

В.П. Піптюк¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: office.isi@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2915-1756>

С.Є. Самохвалов¹, д-р техн. наук, ст. наук. співр., професор, e-mail: office.isi@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7362-213X>

І.М. Логозинський², директор з технології та якості, e-mail: info@dss.com.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3915-4106>

С.В. Греков¹, наук. співр., e-mail: office.isi@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2849-0999>

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

²ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпрспецсталь» ім. А.М. Кузьміна» (Запоріжжя, Україна)

Залежність стану металевої ванни від кількості застосовуваного феромарганцю на установці ківш-піч

Виробництво сталі передбачає застосування різних феросплавів, які вводяться в значній кількості в рідку металеву ванну, у тому числі, на етапі позапічної обробки. Переважна більшість феросплавів (добавок) подається у шматковому (кусковому) вигляді. Об'єм добавки може змінюватись в межах від 0,05 до декількох десятків кілограмів на тонну сталевого розплаву залежно від технологічних умов виробництва та інших вимог. До теперішнього часу дослідження і розрахунки щодо ефективності використання таких добавок при виробництві сталі базувались на розгляді поведінки їх окремого куска в рідкій металевій ванні. При цьому теоретичний опис гідродинамічного і теплового стану металевої ванни не враховував вплив кількості добавки, що вводиться. В той же час саме вказаний фактор може впливати на точність розрахункових результатів і збільшувати похибку подальшої оцінки ефективності використання коштовних феросплавів, що в значній кількості випадків можуть бути імпортованими. В статті показано доцільність врахування в дослідженні процесів плавлення (розчинення) та засвоєння металевим розплавом твердих добавок такого фактору, як їх кількість, що виявляється значущим серед низки впливових параметрів в реальних складних фізико-хімічних процесах їх використання.

На прикладі кускового феромарганцю марки ФМп78 в якості добавки, який в різній (від 1 до 3 кг/т) кількості вводили у ванну ківша ємністю 60 т при обробці сталі на установці ківш-піч (УКП) з одночасною донною продувкою аргоном в межах 50–200 л/хв через фурму, показано вплив кількості добавки на зміну гідродинамічного і теплового стану рідкої металевої ванни.

Ключові слова: кількість феросплаву, гідродинаміка, тепловий стан, рідка металева ванна.

Вступ. Більшість технологічних операцій при позапічній обробці сталі передбачає використання твердих матеріалів-добавок (феросплавів, шлакоутворюючих і рафінуючих сумішей, науглецевувачів та ін.) з метою доведення металу за хімічним складом, зменшення кількості небажаних шкідливих домішок, забезпечення вузьких меж хімічних елементів у складі, скорочення вмісту неметалевих включень і таке ін.

Застосування сучасного технологічного обладнання на етапі обробки металу в ківші, наприклад установки ківш-піч (УКП), потребує врахування низки факторів впливу для ефективного використання матеріалів-добавок, і насамперед таких, як феросплави. Серед відомих факторів, вплив яких визначено, слід вказати ємність ківша і конфігурацію його ванни [1–3], масу металевого розплаву, хімічний склад сталі і температуру металевого розплаву [4, 5], спосіб введення

добавки, її хімічний та фракційний склад [6, 7], умови перемішування розплаву, інтенсивність і спосіб продування ванни та багато інших [4, 5, 8—11].

Результати сучасних теоретичних досліджень стосовно насамперед гідродинамічного та теплового стану металевого розплаву при його обробці на УКП під час введення добавок у вітчизняних [10—14] і в закордонних [15—19] публікаціях свідчать про однаковість і обмеженість підходу авторів до розгляду цього питання на прикладі поведінки лише окремого куска, який знаходиться у металевій ванні. Слід відмітити, що до цього часу вплив кількісного фактору на стан металеві ванни не розглядався, і приймалися такі умови, що останній не враховувався.

Виходячи з наукового і практичного інтересу до перебігу явищ, які відбуваються в рідкій металевій ванні під час плавлення та засвоєння їх продуктів розплавом, визначення доцільності врахування впливу кількості матеріалу-добавки на стан розплаву в ківші, а також з метою розширення уявлень щодо протікання таких процесів проведено відповідне дослідження на прикладі використання шматкового (кусового) феросплаву під час обробки сталі на УКП.

Мета дослідження. Ціллю роботи є дослідження гідродинамічного і теплового стану рідкої металеві ванни у ківші на УКП в момент введення і протягом першого короткотривалого часу після введення феромарганцю з використанням нової тривимірної математичної моделі, яка враховує динамічний вплив матеріалу, що вводиться, для оцінки впливу кількості матеріалу на стан розплаву в ківші.

