

О.В. Харченко¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, e-mail: odds@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3717-3872>

В.Л. Ковальов², заступник начальника мартенівського цеху з технології та якості,
e-mail: vitaliy.kovalev@zaporizhstal.com

Н.В. Адамович², магістрант, e-mail: n.adamowich28@gmail.com

¹Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

²Публічне акціонерне товариство «Запоріжсталь» (Запоріжжя, Україна)

Удосконалення системи контролю сталеплавильного виробництва «Майстер»

У мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь» проведено комплекс робіт з удосконалення і розширення функціональних можливостей системи контролю сталеплавильного виробництва (СКСВ) «Майстер», що спочатку була призначена для оптимізації розкислення-легування сталі на випуску з печі в ківш та ведення електронного журналу експрес-аналізів хімічного складу рідкої сталі. До системи додано: функцію контролю кількості та якості чавуну, що надходить на кожну плавку; модуль контролю параметрів плавки в реальному масштабі часу з оперативним прогнозом по температурі рідкого металу та вмісту в ньому вуглецю, починаючи від прогрівання та закінчуючи випуском із печі; модуль інерціальної підтримки траєкторії плавки за умови тимчасової відсутності оперативних даних про миттєву витрату кисню і положення кисневих фурм. Розроблено термодинамічну модель сталеплавильної ванни, що включає металеву, шлакову та газову фази, яка дозволяє прогнозувати основні параметри плавки до початку фактичних вимірів температури та експрес-аналізів металу, а далі коригувати прогнозні траєкторії за даними фактичних вимірів. По кожному періоду плавки (прогрів, заливка чавуну, плавлення, доведення, випуск) відображаються: прогноз та фактичні виміри температури металу; прогноз та фактичні виміри вмісту вуглецю в металі; фактичні виміри вмісту марганцю, кремнію, фосфору і сірки в металі; миттєві витрати кисню та природного газу на фурми; дані позиційного датчика про положення кисневих фурм. Також вказані обмежувальні зони миттєвої витрати кисню відповідно до норм технологічних карт. Дискретність оновлення даних може змінюватись і за замовчуванням становить 30 с. Розроблено схему і термодинамічну модель взаємодії сталеплавильної ванни з високотемпературною реакційною зоною навколо струменя кисню. Удосконалено алгоритм нелінійного симплекс-методу розв'язання задачі оптимізації розкислення-легування сталі на випуску з печі. Розширено список доступних матеріалів для легування, додано матеріали для шихтування. Проведено моніторинг СКСВ «Майстер» за 44 плавками. Заплановано заходи щодо подальшого вдосконалення СКСВ «Майстер» у напрямі інтеграції із системою управління підприємством.

Ключові слова: параметри плавки; прогноз температури металу; система контролю; система «метал-шлак-газ»; сталь; термодинамічна модель.

Вступ. Систему контролю сталеплавильного виробництва «Майстер» було впроваджено в мартенівському цеху металургійного комбінату ПАТ «Запоріжсталь» у 2013 році [1]. Головним її призначенням були оптимізація розкислення-легування сталі на випуску з печі в ківш та ведення електронного журналу експрес-аналізів хімічного складу рідкої сталі. Електронний журнал експрес-аналізів був необхідним елементом працюючої системи, оскільки внесені до нього дані про поточний хімічний склад рідкої сталі, у тому числі перед випуском з печі, безпосередньо використовувалися для оптимізації кількостей феросплавів, вторинного алюмінію та коксую, необхідних для одержання

готової сталі заданого складу відповідно до стандартів або технічних умов. Критерієм оптимізації була мінімальна сумарна вартість матеріалів, що використовуються для розкислення-легування сталі. Оптимізацію проводили за допомогою нелінійного симплекс-методу та термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ», що описує кінцевий стан сталерозливного ковша з металом, покритим шаром окисленого пічного шлаку [2—6]. У розрахунках використовували диференціальні коефіцієнти засвоєння, одержані з термодинамічної моделі її лінеаризацією методом неявного диференціювання функції багатьох змінних [7].

Постановка задачі. У роботі ставили завдання

розширити функціональні можливості системи контролю сталеплавильного виробництва «Майстер» з урахуванням оперативних даних про витрату кисню та природного газу на печах та даних про поточне положення кисневих фурм, а також забезпечити при цьому прогноз температури та хімічного складу сталеплавильної ванни у всіх періодах плавки, у тому числі в рідкому періоді.

Матеріали та методи. Методи дослідження: нелінійний симплекс метод; термодинамічний аналіз системи «метал-шлак-газ».

