

УДК 669.187:541.123

DOI:10.26661/2071-3789-2019-2-42-02

Харченко Александр Викторович <sup>(1)</sup>, доцент, кандидат технических наук  
 Ковалев Виталий Леонидович <sup>(2)</sup>, заместитель начальника цеха  
 Личконенко Наталия Владимировна <sup>(1)</sup>, старший преподаватель  
 Ляшенко Роман Петрович <sup>(2)</sup>, аспирант, ведущий специалист

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА «МАСТЕР»

<sup>(1)</sup> *Инженерный институт Запорожского национального университета*  
<sup>(2)</sup> *ПАО Металлургический комбинат «Запорожсталь»*

В мартеновском цехе ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» выполнен комплекс работ по усовершенствованию системы контроля сталеплавильного производства «Мастер», изначально предназначенной для оптимизации раскисления-легирования стали на выпуске из печи в ковш и ведения электронного журнала экспресс-анализов химического состава жидкой стали. В систему добавлены: функция контроля количества и качества чугуна, поступающего на каждую плавку; модуль контроля параметров плавки в реальном масштабе времени с оперативным прогнозом по температуре жидкого металла и содержанию в нем углерода, начиная от прогрева и завершая выпуском из печи. Разработана термодинамическая модель сталеплавильной ванны, включающая металлическую, шлаковую и газовую фазы, которая позволяет прогнозировать основные параметры плавки до начала фактических замеров температуры и экспресс-анализов металла, и далее корректировать прогнозные траектории по данным фактических замеров.

Ключевые слова: сталь, система контроля, термодинамическая модель, параметры плавки.

*Введение.* Система контроля сталеплавильного производства (СКСП) «Мастер» была внедрена в мартеновском цехе ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» в 2013 г. [1]. Главным ее предназначением были оптимизация раскисления-легирования стали на выпуске из печи в ковш и ведение электронного журнала экспресс-анализов химического состава жидкой стали. Электронный журнал экспресс-анализов являлся необходимым элементом работающей системы, поскольку занесенные в него данные о текущем химическом составе жидкой стали, в том числе перед выпуском из печи, непосредственно использовали для оптимизации количеств ферросплавов, вторичного алюминия и коксика, необходимых для получения готовой стали заданного состава в соответствии со стандартами или техническими условиями. Критерием оптимизации являлась минимальная суммарная стоимость материалов, используемых для раскисления-легирования стали. Оптимизацию выполняли при помощи нелинейного симплекс-метода и термодинамической модели системы «металл-шлак-газ», описывающей конечное состояние сталеразливочного ковша с металлом, покрытым слоем окисленного печного шлака [2-6]. В расчетах использовали дифференциальные коэффициенты усвоения, полученные из термодинамической модели ее линеаризацией методом неявного дифференцирования функции

многих переменных [7].

*Постановка задачи.* В работе ставили задачу расширить функциональные возможности системы контроля сталеплавильного производства «Мастер» с учетом оперативных данных о расходе кислорода и природного газа на печах и данных о текущем положении кислородных фурм, а также обеспечить при этом прогноз температуры и химического состава сталеплавильной ванны во всех периодах плавки, в том числе в жидком периоде.

*Основная часть исследований.* Чтобы в полной мере учесть оперативные данные, предоставляемые базами данных ПАО Металлургический комбинат «Запорожсталь», была разработана термодинамическая модель сталеплавильной ванны, включающая металлическую, шлаковую и газовую фазы. Модель позволяет прогнозировать основные параметры плавки до начала фактических замеров температуры и экспресс-анализов металла, и далее корректировать прогнозные траектории по данным фактических замеров. Отличительной особенностью разработанной модели является точный учет высокотемпературной реакционной зоны (ВРЗ), возникающей при взаимодействии струи кислорода и жидкой металлической ванны [8-9]. В работе применяли также принципы оптимального проектирования и прогнозирования параметров плавки стали, разработанные применительно к кислородно-конвертерному производству [10].

На рис. 1 показана общая схема взаимодей-

ствия сталеплавильной ванны с ВРЗ, принятая в качестве рабочей гипотезы для построения алгоритма прогнозных расчетов.