Основні матеріали. На розглянутому етапі чисельним методом досліджували процеси гідродинаміки і тепломасообміну в рідкому металевому розплаві. Дослідження виконували з застосуванням розроблених нових тривимірних математичних моделей і програмного продукту [20]. В якості об'єктів дослідження розглядалися ванни сталерозливних ківшів ємністю 60 і 250 т, що відповідно використовуються на ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя) та ПрАТ «Металургійний комбінат «Каметсталь» (м. Кам'янське). На прикладі феромарганцю марки ФМн78 в кількості від 0,2 до 3,0 кг/т дослідили стан металеві ванни. Враховували одночасне продування ванни аргонном з витратою від 50 (200) до 200 (800) л/хв через донну(і) фурму(и) ківша.

В теперішній статті наведено вибіркові результати дослідження стосовно ванни ємністю 60 т.

Результати дослідження і їх обговорення. В якості об'єкта дослідження розглядалась рідка металева ванна ківша циліндричної форми радіусом 1,12 м (середня величина радіуса дна і «дзеркала» — верхньої поверхні рідкого металу) та висотою 2,2 м. Донна продувна фурма розташована на радіусі 0,56 м від вертикальної осі ківша і мала азимутальну координату 80°. Початок азимутальних координат розташований там, де знаходиться кантувач і рахується проти годинникової стрілки. Місце введення добавки розташоване на радіусі 0,934 м та має азимутальну координату 285°. Введення добавки здійснювали з

висоти 3 м.

Спочатку розраховували гідродинамічний стан металеві ванни до встановлення квазістаціонарного характеру перемішування (не змінюється протягом декількох секунд). Розрахунки вели при витратах аргону 50, 100, 150 і 200 л/хв на фурму, які застосовуються на практиці при обробці металу на УКП. Вплив маси добавки, що вводиться, на гідродинамічний стан ванни оцінювали за швидкостями потоків металу (зокрема вертикальної складової) у момент вводу останньої.

На рис. 1 показано картограму у розгортці поля швидкостей на радіусі розташування фурми з витратами аргону 50 і 100 л/хв на фурму. Над фурмою розташовані зони висхідних потоків зі швидкістю до 0,9 м/с в межах витрат аргону, що вивчаються. У зоні падіння добавки, що вводиться, виникають низхідні потоки рідкого металу. Причому найбільші такі швидкості виникають на поверхні металу. При заглибленні ці швидкості зменшуються поки не досягнуть рівня швидкостей до введення добавки. Локалізація впливу обумовлена місцем падіння добавки.

На рис. 2 показано швидкості на радіальному розрізі металеві ванни, який проходить через вертикальну вісь ківша та місце падіння добавки. На рисунку можна побачити наступне: по-перше, чим більше інтенсивність продування металеві ванни, тим більша зона низхідних потоків у глибину ванни; по-друге, при збільшенні маси добавки, збільшується й глибина однакових низхідних швидкостей. Вертикальні складові швидкості на розгортці (рис. 1) і радіальних розрізах (рис. 2) збігаються, це свідчить про тривимірність зображення розрахункової області. Чим більша маса добавки, що вводиться, тим більші екстремальні (максимальні низхідні) швидкості.

Встановлено, що екстремальні низхідні складові швидкості потоків металу не відрізняються одна від одної при різних витратах аргону: ≈ 107 см/с – 1 кг/т, ≈ 152 см/с – 2 кг/т, ≈ 186 см/с при масі добавки 3 кг/т (рис. 3).

Дослідження теплового стану металевого розплаву виконували з врахуванням наведених висхідних даних. Початкові умови введення добавок, які відповідають промисловим умовам, наступні: температура металевого розплаву — 1627 °С. Теплові втрати через відкриту поверхню шлаку з оголеним металом та стінку і днище сталерозливного ківша призводять до зниження температури шлако-металевого розплаву приблизно на 1,6 °С/хв. Температура феросплаву, що вводиться, 27 °С.

Попередньо розраховували гідродинамічний стан металеві ванни на 1,5; 3,0; 4,5 с після введення порції феросплаву [20]. Вибір такого ж досить короткого терміну (до 4,5 секунди) вимірювання теплового стану металеві ванни обумовлений швидкоплинністю процесу охолодження рідкого металу у контактній зоні введення добавки (можливо до утворення твердої шлакової і металеві скоринки на поверхні окремих гранул матеріалу, що вводиться) з одночасним їх нагріванням.