Результати. Щоб повною мірою врахувати оперативні дані, що надаються базами даних ПАТ «Запоріжсталь», було розроблено термодинамічну модель сталеплавильної ванни, що включає металеву, шлакову та газову фази. Модель дозволяє прогнозувати основні параметри плавки до початку фактичних вимірювань температури та експрес-аналізів металу, і далі коригувати прогнозні траєкторії за даними фактичних вимірювань. Відмінною особливістю розробленої моделі є точний облік високотемпературної реакційної зони (ВРЗ), що виникає при взаємодії струменя кисню та рідкої металевої ванни [8–9]. У роботі застосовувалися також принципи оптимального проєктування та прогнозування параметрів плавки сталі, розроблені стосовно киснево-конвертерного виробництва [10].

На рис. 1 показано загальну схему взаємодії сталеплавильної ванни з ВРЗ навколо струменя кисню, що вдувається, яка прийнята в якості робочої гіпотези для побудови алгоритму прогнозних розрахунків.



Рис. 1. Схема взаємодії сталеплавильної ванни з високотемпературною реакційною зоною

Відповідно до цієї схеми основні матеріали (чавун, брухт, вапняк) вводяться в робочий об'єм сталеплавильної ванни. Кисень подається через фурми та, взаємодіючи з рідким металом, утворює стійку зону ВРЗ, яка різко відрізняється від обсягу основного металу. Для ВРЗ характерна температура понад 2000 °С та надзвичайно окислений метал. У цій зоні відбувається окислення домішок металу, насамперед вуглецю, з утворенням переважно СО та шлакової фази. Тут же через високу температуру відбувається випаровування заліза з подальшим його окисненням киснем повітря та конденсацією в бурий дим. Слід зазначити, що газ, у великій кількості, що утворюється у ВРЗ, залишає робочий простір печі при тому, що

частина тепла газу залишається в системі.

ВРЗ, віддаючи переокислений метал у сталеплавильну ванну, є джерелом кисню для останньої, що призводить до додаткового утворення газової фази при окисненні вуглецю.

Шлак, що утворюється у ВРЗ, повністю залишається у системі. Цей шлак перенасичений оксидами заліза, частина з яких відновлюється при взаємодії зі сталеплавильною ванною.

Незважаючи на те, що дана схема є найпростішою, спроби її ускладнення (деталізації) шляхом додавання додаткових ВРЗ не призводили до адекватного поліпшення роботи алгоритму системи «Майстер».

На рис. 2 наведено скриншот удосконаленої головної форми СКБВ «Майстер».

МАЙСТЕР - режим пошуку плавки														
Піч 1	Піч 2	Піч 5	Піч 6	Піч 7	Піч 8	Піч 10	Піч 12							
Пл. 0141703	Квш 1	План	Факт	Вибір						26.06.24				
Випуск - факт	Сталь S235JR	S235JR	S235JR							11:46:37				
14.06.24 11:00	Призн. ЕКСР	ЕКСР	ЕКСР	ЕКСР						Майстер				
	ГОСТ	EN 10025:2004	EN 10025:2004							Балаш				
Піч	11:05	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	O	t°C	Прим	
Проба	0,057	0,051	0,01	0,022	0,012	0,03	0,01	0,01	0,205	608	1645			
Прогноз	0,05	0,05		0,022						608	1645			
Макс	0,17	1,40	0,30	0,035	0,035	0,30	0,30	0,30	0,10				План	
Мін	0,08	0,32											S235JR	
Прогноз	0,11	0,41	0,019	0,022						0,012	1572		241,9 т	
Факт	0,12	0,41	0,014	0,021	0,013	0,03	0,01	0,01			1528		Факт	
Матеріали FeMn SiMn FeSi Кокс AB-87 AIA7 Окал. Оптим Витрата Графік														
Оптим 1370 250 Проплавити Випуск														
Факт 1400 300 120 Поточна плавка Чавун														
Режим відображення прогнозу у відповідності до режиму матеріалів Гам: 200 кг Т: 1420C 55753														

Рис. 2. Головна форма системи контролю сталеплавильного виробництва «Майстер» — оптимізація легування сталі S235JR (плавка № 0141703)

На наведеному скриншоті за допомогою випадального меню можна вибрати будь-яку плавку за останні 3 доби. За необхідності для пошуку інформації про плавку за будь-який інший період можна використовувати спеціальну форму, яка активується натисканням кнопки «А». У режимі пошуку плавки можна переглядати інформацію про будь-яку підмножину плавки за весь час роботи СКБВ «Майстер» з використанням простих та складних критеріїв пошуку.