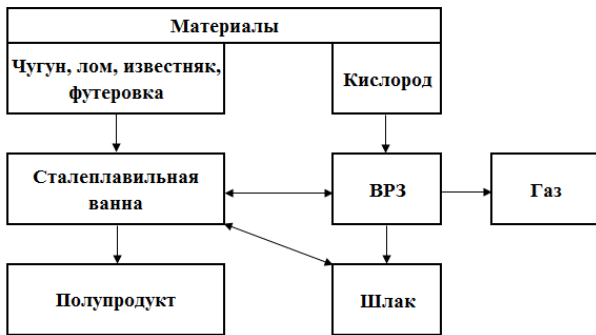


Рисунок 1 – Схема взаимодействия сталеплавильной ванны с высокотемпературной реакционной зоной

Согласно этой схеме основные материалы (чугун, лом, известняк) вводятся в рабочий объем сталеплавильной ванны. Кислород подается через фурмы и, взаимодействуя с жидким металлом, образует устойчивую зону ВРЗ, которая резко отличается от объема основного металла. Для ВРЗ характерна температура выше 2000 °С и чрезвычайно окисленный металл. В этой зоне происходит окисление примесей металла, в первую очередь углерода, с образованием  $CO$  и

шлаковой фазы. Здесь же из-за высокой температуры происходит испарение железа с последующим его окислением кислородом воздуха и конденсацией в бурый дым. Следует отметить, что газ, в большом количестве образующийся в ВРЗ, покидает рабочее пространство печи при том, что часть теплоты этого газа остается в системе.

ВРЗ, отдавая переокисленный металл в сталеплавильную ванну, является источником кислорода для последней, что приводит к дополнительному образованию газовой фазы при окислении углерода.

Шлак, образующийся в ВРЗ, полностью остается в системе. Этот шлак перенасыщен оксидом железа, часть из которых восстанавливается при взаимодействии со сталеплавильной ванной.

Несмотря на то, что данная схема является простейшей из возможных, попытки ее усложнения (детализации) путем добавления дополнительных ВРЗ не приводили к адекватному улучшению работы алгоритма системы «Мастер».

На рис. 2 приведен скриншот усовершенствованной главной формы СКСП «Мастер».

МАСТЕР - операционный режим															
Печь 1		Печь 2		Печь 5		Печь 6		Печь 7		Печь 8		Печь 10		Печь 12	
Пл. 0191402		Ковш 1		План		Факт		Выбор		03.05.19		11:03:42		ЗДА	
Выпуск - факт		Ст.		S235JR		S235JR		S235JR							
02.05.19 12:40		Назн.		УСП.Э.РУЛ		УСП.Э.РУЛ		УСП.Э.РУЛ						Мастер	
		ГОСТ				EN 10025:2004		EN 10025:2004						Чурило	
Печь	12:43	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	O	t°C	Прим		
	Проба	0,041				0,024						766	1634		
	Прогноз	0,039	0,093		0,033							766	1632		
	Макс	0,17	1,00	0,10	0,035	0,035	0,30	0,30	0,30	0,10				План	
	Мин	0,08	0,45							0,02				S235JR	
Ковш	Прогноз	0,136	0,62	0,028	0,030					0,035		1572		Факт	
	Факт	0,12	0,63	0,025	0,030	0,029	0,02	0,01	0,01	0,034				232,5 т	
Материалы		FeMn	SiMn	FeSi	Кокс	АВ-87	А1А7	Окал.	Оптим		Расход	График			
Оптим		1770			250		420		Проплавить		Выпуск				
Факт		2160			200	432			Текущая плавка		Чугун				
										Газ: 43 кг		T = 1622C		96153	

Рисунок 2 – Главная форма системы контроля сталеплавильного производства «Мастер» - оптимизация легирования стали S235JR (плавка № 0191402)

На приведенном скриншоте имеется выпадающее меню, с помощью которого можно выбрать любую плавку за последние трое суток. При необходимости для поиска информации о плавках за любой период можно использовать специальную форму, которая активируется нажатием кнопки . В режиме поиска плавки можно просматривать информацию о любом

подмножестве плавки за все время работы СКСП «Мастер» с использованием простых и сложных критериев поиска.

