

Methodology. The research is based on the mathematical calculations of the bearing capacity of the gas flow for the case of pneumatic transport of ferroalloy powders by the main gas pipeline and the conditions for their melting after physical penetration.

Findings. The boundary speeds and flow rates of the gas carrier are required to transport the powder of ferroalloys with a given flow rate. For particles of different sizes, extremely low speeds are defined before and after penetration into the metal, which ensure their complete assimilation.

Originality. For the first time, the conditions for the absorption of metal powders of ferroalloys of different fractions by taking into account the surface tension of a metal melt have been determined.

Practical value. The proposed modes of the introduction of powdered ferroalloys will allow to efficiently dispose of the fine fraction of ferroalloys and increase the degree of assimilation of ferroalloys, which in general will reduce the cost of deoxidation and steel doping in the ladle.

Key words: deoxidation, injection, ferroalloy powders, steel.

Рекомендована к публикации
д. т. н. Б. М. Бойченко

Поступила 10.06.2018



УДК 669.184.244.66:658.011.56

Наука

Р. В. Синяков /к. т. н./

Технологическая компания «Мин Цинь»,
г. Пекин, КНР
e-mail: rvsr@ukr.net

А. В. Харченко /к. т. н./

Запорожская государственная инженерная
академия, г. Запорожье, Украина
e-mail: odds@i.ua

Автоматизированное проектирование и управление кислородно-конвертерной плавкой

R. V. Sinyakov /Cand. Sci. (Tech.)/

Ming Xing Technology Company, Beijing, PRC
e-mail: rvsr@mail.ru

A. V. Kharchenko /Cand. Sci. (Tech.)/

Zaporizhzhya State Engineering Academy,
Zaporizhzhya Ukraine
e-mail: odds@i.ua

Automated projecting and process control for bof

Цель. Разработка системы автоматизированного проектирования и управления кислородно-конвертерной плавкой стали.

Методика. Применение комплекса методов многопараметрической оптимизации (линейное и динамическое программирование) процесса плавки стали на основе термодинамического моделирования системы «металл – шлак – газ» с использованием метода химических потенциалов Гиббса.

Результаты. На примере проектирования технологического процесса в кислородном конвертере показаны основные функции системы автоматизированного проектирования и ее работа в системе управления от начала плавки до получения полупродукта с заданными параметрами.

Научная новизна. В работе приведены критерии управления фурмой и вводом материалов. На этой основе достигается оптимальное управление, позволяющее получить металл и шлак с заданными химическим составом и температурой.

Практическая значимость. Представленная система автоматизированного проектирования внедрена в составе системы управления кислородно-конвертерной плавкой стали на заводе XuanSteel (КНР). (Ил. 10. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.)

Ключевые слова: кислородный конвертер, технология, автоматизированное управление, проектирование процесса, метод Гиббса.

Введение и состояние вопроса. Эффективное управление конвертерной плавкой является необходимым условием получения полупродукта для производства качественного металла, имеющего конкурентную стоимость. Для этого необходимы следующие основные элементы:

- наличие цели как результата управления;
- возможность оценки (контроля) текущего состояния процесса;
- способность создания плана перевода системы из текущего состояния в целевое – создание проекта технологического процесса.

Наиболее известным способом контроля является метод химического экспресс-анализа проб металла, отбираемых по ходу процесса, а также замеров температуры. Из-за скоротечности процесса представленный подход заметно удлиняет плавку, что сильно влияет на производительность агрегата. Известным практическим решением данного вопроса является использование дополнительной измерительной фурмы [1], позволяющей оценить содержание углерода в металле и его температуру без остановки продувки. Но из-за дороговизны оборудования и эксплуатационных расходов данный способ рентабелен только для конвертеров большой вместимости. Также существенным недостатком является то, что контроль процесса осуществляется дискретно в нескольких временных точках в конце процесса.

Еще одним методом контроля содержания углерода в металле является использование информации о составе отходящих газов, получаемой с помощью газоанализаторов реального времени [2]. На этой основе косвенно определяется количество удаленного углерода по ходу плавки.