Рядок матеріалів є багатофункціональним елементом форми, що складається з полів редагування та відображення мас матеріалів у кілограмах. В результаті оптимізації у цих полях відображається оптимальний набір матеріалів, які є рекомендацією для майстра. При ручному введенні або редагуванні мас матеріалів відбувається автоматичне віртуальне розкислення металу в ковші з відображенням відповідного прогнозу у таблиці хімічних складів.

За допомогою кнопки «Витрата» включається відображення траєкторії поточної плавки в координатах «параметри — час». Для поточної (не випущеної) плавки часова координата відображається у реальному масштабі. В якості поточних параметрів плавки використовуються:

- температура сталеплавильної ванни, °С (жирна червона лінія);
- разові виміри фактичної температури металу, °С (червоні кружки);

- вміст вуглецю в металі, $\% \cdot 10^3$ (жирна чорна лінія);
- миттєва витрата кисню, $\text{м}^3/\text{г}$ (жирна синя лінія);
- миттєва витрата природного газу, $\text{м}^3/\text{г}$ (жирна зелена лінія);
- середньозважене положення трьох фурм, $\text{м} \cdot 10^3$ (помаранчева лінія);
- норми технологічних карт щодо витрати і кисню, $\text{м}^3/\text{г}$ (горизонтальні зелені та червоні лінії);
- дані експрес-аналізу проб металу на вміст вуглецю ($\% \cdot 10^3$), марганцю, кремнію ($\% \cdot 10^4$), фосфору і сірки ($\% \cdot 10^5$) (квадратики відповідно чорного, фіолетового, сірого, рожевого та жовтого кольорів);
- дані разових експрес-вимірів температури за допомогою приладового комплексу Celox, $^{\circ}\text{C}$ (червоні кружки з синьою заливкою);
- дані разових експрес-вимірів окисленості та вмісту вуглецю за допомогою приладового комплексу Celox, $^{\circ}\text{C}$ (чорні квадратики з синьою заливкою).

Крім того, в розширеному (інженерному) режимі доступні також траєкторії плавки за масою металу, шлаку і газу, вмісту оксидів заліза в шлаку, температурі ВРЗ, втрат заліза шляхом випаровування у ВРЗ тощо.

Скриншот типової форми з відображенням фактичних та прогнозних траєкторій плавки наведено на рис. 3.

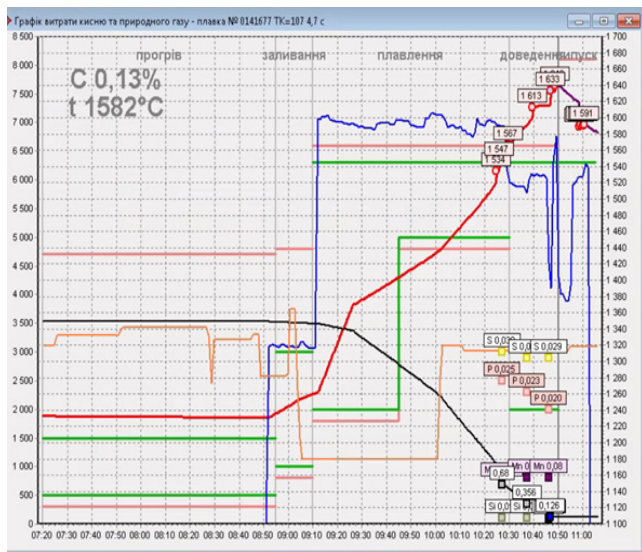


Рис. 3. Форма системи контролю сталеплавильного виробництва «Майстер» — фактичні та прогнозні траєкторії основних параметрів плавки № 0141677

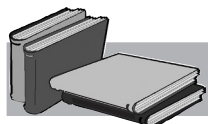
Дискретність оновлення даних форми може змінюватись і за замовчуванням становить 30 с. По кожному періоду плавки (прогрів, заливка чавуну, плавлення, доведення, випуск) відображаються обмежувальні зони витрати кисню відповідно до норм технологічної карти № 107.