Строка материалов является многофункциональным элементом формы, состоящим из полей редактирования и отображения масс материалов в килограммах. В результате оптимизации в этих полях отображается оптимальный

набор материалов, которые являются рекомендацией для мастера. При ручном вводе или редактировании масс материалов происходит автоматическое виртуальное раскисление металла в ковше с отображением соответствующего прогноза в таблице химических составов.

С помощью кнопки «Расход» включается отображение траектории текущей плавки в координатах «параметры – время». Для невыпущенной плавки временная координата отображается в реальном масштабе. В качестве текущих параметров плавки используются:

- температура сталеплавильной ванны, °С (жирная красная линия);
- разовые замеры фактической температуры металла, °С (красные кружки);
- содержание углерода в металле, % · 10<sup>3</sup> (жирная черная линия);
- мгновенный расход кислорода, м<sup>3</sup>/ч (жирная синяя линия);
- мгновенный расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч (жирная синяя линия);
- средневзвешенное положение трех фурм, м · 10<sup>3</sup> (оранжевая линия);

– нормы технологических карт по расходу кислорода, м<sup>3</sup>/ч (горизонтальные зеленые и красные линии);

– данные экспресс-анализа проб металла на содержание углерода (% · 10<sup>3</sup>), марганца, кремния (% · 10<sup>4</sup>), фосфора и серы (% · 10<sup>5</sup>) (квадратики соответственно черного, фиолетового, серого, розового и желтого цветов);

– данные разовых экспресс-замеров температуры с помощью приборного комплекса «Celox», °С (красные кружки с синей заливкой);

– данные разовых экспресс-замеров окисленности и содержания углерода с помощью приборного комплекса «Celox», °С (черные квадратики с синей заливкой);

Кроме того, в расширенном (инженерном) режиме доступны также траектории плавки по массе металла, шлака и газа, содержанию оксидов железа в шлаке, температуре в ВРЗ, потерям железа путем испарения в ВРЗ.

Скриншот типичной формы с отображением фактических и прогнозных траекторий плавки приведен на рис. 3.