Также визуально оценивают процесс по виду, интенсивности излучения и высоте пламени над горловиной конвертера. В настоящее время предлагаются усовершенствованные методы контроля, основанные на регистрации излучения пламени с помощью фотоэлементов различной конструкции. Предполагается, что таким образом можно оценить содержание углерода в конвертере на завершающей стадии продувки.

Большинство перечисленных вариантов контроля позволяют оценивать только содержание углерода в металле и его температуру, и только на завершающей стадии процесса. На сегодняшний день не существует технологии контроля конвертерной плавки по всем параметрам во всем временном интервале. Кроме того, существующие алгоритмы создания плана управления основаны на шаблонах, в лучшем случае, разработанных для разных групп марок сталей.

Очевидно, что этого недостаточно для эффективного управления конвертерной плавкой в условиях непрерывно изменяющихся параметров процесса.

Постановка задачи. Таким образом, создание системы автоматизированного проектирования конвертерной плавки является необходимым условием успешного управления технологическим процессом.

Результаты исследования. Чтобы оценить текущее состояние и выполнить проектирование технологического процесса, необходимо иметь модель процесса.

Многокомпонентные стали и расплавы, представляющие интерес для практической металлургии, на языке кибернетики характеризуют как «плохо организованные» или «диффузные» системы, именуемые иногда чёрным ящиком. Поэтому в качестве первой ступени исследования используются статистические модели. Хотя эмпирические модели по сравнению с теоретическими гарантируют более быстрое достижение частичных успешных результатов, при сильных колебаниях входных параметров в процессе работы или изменении ситуации конечные данные оказываются хуже.

Теоретические модели короче и информативнее, производят более эффективную свёртку информации, применимы к широкому кругу технологий, рассматриваемых как частные случаи. Чем больше доля теоретических уравнений, тем более универсальна модель и выше ее прогностические возможности. Теоретические модели устойчивы по отношению к случайной информации, позволяют делать априорные оценки при полном отсутствии экспериментальных данных. В условиях плохой текущей информации (грубые ошибки, пропуски, выход за пределы типовых режимов и т. д.) они могут лишь несколько снизить качество выдаваемых данных, в то время как статистические модели часто утрачивают работоспособность.

Наиболее работоспособны гибридные модели, в которых в качестве остова используется теоретическая часть, а привязка к конкретному агрегату выполняется с помощью статистической оценки дополнительных параметров, которые чаще всего являются адаптируемыми.

Для систематизации теоретического материала, относящегося к металлургическим расчетам, использовали работы Дж. Гиббса [3], позволившие представить весь комплекс методов количественного описания явлений сталеплавления в виде компактной системы взаимосогласованных алгоритмов и программ.

Метод Гиббса позволяет описывать химические процессы в любых системах без предварительного их представления в виде стехиометрических реакций. Этот метод исходит из постулата, согласно которому в условиях равновесия при постоянных температуре и давлении состояние любой мате-

риальной системы полностью характеризуется уравнением состояния, которое в общем виде можно представить как:

$$f(T, P, m_1, m_2, \dots, m_k) = 0, \quad (1)$$

где T – абсолютная температура, P – давление и m_j – массы химических элементов от 1 до k -го (общая масса M заменена массами k компонентов). Входящие в выражение (1) $k+2$ величины представляют собой полный набор независимых переменных, достаточный для описания всех свойств системы. При постоянных температуре и давлении свободная энергия Гиббса системы «металл – шлак – газ» (G) является некоторой функцией этих переменных. Кроме того, из 2-го начала термодинамики следует, что эта функция в состоянии равновесия имеет глобальный минимум:

$$G = G(T, P, m_1, m_2, \dots, m_k) = \min. \quad (2)$$

В интенсивных переменных необходимым условием минимума дифференцируемой функции (2) является равенство химических потенциалов элементов в контактирующих фазах. Для описания трёхфазной системы «металл – шлак – газ» необходимо определить три выражения для энергии Гиббса каждой из фаз:

$$G = G_{мет} + G_{шл} + G_{газ}, \quad (3)$$

$$G_{мет} = G_{мет}(T, P, m_{[1]}, m_{[2]}, \dots, m_{[k]}), \quad (4)$$

$$G_{шл} = G_{шл}(T, P, m_{(1)}, m_{(2)}, \dots, m_{(k)}), \quad (5)$$

$$G_{газ} = G_{газ}(T, P, m_{\{1\}}, m_{\{2\}}, \dots, m_{\{k\}}). \quad (6)$$

Конкретный вид выражений (4–6) определяется в теории химической термодинамики растворов.