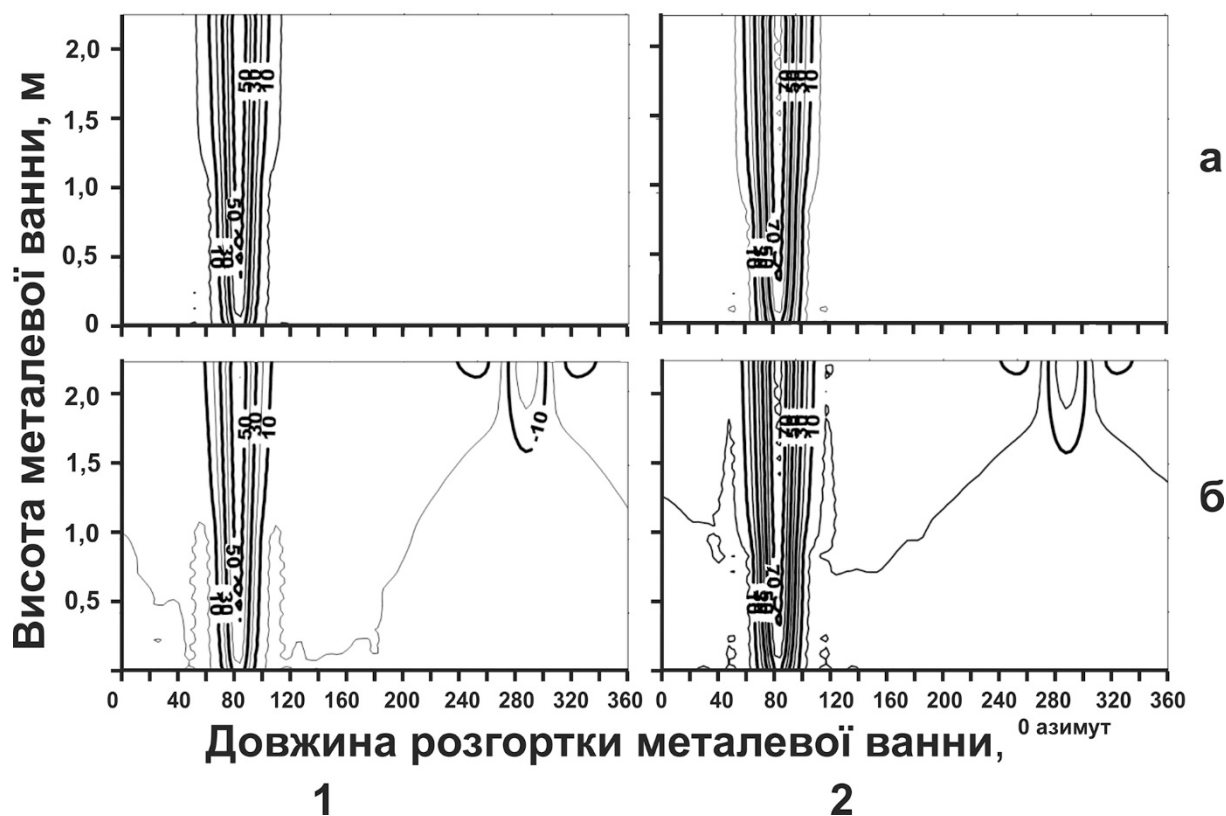


Рис. 1. Картограма вертикальної складової швидкості металевих потоків (см/с) у розгортці ванни ківша при обробці на УКП. Витрати аргону 50 л/хв (1) і 100 л/хв (2). Маса добавки 0 (а) і 3 кг/т (б)