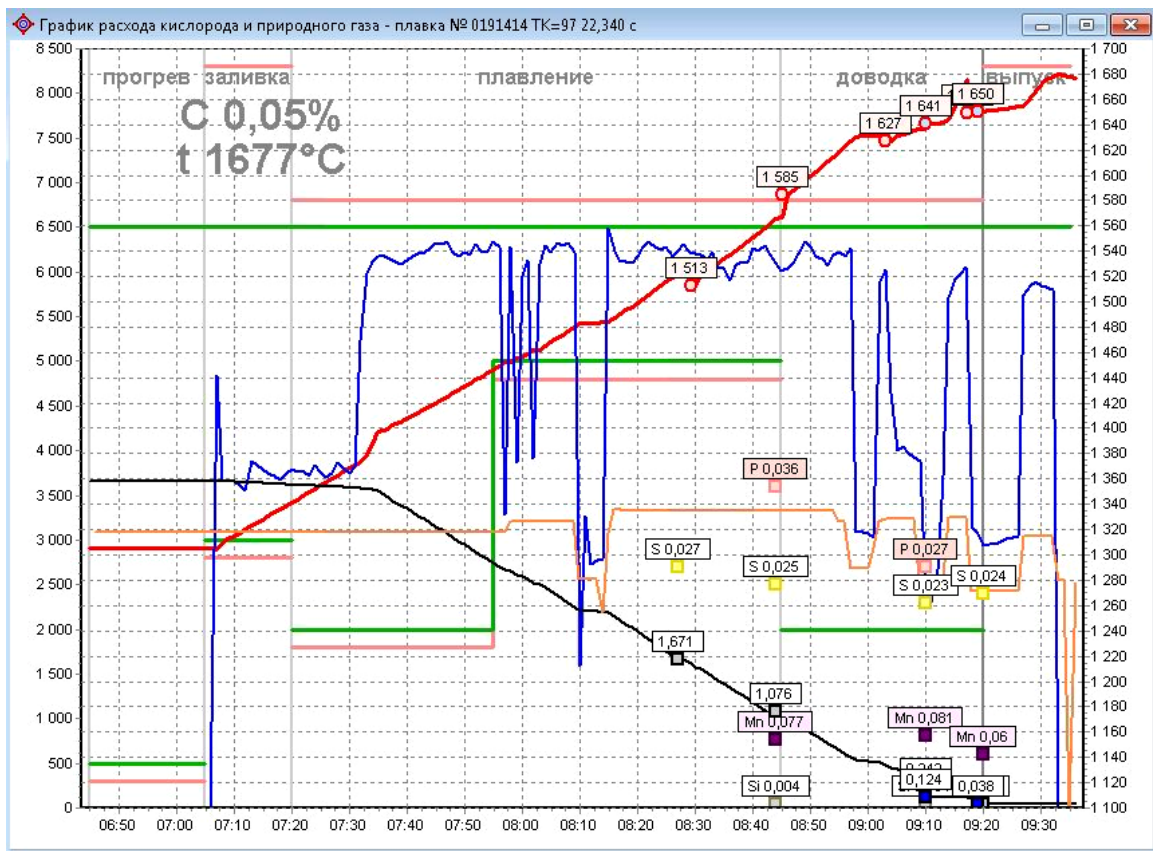


Рисунок 3 – Форма системы контроля сталеплавильного производства «Мастер» – фактические и прогнозные траектории параметров плавки № 0191414

Дискретность обновления данных формы составляет 30 с. По каждому периоду плавки

(прогрев, заливка чугуна, плавление, доводка, выпуск) отображаются ограничительные зоны

по расходу кислорода в соответствии с нормами технологической карты № 97.

*Выводы.*

1. Усовершенствован алгоритм решения задачи оптимизации раскисления-легирования стали на выпуске из печи.

2. Расширен список доступных материалов для легирования. Добавлены материалы для шихтовки плавки – жидкий чугун, лом, известняк.

3. Расширены возможности поплавочного мониторинга качества и количества чугуна, поступающего в мартеновский цех.

4. Разработана термодинамическая модель

сталеплавильной ванны, включающая металлическую, шлаковую и газовую фазы. Модель позволяет прогнозировать основные параметры плавки до начала фактических замеров температуры и экспресс-анализа металла, а далее корректировать прогнозные траектории по данным фактических замеров.

5. В тестовом режиме запущен модуль контроля параметров плавки в реальном масштабе времени с оперативным прогнозом по температуре жидкого металла и содержанию в нем углерода, начиная от прогрева и завершая выпуском из печи.

### Бібліографічний список

1. Харченко А. В. Оптимизация процесса раскисления стали с применением аппаратно-программного комплекса «Мастер». *Металургія : наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2015. Вип. 1 (33). С. 19-22.
2. Харченко А. В., Синяков Р. В. Термодинамическая модель многокомпонентной жидкой шлаковой фазы. *Металургія : наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2016. Вип. 2(36). С. 16-22.
3. Харченко А. В. Теплоемкость и другие термодинамические функции смешения многокомпонентной конденсированной фазы. *Металургія : наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 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 А. В., Синяков Р. В., Личконенко Н. В. Физико-химические процессы в высокотемпературной реакционной зоне жидкой сталеплавильной ванны. *Металургія : наукові праці ЗДІА*, Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2018. Вип. 1(39). С. 41-47.
9. Харченко А. В., Синяков Р. В., Личконенко Н. В. Удаление примесей из газовой фазы высокотемпературной реакционной зоны жидкой сталеплавильной ванны. *Металургія : наукові праці ЗДІА*, 2019. Вип. 1(41). С. 14-19.
10. Синяков Р. В., Харченко А. В. Автоматизированное проектирование и управление кислородно-конвертерной плавкой. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2018. № 3. С. 14-26.

