flow and Mixing Phenomena in Mechanically Agitated and Gas Stirred Ladle Systems and Their Comparisons/ Zunaid ALAM and Dipak Mazumdar// *ISIJ International*, 2022, Vol. 62., No. 1, pp. 112-123.

16. Effect of the Injection Position on Mixing Time in a Centric Gasstirred Ladle Water Model Assisted by a Systematic CFD Study/ Rodrigo Villarreal-Medina, Gerardo Trápaga-Martínez, Luis Enrique Jardón-Pérez, Adrián Manuel Amaro-Villeda, and Marco Aurelio Ramírez-Argáez// *ISIJ International*, 2024, Vol. 64, No. 14. P. 2079-2083.

17. Вплив кількості добавки на гідродинаміку металевної ванни у ківші / Самохвалов С. Є., Піптюк В. П., Греков С. В. // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії, 2023, № 37, С.231-245.

18. Залежність стану металевної ванни від кількості застосовуваного феромарганцю на установці ківш-піч / Піптюк В. П., Самохвалов С. Є., Логозинський І. М., Греков С. В. // Метал та лиття України, 2025, vol. 33, №1 (340). С. 19-25.

19. Вплив кількості добавки на тепловий стан металевної ванни у ківші / Самохвалов С. Є., Піптюк В. П., Греков С. В. // Сучасні проблеми металургії, Наукові вісті, 2025, №28. С. 201- 212.

20. Математичне моделювання тепломасопереносних процесів у ковші при введенні добавок з відмінною від рідкої сталі густиною / Самохвалов С. Є., Піптюк В. П., Греков С. В.// Збірник тез Всеукраїнської науково-методичної конференції «Проблеми математичного моделювання» (27 - 28 травня 2025 року, м. Кам'янське), ДДТУ, 2025, с.126.

21. Подготовка оборудования для физического моделирования процессов обработки расплава в сталеразливочном ковше / Пиптюк В. П., Прокопенко П. Г., Греков С. В., Костюк Ю. Б., Андриевский Г. А., Аносова А. А. // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии, 2014, Вып. 28. С.161-170.

22. Web-site: <https://bmcmetals.lv/ru/standarty/tablintsa-plotnosti-matyerialov-i-koeffitsiyentov.html>

23. Звіт про науково-дослідну роботу «Розвиток наукових уявлень про процеси ковшової обробки сталі з урахуванням порційного вводу добавок і особливостей перемішування та теплового стану при дегазації металу» № держ. рег. 0118U000081. – ІЧМ НАНУ, 2020. - 200с

References

1. Zhu, M. Y., Inomoto, T., Sawada, I., & Hsiao, T. C. (1995). Fluid Flow and Mixing Phenomena in the Ladle Stirred by Argon through Multi-Tuyere. *ISIJ International*, 35, 5, 472-479

2. Koch, K., Roth, C., & Peter, M. (1996). Cold Model Investigation of Fluid Flow and Mixing Characteristics by Bottom-blowing in Discontinuous Metallurgical Reactors. *ISIJ International*, 36, 550-553

3. Esaka, H., Itoga, Y., Shinozuka, K., & Tamura, M. (2006). In-situ Observation of Growth and Melting of a Solid Particle Using Transparent Organic Alloys. *ISIJ International*, 46, 6, 864-870