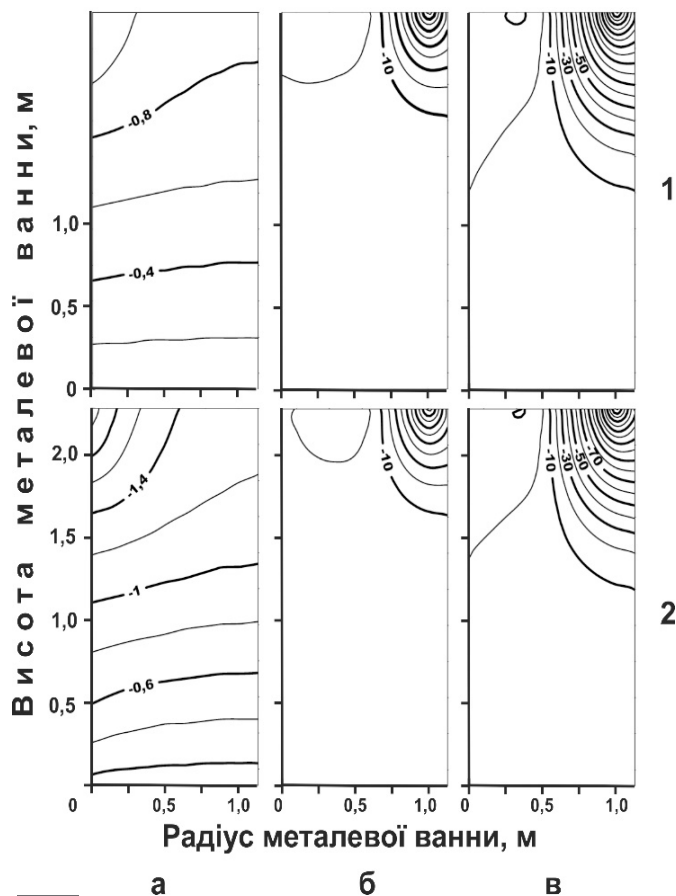


Рис. 2. Картограма вертикальної складової швидкостей потоків (см/с) при обробці на УКП у радіальному розрізі ковшової ванни, що розташований у місці введення добавки. Умови продування відповідно до рис. 1. Маса добавки 0 (а); 1 (б); 3 (в) кг/т

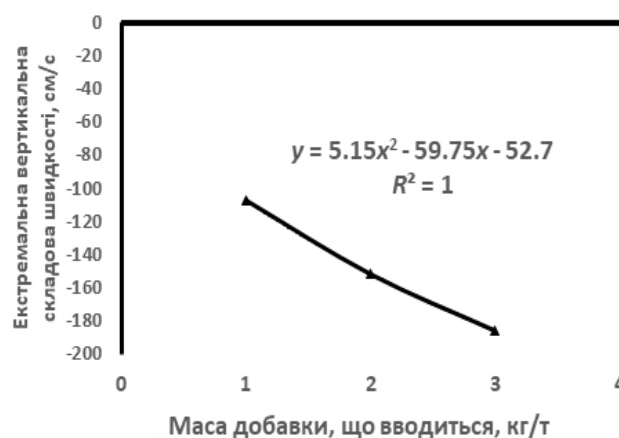


Рис. 3. Екстремальна вертикальна складова швидкості низхідних потоків металу при обробці на УКП залежно від маси введеної добавки

На рис. 4 показано картограму теплового стану рідкої металеві ванни з витратами аргону 100 л/хв на фурму в момент введення добавки (0 с) і через 1,5 та 4,5 с. Розрахунками встановлено мінімальну температуру теплового стану металеві ванни при різних витратах аргону. Вона становить $\approx 1568^\circ\text{C}$, $\approx 1512^\circ\text{C}$, $\approx 1454^\circ\text{C}$ в момент введення добавки (0 с); $\approx 1575^\circ\text{C}$, $\approx 1524^\circ\text{C}$, $\approx 1477^\circ\text{C}$ (через 1,5 с); $\approx 1586^\circ\text{C}$, $\approx 1545^\circ\text{C}$, $\approx 1512^\circ\text{C}$ (через 4,5 с) після введення останньої з питомою масою 1; 2 і 3 кг/т відповідно. При такій температурі утворюється скоринка шлаку і металу на поверхні окремих шматків добавки, що обумовить