Висновки

У ході виконання комплексу робіт з удосконалення системи контролю сталеплавильного виробництва

«Майстер» було отримано такі результати:

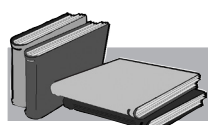
1. Розроблено термодинамічну модель сталеплавильної ванни, що включає металеву, шлакову та газову фази. Модель дозволяє прогнозувати основні параметри плавки до початку фактичних вимірювань температури та експрес-аналізів металу, а далі коригувати прогнозні траєкторії за даними фактичних вимірювань.
2. Розроблено схему взаємодії сталеплавильної ванни з високотемпературною реакційною зоною навколо струменя кисню, що вдувається.
3. Удосконалено алгоритм розв'язання задачі оптимізації розкислення-легування сталі на випуску з печі.
4. Розширено перелік доступних матеріалів для легування. У систему додані матеріали для шихтування плавки.
5. Розширено можливості моніторингу якості та кількості чавуну, що надходить до мартенівського цеху.
6. Запущено модуль контролю основних параметрів плавки в реальному масштабі часу з оперативним прогнозом по температурі рідкого металу та вмісту в ньому вуглецю, починаючи від прогріву та закінчуючи випуском з печі.
7. В систему впроваджено модуль інерціальної підтримки траєкторії плавки за умови тимчасової відсутності оперативних даних про миттєву витрату кисню і положення кисневих фурм.
8. Заплановано заходи щодо подальшого вдосконалення СКВ «Майстер» у напрямі інтеграції із системою управління підприємством.



ЛІТЕРАТУРА

1. Харченко А. В. Оптимизация процесса раскисления стали с применением аппаратно-программного комплекса «Мастер». *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2015. Вип. 1 (33). С. 19—22.
2. Харченко А. В., Синяков Р. В. Термодинамическая модель многокомпонентной жидкой шлаковой фазы. *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2016. Вип. 2 (36). С. 16—22.
3. Харченко А. В. Теплоемкость и другие термодинамические функции смешения многокомпонентной конденсированной фазы. *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2012. Вип. 2 (27). С. 20—28.
4. Харченко А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом энтальпийного теплового баланса. *Металл и литье Украины*. 2005. № 6. С. 13—17.
5. Харченко А. В. Оптимизация внепечной обработки и легирования стали на основе решения обратной задачи термодинамического анализа. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 8 (228). С. 115—120.
6. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Корзун Е. Л. Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 8 (228). С. 135—139.
7. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Довгонюк С. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 10. С. 131—137.
8. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Термодинамічний аналіз фізико-хімічних процесів в високотемпературній реакційній зоні рідкої сталеплавильної ванни. Частина 1. Системи залізо-кисень, залізо-кисень-вуглець. *Метал та лиття України*. 2022. Том 30. № 1 (328). С. 28—34. <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/3>
9. Kharchenko O. V. Thermodynamic analysis of physical and chemical processes in the high-temperature reaction zone of a liquid steelmaking bath. Part 2. Removal of impurities. *Метал та лиття України*. 2022. Том 30. № 4 (331). С. 30—35. <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/39>
10. Синяков Р. В., Харченко А. В. Автоматизированное проектирование и управление кислородно-конвертерной плавкой. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2018. № 3. С. 14—26.

Надійшла 28.11.2024



REFERENCES

1. Kharchenko, A. V. (2015). Optimizatsiya protsessa raskisleniya stali s primeneniem apparatno-programmnogo kompleksa "Master" [Optimization of the steel deoxidation process using the hardware and software complex "Master"]. *Zbirnyk naukovykh prats ZDIA. Metalurhiia*, 1(33), 19-22 [in Russian].
2. Kharchenko, A. V., & Sinyakov, R. V. (2016). Termodinamicheskaya model mnogokomponentnoy zhidkoy shlakovoy fazyi [Thermodynamic model of a multicomponent liquid slag phase]. *Zbirnyk naukovykh prats ZDIA. Metalurhiia*, 2(36), 16-22 [in Russian].
3. Kharchenko, A. V. (2012). Teploemkost i drugie termodinamicheskie funktsii smesheniya mnogokomponentnoy kondensirovannoy fazyi [Heat capacity and other thermodynamic functions of mixing a multicomponent condensed phase]. *Zbirnyk naukovykh prats ZDIA. Metalurhiia*, 2(27), 20-28 [in Russian].
4. Kharchenko, A. V. (2005). Termodinamicheskoe modelirovanie sistemy "metall-shlak-gaz" s uchetom entalpiynogo teplovogo balanssa [Thermodynamic modeling of the "metal-slag-gas" system taking into account the enthalpy heat balance]. *Metal and Casting of Ukraine*, (6), 13-17 [in Russian].
5. Kharchenko, A. V. (2004). Optimizatsiya vnepechnoy obrabotki i legirovaniya stali na osnove resheniya obratnoy zadachi termodinamicheskogo analiza [Optimization of out-of-furnace processing and alloying of steel based on solving the inverse problem of thermodynamic analysis]. *Metallurgical and Mining Industry*, 8(228), 115-120 [in Russian].
6. Kharchenko, A. V., Ponomarenko, A. G., & Korzun, E. L. (2004). Termodinamicheskaya model mnogokomponentnoy kondensirovannoy fazyi [Thermodynamic model of a multicomponent condensed phase]. *Metallurgical and Mining Industry*, 8(228), 135-139 [in Russian].
7. Kharchenko, A. V., Ponomarenko, A. G., & Dovgonyuk, S. V. (2002). Differentsialnyie koeffitsientyi usvoeniya v kompyuternykh sistemakh upravleniya plavkoy i vnepechnoy obrabotkoy stali [Differential absorption coefficients in computer control systems for melting and non-furnace steel processing]. *Metallurgical and Mining Industry*, (10), 131-137 [in Russian].