**Харченко** Олександр Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри металургії, інженерний інститут Запорізького національного університету (Україна, Запоріжжя). E-mail: odds@i.ua

**Ковальов** Віталій Леонідович, заступник начальника мартенівського цеху ПАТ «Метаалургійний комбінат «Запоріжсталь» (Україна, Запоріжжя). E-mail: vityaly.kovalev@zaporizhstal.com

**Лічконенко** Наталія Володимирівна, старший преподаватель кафедри металургії, інженерний інститут Запорізького національного університету (Україна, Запоріжжя). nvlickon75@ukr.net

**Ляшенко** Роман Петрович, аспірант, провідний спеціаліст відділу розвитку персоналу ПАТ «Запоріжсталь» (Запоріжжя, Україна). E-mail: R.P.lyashenko@zaporizhstal.com

### ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА «МАЙСТЕР»

У мартенівському цеху ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» виконано комплекс робіт з удосконалення системи контролю сталеплавильного виробництва «Майстер», спочатку призначеної для оптимізації розкислення-легування стали на випуску з печі в ковш і 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 за температурою рідкого металу та вмістом у ньому вуглецю, почина-

ючи від прогрівання і завершуючи випуском з печі. Розроблено термодинамічну модель сталеплавильної ванни, що включає металеву, шлакову та газову фази, що дозволяє прогнозувати основні параметри плавки до початку фактичних замірів температури й експрес-аналізів металу та далі коригувати прогнозні траєкторії за даними фактичних замірів.

Ключові слова: сталь, система контролю, термодинамічна модель, параметри плавки

**Kharchenko** Alexander, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Metallurgy, Zaporizhzhya National University, Engineering Institute (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: odds@i.ua.

**Kovalyov** Vitaliy, patron of the head of the open-hearth workshop of PJSC «Zaporizhstal» (Zaporizhzhya, Ukraine). Email: vitaly.kovalev@zaporizhstal.com.

**Lichkonenko** Natali, Senior Teacher of Department of Metallurgy, Zaporizhzhya National University, Engineering Institute (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: nvlickon75@ukr.net

**Lyashenko** Roman, Postgraduate, Leading Specialist, Personnel Development Department of PJSC «Zaporizhstal» (Zaporizhzhya, Ukraine). Email: R.P.lyashenko@zaporizhstal.com.

### IMPROVEMENT OF THE STEEL SMELTING CONTROL SYSTEM «MASTER»

In the open-hearth workshop of PJSC Zaporizhstal, a set of works have been carried out to improve the control system of the steelmaking production "Master", which was originally designed to optimize deoxidation and alloying of steel at the outlet from the furnace into the ladle and for maintaining an electronic journal of express analysis of the chemical composition of liquid steel. The system has been added with: the function of controlling the quantity and quality of pig iron supplied to each heat; real-time melting parameters monitoring module with an operational forecast on the temperature of the liquid metal and the carbon content in it starting from heating and ending with the release from the furnace. A thermodynamic model of a steelmaking bath has been developed, including the metal, slag and gas phases, which allows predicting the main melting parameters before the actual temperature measurements and express metal analyzes begin, and then adjusting the predicted trajectories according to the actual measurements. A scheme was developed for the interaction of a steelmaking bath with a high-temperature reaction zone around a jet of injected oxygen. The algorithm 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 melting blending - molten iron, scrap, lime, limestone have been added. A real-time melting parameters monitoring module has been launched with an operational forecast on the temperature of the liquid metal and the carbon content in it starting from warming up and ending with the release from the furnace. The resolution of updating form data can vary and defaults to 30 s. For each melting period (heating, casting, melting, lapping, finishing), restrictive zones for oxygen consumption are displayed in accordance with the technological maps, forecast and actual measurements of the metal temperature, forecast and actual measurements of the carbon content in the metal, instantaneous oxygen and natural consumption gas on the tuyeres, positional sensor data on the position of oxygen tuyeres.

Key words: steel, control system, thermodynamic model, melting parameters.

Стаття надійшла до редакції 28.10.2019 р.  
Рецензент, проф. Ю.Ф. Терновий