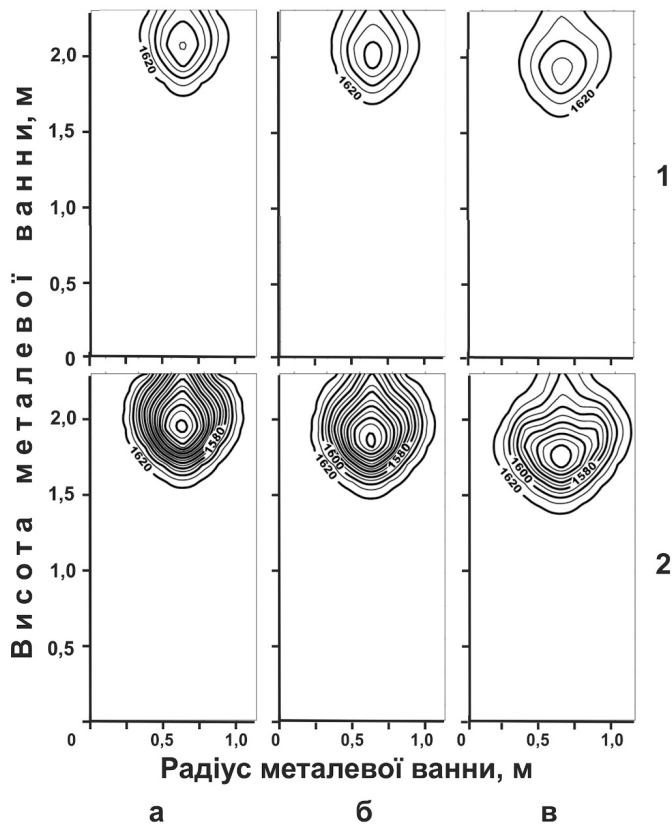


Рис. 4. Картограма теплового стану металевого розплаву навколо добавки у радіальному розрізі рідкої ванни ківша. Витрати аргону 100 л/хв. Маса добавки 1 (1); 3 кг/т (2). Момент введення — 0 с (а), після введення добавки через: 1,5 (б); 4,5 с (в)

більш складні умови плавлення і, можливо, змінить рівень засвоєння.

На рис. 5 представлено екстремальні (мінімальні) температури в момент введення добавки та протягом 4,5 с перебування добавки в розплаві. Треба зазначити, що при однакових питомих витратах добавки, що вводиться, незалежно від витрат аргону процес нагрівання рідкого і твердого металу проходить з однаковою інтенсивністю (криві лінії на графіках збігаються). Максимальні температури металу на рис. 5 однакові (температура початкових умов 1627 °С). Це обумовлено швидкоплинністю процесу, що розглядається.

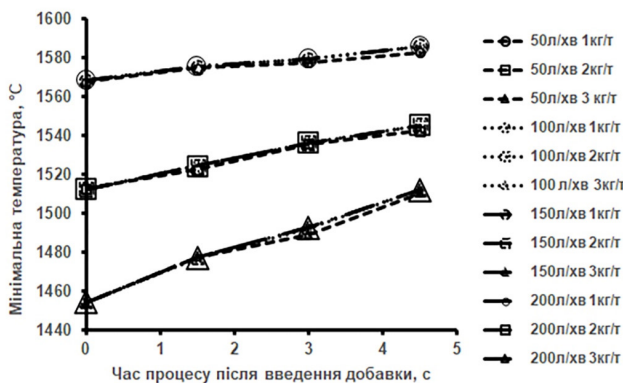


Рис. 5. Мінімальні температури в зоні контакту «розплав-добавка» у ківші під час введення (0 с) та після введення добавки через 1,5; 3,0 та 4,5 с

Висновки

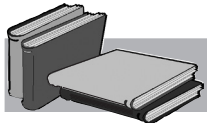
1. З використанням розроблених нових тривимірних математичних моделей гідродинаміки та тепло-, масопереносу у розплаві в ківші ємністю 60 т на УКП під час введення різної кількості (1,0—3,0 кг/т) феромарганцю марки ФМн78 досліджено стан рідкої металевої ванни при різних режимах її продування, що дозволило зробити оцінку впливу кількості феросплаву на відповідні процеси.

2. Встановлено, що хоча гідродинаміка у ківші в цілому (в середньому) не змінюється суттєво при подачі феромарганцю, проте у місці його введення вона змінюється суттєво на якісному рівні, в цьому місці змінюються напрямки і величини потоків середовища, що визначає розташування добавки в розплаві і його подальшу динаміку після введення.

3. Оскільки з точки зору засвоєння твердих добавок важлива гідродинамічна картина саме в місці їх знаходження, врахування динамічного впливу матеріалів, що вводяться, є суттєвим для визначення раціональних режимів їх введення і ефективності використання.

4. Визначено вплив маси введенного феромарганцю на тепловий стан у контактній зоні шлако-металевого розплаву. Показано, що питома маса феросплаву впливає на градієнт температур рідкого металу при введенні останнього та протягом часу (4,5 с), що вивчався.

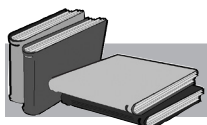
5. У зв'язку з відсутністю на теперішній час можливості перевірити на адекватність отримані результати чисельних досліджень прийнято рішення провести додаткове дослідження для визначення швидкісних параметрів потоків у металевому розплаві в ківші під час введення твердих добавок феросплавів методом холодного фізичного моделювання.