4. Gonzalez, O. J. P., Ramirez-Argaez, M. A., & Conejo, A. N. (2010) Mathematical Modeling of the Melting Rate of Metallic Particles in the Electric Arc Furnace. *ISIJ International*, 50, 1, 9-16
5. Rodriguez-Avila, J., Morales, R. D., Najera-Bastida, A. (2012) Numerical Study of Multiphase Flow Dynamics of Plunging Jets of Liquid Steel and Trajectories of Ferroalloys Additions in a Ladle during Tapping Operations. *ISIJ International*, 52, 5, 814–822
6. Mazumdar, D., Dhandapani, P., Sarvanakumar, R. (2017). Modeling and Optimisation of Gas Stirred Ladle Systems. *ISIJ International*, 57, 2, 286–295
7. Liu, X., Li, B., Zhang, L. & Yang, Y. (2018). Gas–stirring mixing in steelmaking ladles: A review. *Metallurgical and Materials Transactions*, 49, 2, 477–495
8. Duan, C., Zhang, M., Wang, H., & Wang, X. (2019). Effect of superheat and particle size on dissolution and mixing of alloy additions in ladles. *Steel Research International*, 90, 10
9. Wang, Z., Jiang, M., & Zang, J. (2023). Numerical simulation of dissolution kinetics of alloy lumps in steel ladles. *Metals*, 13, 4
10. Zang, Y., & Wang, X. (2023). Effect of ladle geometry and plug configuration on mixing time: A CFD study. *Processes*, 11, 8
11. Sahai, Y., & Guthrie, R. I. L. (2010). Mixing in steelmaking ladles with slag cover. *ISIJ International*, 50, 6, 813–822
12. Smith, J., Brown, A., & Lee, D. (2023). CFD and plant validation of copper alloy dissolution in ladle refining. In AISTech Conference Proceedings 1123–1135
13. Kumar, P., Singh, R., & Patel, S. (2022). Wire feeding of Ca for inclusion modification: Simulation and experiments. *Journal of Metallurgical Engineering*, 11, 2, 145–158
14. Herrera-Ortega, M., Ramos-Banderas, J. A., Hernández-Bocanegra, C. A., & Montes-Rodríguez J.J. (2021). Effect of the Location of Tracer Addition in a Ladle on the Mixing Time through Physical and Numerical Modeling. *ISIJ International*, 61, 8, 2185–2192
15. Alam, Z., & Mazumdar, B. (2022). Fluid Flow and Mixing Phenomena in Mechanically Agitated and Gas Stirred Ladle Systems and Their Comparisons. *ISIJ International*, 62, 1, 112-123
16. Villarreal-Medina, R., Trápaga-Martínez, G., Jardón-Pérez, L. E., Amaro-Villeda, A.M., & Ramírez-Argáez, M.A. (2024). Effect of the Injection Position on Mixing Time in a Centric Gasstirred Ladle Water Model Assisted by a Systematic CFD Study. *ISIJ International*, 64, 14, 2079-2083
17. Samokhvalov, S. E., Piptiuk, V. P., & Grekov, S. V. (2023). The influence of the amount of additive on the hydrodynamics of a metal bath in a ladle. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37
18. Pipyuk, V. P., Samokhvalov, S. E., Logozinsky, I. N. & Grekov, S. V. (2025). The dependence of the state of the metal bath on the amount of ferromanganese used in LF. *Metal and Casting of Ukraine*. 33, 1, 19-25
19. Samokhvalov, S. E., Piptiuk, V. P., & Grekov, S. V. (2025). The influence of the amount of additive on the thermal state of the metal bath in the ladle. *Modern problems of metallurgy, Scientific news*, 28, 201- 212

20. Samokhvalov, S. E., Piptiuk, V. P., & Grekov, S. V. (2025). Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in a ladle when introducing additives with a density different from that of liquid steel. *Collection of abstracts of the All-Ukrainian scientific and methodological conference "Problems of mathematical modeling"* (May 27 - 28, 2025, Kamianske), DSTU, 126

21. Pityuk, V. P., Prokopenko, P. G., Grekov, S. V., Kostyuk, Yu. B., et al. (2014). Preparation of equipment for physical modeling of melt processing processes in a steel ladle. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 28, 161-170.

22. Web-site: <https://bmcmetals.lv/ru/standarty/tablitza-plotnosti-matyerialov-i-koeffitsiyentov.html>

23. News about the scientific research work "Developments of scientific phenomena about the processes of ladle processing of steel with the regulation of batchwise input of additives and features of mixing and thermal mill during degassing of metal. St. reg. number 0118U000081 (2020)

S. V. Grekov^{1,*}, Researcher, ORCID 0000-0003-2849-0999

V. P. Pityuk¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-2915-1756

P. H. Prokopenko¹, Chief Metrologist

S. Ye. Samokhvalov¹, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-7362-213X

Ye. S. Kakushkin¹, Leading Engineer

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

* Corresponding author: gsv4321@i.ua

EXPERIMENTAL STUDIES OF OUT-OF-FURNACE ALLOYING PROCESSES OF MELTED METAL USING COLD PHYSICAL MODELING.

PART 1. MATERIAL SELECTION, PREPARATION, AND TESTING

Abstract. Among the factors influencing out-of-furnace metal melt treatment processes, important considerations include the mixing conditions of the liquid metal bath in a filled steel-pouring ladle by purging it with argon through bottom lances at varying intensities (from 50 to 1100 l/min, depending on production conditions), the grade and type of alloying material used to treat the melt, the temperature of the bath, and several other factors sensitive to the effect of additive material on its efficiency. Recent in-house research using FeMn78 ferromanganese lump metal using mathematical modeling demonstrated the influence of the alloying material quantity on the hydrodynamic and thermal state of the molten metal in 60- and 250-ton ladles during and for a short period after its introduction. It was found that changes in velocity and temperature parameters occur in the melt volumes adjacent to the additive, affecting the melting conditions and distribution of its products in the bath. Based on this, a hypothesis was made regarding the influence of quantitative factors on the efficiency of the alloying process. Given the current lack of reliable values for the velocity parameters of solid alloying additives during their introduction into a liquid metal bath in a ladle during argon purging, depending on gas flow rates and other conditions, and the impossibility of appropriately adapting the developed mathematical model describing the alloying process, it was decided to further study the bath hydrodynamics under relative conditions using cold

physical modeling. This article is devoted to clarifying the preparatory period for the planned physical studies.

Keywords: alloying model materials, tracers, similarity criteria, testing.

For citation: Grekov, S. V., Piptyuk, V. P., Prokopenko, P. H., Samokhvalov, S. Ye., & Kakushkin, Ye. S. (2025). Experimental studies of out-of-furnace alloying processes of melted metal using cold physical modeling. Part 1. Material selection, preparation, and testing. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 148-159. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-08>

Рукопис надійшов до редакції / Received 01.08.2025

Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025