8. Kharchenko, O. V., & Lichkonenko, N. V. (2022). Termodynamichniy analiz fizyko-khimichnykh protsesiv v vysokotemperaturnii reaktsiinii zoni ridkoi staleplavlynoi vanniy. Chastyna 1. Systemy zalizo-kysen, zalizo-kysen-vuhlets [Thermodynamic analysis of physical and chemical processes in the high-temperature reaction zone of the liquid steelmaking bath. Part 1. Iron-oxygen, iron-oxygen-carbon systems]. *Metal and Casting of Ukraine*, (30(1(328)), 28-34. <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/3> [in Ukrainian].
9. Kharchenko, O. V. (2022). Thermodynamic analysis of physical and chemical processes in the high-temperature reaction zone of a liquid steelmaking bath. Part 2. Removal of impurities. *Metal and Casting of Ukraine*, (30(4(331)), 30-35. <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/39>
10. Sinyakov, R. V., & Kharchenko, A. V. (2018). Avtomatizirovannoe proektirovanie i upravlenie kislorodno-konverternoy plavkoy [Automated design and control of oxygen-converter smelting]. *Metallurgical and Mining Industry*, (3), 14-26 [in Russian].

Received 28.11.2024

Summary

O.V. Kharchenko¹, PhD (Engin.), Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies, Ecology and Technogenic Safety, e-mail: odds@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3717-3872>

V.L. Kovalov², Deputy Head of the Open-hearth Workshop for Technology and Quality, e-mail: vitaliy.kovalev@zaporizhstal.com

N.V. Adamovych², Master's student, e-mail: n.adamowich28@gmail.com

¹Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

²Public Joint Stock Company "Zaporizhstal" (Zaporizhzhia, Ukraine)

Improvement of the Steelmaking Control System "Master"

In the open-hearth shop of PJSC "Zaporizhstal", a complex work has been carried out to improve and expand the functional capabilities of the steelmaking control system (SMCS) "Master", which was originally designed to optimize the deoxidation-alloying of steel at the outlet from the furnace to the ladle and maintain an electronic journal of express analyses of the chemical composition of liquid steel. The following functions were added to the system: a function for controlling the quantity and quality of pig iron supplied to each heat; a module for controlling smelting parameters in real time with an operational forecast of the temperature of the liquid metal and its carbon content, starting from heating and ending with the outlet from the furnace; a module for inertial support of the smelting trajectory in the event of a temporary absence of operational data on the instantaneous oxygen consumption and the position of oxygen lances. A thermodynamic model of a steelmaking bath has been developed, including metal, slag and gas phases, which allows predicting the main melting parameters before the start of actual temperature measurements and express metal analyses, and then correcting the forecast trajectories based on the actual measurements. For each smelting period (warming up, casting of pig iron, melting, finishing, outlet tapping), the following values are displayed: forecast and actual measurements of the metal temperature; forecast and actual measurements of the carbon content in the metal; actual measurements of the manganese, silicon, phosphorus and sulfur content in the metal; instantaneous oxygen and natural gas consumption on the lances; sensor data on the position of the oxygen lances. The limiting zones of instantaneous oxygen consumption are also indicated in accordance with the norms of technological maps. The discreteness of data update can vary and is 30 s by default. A scheme and a thermodynamic model of the interaction of the steelmaking bath with the high-temperature reaction zone around the oxygen jet have been developed. The algorithm of the nonlinear simplex method for solving the problem of optimizing deoxidation-alloying of steel at the outlet from the furnace has been improved. The list of available materials for alloying has been expanded, materials for charging have been added. Monitoring of SMCS "Master" for 44 melts has been carried out. Measures are planned for further improvement of the SMCS "Master" in the direction of integration with the enterprise management system.

Keywords

Melting parameters; metal temperature forecast; control system; metal-slag-gas system; steel; thermodynamic model.