ЛІТЕРАТУРА

1. Пиптюк В.П., Логозинский И.Н., Греков С.В. Перемешивание расплава в сталеразливочном ковше с усилением футеровки в бойной части // Материалы IX международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании» 31 мая—7 июня 2013 г. Технический университет. Варна, Болгария. Т. 2. С. 109—112.
2. Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Логозинский И.Н. и др. Влияние усиления футеровки в бойной части сталеразливочного ковша на параметры перемешивания расплава. *Металлурге*. 2013. № 7. С. 29—34.
3. Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Греков С.В. и др. Численное изучение влияния переменных факторов на перемешивание расплава на установке ковш-печь средней мощности // Міждержавна науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання» (19—21 травня 2010 р., м. Дніпродзержинськ). Тези доповідей. Дніпродзержинськ, 2010. С. 81—83.
4. Вихлевщук В.А., Огурцов А.П., Павлюченков И.А. и др. Математическое моделирование процессов внеагрегатной обработки стали. Киев: ИСМО МО Украины, 1997. 151 с.
5. Вихлевщук В.А., Харахулах В.С., Бродский С.С. Ковшевая доводка стали. Днепропетровск: Системные технологии, 2000. 190 с.
6. Казачков И.П. Легирование стали. Киев: Техника, 1982. 120 с.
7. Morrison W.B. The strengthening of carbon steels by small niobium additions. *Iron and Steel*. 1964. Vol. 37. № 9. P. 390—395.
8. Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Ковура А.Б. и др. Исследование влияния вариантов компоновки донного продувочного узла на перемешивание расплава аргоном на двухпозиционной установке ковш-печь мощностью 45 МВ·А. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. № 7. С. 213—215.
9. Пиптюк В.П., Крикент И.В., Самохвалов С.Е., Греков С.В., Кабаков Д.Ю. Влияние электромагнитных сил на перемешивание ванны установки ковш-печь переменного тока. *Металл и литье Украины*. 2014. № 8. С. 3—5.
10. Носков А.С., Некрасов А.В., Жучков В.И. и др. Математическая модель плавления куска ферросплава при циркуляционном движении жидкого металла в ковше. *Расплавы*. 1990. № 5. С. 113—120.
11. Лозовая Е.Ю., Некрасов А.В., Жучков В.И. Изучение влияния технологических факторов на время плавления кремнистых ферросплавов в жидком металле. *Расплавы*. 2001. № 3. С. 10—12.
12. Охотский В.Б. Растворение ферросплавов при ковшевом легировании стали. *Процессы литья*. 2003. № 2. С. 3—6.
13. Заякин О.В., Жучков В.И., Лозовая Е.Ю. Время плавления никельсодержащих ферросплавов в стали. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 2007. № 5. С. 13—16.
14. Лозовая Е.Ю., Жучков В.И., Шешуков О.Ю. Определение продолжительности плавления ферросплавов системы Fe-Al в железоуглеродистом расплаве. *Электрометаллургия*. 2007. № 1. С. 13—15.
15. Iguchi M., Tani J., Uemura T., Morita Z. Flow Phenomena and Heat Transfer around a Sphere Submerged in Water Jet and Bubbling Jet. *ISIJ International*. 1989. Vol. 29. Iss. 8. P. 658—665. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.29.658>
16. Iguchi M., Takeuchi H., Kawabata H., Uemura T., Morita Z. The Melting Process of Rectangular Prisms Immersed in Bubbling Jet in a Cylindrical Vessel. *ISIJ International*. 1991. Vol. 31. Iss. 1. P. 46—52. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.31.46>
17. Esaka H., Itoga Y., Shinozuka K., Tamura M. In-situ Observation of Growth and Melting of a Solid Particle Using Transparent Organic Alloys. *ISIJ International*. 2006. Vol. 46. Iss. 6. P. 864—870. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.864>
18. González O.J.P., Ramírez-Argáez M.A., Conejo A.N. Mathematical Modeling of the Melting Rate of Metallic Particles in the Electric Arc Furnace. *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. Iss. 1. P. 9—16. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.9>
19. Rodríguez-Avila J., Morales R.D., Nájera-Bastida A. 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*. 2012. Vol. 52. Iss. 5. P. 814—822. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.814>
20. Самохвалов С.Е., Пиптюк В.П., Греков С.В. Вплив кількості добавки на гідродинаміку металевої ванни у ківші. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 231—245. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-231-245>

Надійшла 03.04.2025



REFERENCES

1. Pipyuk, V. P., Logozinsky, I. N., & Grekov, S. V. (2013). Peremeshivaniye rasplava v stalerazlivochnom kovshe s usileniyem futerovki v boynoy chasti [Melt mixing in a steel-pouring ladle with lining reinforcement in the chopper part]. *Materialy IX mezhdunarodnoy konferentsii "Strategiya kachestva v promyshlennosti i obrazovanii"* 31 maya – 7 iyunya 2013 g. Tekhnicheskiiy universitet – g. Varna, Bolgariya - Proceedings of the IX International Conference "Quality Strategy in Industry and Education" May 31 – June 7, Technical University of Varna, Bulgaria, vol. 2, 109-112 [in Russian].

2. Pityuk, V. P., Samokhvalov, S. E., Logozinsky, I. N. et al. (2013). Vliyanie usileniya futerovki v boynoy chasti stalerazlivochnogo kovsha na parametry peremeshvaniya rasplava [Effect of lining reinforcement in the steel-pouring ladle head on melt mixing parameters]. *Metallurg – Metallurgist*, 7, 29-34 [in Russian].
3. Pityuk, V. P., Samokhvalov, S. E., Grekov, S. V. et al. (2010). Chislennoye izucheniye vliyaniya peremennykh faktorov na peremeshvaniye rasplava na ustanovke kovsh-pech sredney moshchnosti [Numerical study of the influence of variable factors on melt mixing in a medium-power ladle-furnace unit]. Mízhderzhavna naukovo-metodichna konferentsiya "Problemi matematichnogo modelyuvannya" (19-21 travnya 2010 r., m. Dniproderzhinsk). Tezi dopovídey. Dniproderzhinsk - International scientific and methodological conference "Problems of mathematical modeling" (19-21 May 2010, Dniproderzhinsk). Theses of reports. Dniproderzhinsk, 81-83 [in Russian].
4. Vikhlevshchuk, V. A., Ogurtsov, A. P., Pavlyuchenkov, I. A. et al. (1997). Matematicheskoye modelirovaniye protsessov vneagregatnoy obrabotki stali [Mathematical modeling of off-site steel processing processes]. Kyiv: ISMO MO Ukrainy [in Russian].
5. Vikhlevshchuk, V. A., Kharakhulakh, V. S., & Brodsky, S. S. (2000). Kovshevaya dovodka stali [Ladle finishing of steel]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii [in Russian].
6. Kazachkov, I. P. (1982). Legirovaniye stali [Alloying of steel]. Kyiv: Tekhnika [in Russian].
7. Morrison, W. B. (1964). The strengthening of carbon steels by small niobium additions. *Iron and Steel*, 37(9), 390-395.
8. Pityuk, V. P., Samokhvalov, S. E., Kovura, A. B. et al. (2010). Issledovaniye vliyaniya variantov komponovki donnogo produvochnogo uzla na peremeshvaniye rasplava argonom na dvukhpozitsionnoy ustanovke kovsh-pech moshchnostyu 45 MV-A [Study of the influence of bottom blowdown unit layout options on melt mixing with argon in a two-position ladle-furnace unit with a capacity of 45 MV-A]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost - Metallurgical and mining industry*, (7), 213-215 [in Russian].
9. Pityuk, V. P., Krykent, I. V., Samokhvalov, S. E., Grekov, S. V., & Kabakov, D. Yu. (2014). Vliyanie elektromagnitnykh sil na peremeshvaniye vanny ustanovki kovsh-pech peremennogo toka [The influence of electromagnetic forces on mixing bath ladle furnace ac]. *Metal and Casting of Ukraine*, (8), 3-5 [in Russian].
10. Noskov, A. S., Nekrasov, A. V., Zhuchkov, V. I. et al. (1990). Matematicheskaya model plavleniya kuska ferrosplava pri tsirkulyatsionnom dvizhenii zhidkogo metalla v kovshe [Mathematical model of melting of a piece of ferroalloy during circulation movement of liquid metal in a ladle]. *Raspavy – Melts*, (5), 113-120 [in Russian].
11. Lozovaya, E. Yu., Nekrasov, A. V., & Zhuchkov, V. I. (2001). Izucheniye vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov na vremya plavleniya kremnistykh ferrosplavov v zhidkom metalle [Study of the influence of technological factors on the melting time of silicon ferroalloys in liquid metal]. *Raspavy – Melts*, (3), 10-12 [in Russian].
12. Okhotsky, V. B. (2003). Rastvoreniye ferrosplavov pri kovshevom legirovanii stali [Dissolution of ferroalloys during ladle alloying of steel]. *Casting processes*, (2), 3-6 [in Russian].
13. Zayakin, O. V., Zhuchkov, V. I., & Lozovaya, E. Yu. (2007). Vremya plavleniya nikelsoderzhashchikh ferrosplavov v stali [Melting time of nickel-containing ferroalloys in steel]. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya - News of higher education institutions. Ferrous metallurgy*, (5), 13-16 [in Russian].
14. Lozovaya, E. Yu., Zhuchkov, V. I., & Sheshukov, O. Yu. (2007). Opredeleniye prodolzhitelnosti plavleniya ferrosplavov sistemy Fe-Al v zhelezouglerodistom rasplave [Determination of the melting time of ferroalloys of the Fe-Al system in an iron-carbon melt]. *Elektrometallurgiya – Electrometallurgy*, (1), 13-15 [in Russian].
15. Iguchi, M., Tani, J., Uemura, T., & Morita, Z. (1989). Flow Phenomena and Heat Transfer around a Sphere Submerged in Water Jet and Bubbling Jet. *ISIJ International*, 29(8), 658-665. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.29.658>
16. Iguchi, M., Takeuchi, H., Kawabata, H., Uemura, T., & Morita, Z. (1991). The Melting Process of Rectangular Prisms Immersed in Bubbling Jet in a Cylindrical Vessel. *ISIJ International*, 31(1), 46-52. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.31.46>
17. 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. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.864>
18. González, O. J. P., Ramírez-Argáez, 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. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.9>
19. Rodríguez-Avila, J., Morales, R. D., & Nájera-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. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.814>
20. Samokhvalov, S. Ye., Pityuk, V. P., & Grekov, S. V. (2023). Vplyv kilkosti dobavky na hidrodynamiku metalevoyi vanny u kivshi [Influence of the quantity of the additive on the hydrodynamics of the metal bath in the ladle]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, (37), 231-245. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-231-245> [in Ukrainian].

Received 03.04.2025

Summary

V.P. Pipyuk¹, PhD (Engin.), Senior Research Scientist,
e-mail: office.isi@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2915-1756>
S.Ye. Samokhvalov¹, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Professor,
e-mail: office.isi@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7362-213X>
I.M. Logozinskiy², Director of Technology and Quality,
e-mail: info@dss.com.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3915-4106>
S.V. Grekov¹, Research Scientist, e-mail: office.isi@nas.gov.ua,
<https://orcid.org/0000-0003-2849-0999>

¹*Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)*

²*PrJSC "Electrometallurgical Works "DNIPROSPETSSTAL" named after A.M. Kuzmin" (Zaporizhzhia, Ukraine)*

Dependence of the State of the Metal Bath on the Amount of Ferromanganese Used in the Ladle-Furnace Unit

Steel production involves the use of various ferroalloys, which are introduced in significant quantities into the liquid metal bath, including at the stage of extra-furnace treatment. The vast majority of ferroalloys (additives) are fed in lump form. The volume of the additive can vary from 0.05 to several tens of kilograms per ton of molten steel, depending on the technological conditions of production and other requirements. Until now, research and calculations on the efficiency of using such additives in steel production were based on the consideration of the behavior of their individual piece in the liquid metal bath. At the same time, the theoretical description of the hydrodynamic and thermal state of the metal bath did not take into account the effect of the amount of the additive introduced. At the same time, it is this factor that can affect the accuracy of the calculated results and increase the error of further assessment of the efficiency of using valuable ferroalloys, which can be imported in significant quantities. The article shows the feasibility of taking into account such a factor as the amount of solid additives in the study of melting (dissolution) processes and assimilation of solid additives by the metal melt, which turns out to be significant among a number of influential parameters in real complex physical and chemical processes of their use.

Using the example of lump ferromanganese grade FeMn78 as an additive, which was introduced in different quantities (from 1 to 3 kg/t) into the bath of a ladle with a capacity of 60 tons during steel processing in a ladle-furnace unit (LFU) with simultaneous bottom blowing with argon within 50-200 l/min through a tuyere, the effect of the amount of additive on the change in the hydrodynamic and thermal state of the liquid metal bath is shown.

Keywords

Amount of ferroalloy, hydrodynamics, thermal state, liquid metal bath.