Записав $2k$ условий равновесия в интенсивных переменных:

$$\mu_{[i]} = \mu_{(i)} = \mu_{\{i\}}, \quad (7)$$

и k уравнений материального баланса:

$$m_i = m_{[i]} + m_{(i)} + m_{\{i\}}, \quad (8)$$

получим $2k$ уравнений, позволяющих по заданной массе завалки и её составу вычислить все $2k$ неизвестные массы компонентов в фазах, определив таким образом массы образовавшихся продуктов плавки и их состав.

Достоинством представленного подхода является то, что компонентами любой конденсированной фазы выступают химические элементы периодической системы, что позволяет адекватно описывать фазу, не вводя какие-либо предположения о её молекулярном составе.

Определение уравнений энергии Гиббса фаз (4–6), а также алгоритмизация и расчеты детально представлены в работах [4; 5]. Все алгоритмы и расчеты программы опираются на термодинамическую модель конденсированной фазы [4], по-

зволяющую даже без статистической «привязки» решать широкий круг практических задач. Это позволяет выполнять: термодинамический расчет равновесия в многокомпонентной гетерогенной системе «металл – шлак – газ», расчет парциальных давлений всех атомарных и молекулярных составляющих газовой фазы, интегрированный термодинамический расчет температуры системы на основе энтальпийного теплового баланса; вычисление всех интегральных и парциальных термодинамических функций составляющих системы; учет тепла энергоносителей, температуры и агрегатного состояния материалов.

Процессы, протекающие в металлургических агрегатах, зачастую носят неравновесный характер. Метод Гиббса позволяет получить систему автономных дифференциальных кинетических уравнений относительно мольных долей элементов в металле и шлаке, правая часть которых равна движущей силе, действующей на атомы на межфазных границах [6]. Учет макроперемешивания ванны выполняется с использованием понятия «реакционной зоны», введенного авторами [7] на основе принципа квазилокального равновесия. Из этой модели следует, что любой непрерывный процесс можно аппроксимировать набором временных дискретных участков, и чем короче длительность процесса на каждом выбранном участке, тем ближе аппроксимация к непрерывно описываемому процессу. В данном случае в качестве критерия аппроксимации приняли количество (массу) конденсированной фазы, которое приходит в равновесие за единицу времени.

Для построения проекта плавки во времени использовали принципы проектирования, изложенные в работе [8].

При автоматизации действующего производства в качестве прототипа предварительного проекта составляют «портрет» (среднестатистическую оценку) существующей технологии, который является точкой отсчета для детального проекта плавки. Это позволяет с самого начала учесть все условия конкретного производства – вид и состояние оборудования, специфику и возможности обеспечивающих служб, квалификацию персонала и т. д. На основе полученной информации выполняют структурный синтез плавки, т. е. определяют количество и состав периодов плавки, а также определяют диапазон параметров, в рамках которых, система проектирования имеет возможность оптимизировать процесс. В дальнейшем, по мере роста доверия к САПР ТП, эти диапазоны можно увеличивать или вообще снимать ограничения.

Таким образом, среднестатистическая плавка представляет собой базис, относительно которого система проектирует будущий технологический процесс.

Проектирование плавки начинают с получения задания на плавку, включающего:

- марку стали (температуру, массу и химический состав металла на выпуске);
- тип и вес металлозавалки;
- вес, химический состав и температуру чугуна;
- перечень и характеристики используемых устройств.

Используя информацию о применяемом технологическом оборудовании, выполняют согласование их режимов работы. На основе данных о каждом периоде и работе каждого устройства последние собирают в единую последовательно-временную структуру, отражающую ход технологического процесса. В результате получают согласованный, но несбалансированный график ведения технологического процесса. Для получения сбалансированного проекта плавки необходимо выполнить имитацию технологического процесса. По полученным управлениям выполняют расчет состояния процесса на каждом шаге и, оценивая выполнение задания на плавку, переопределяют первоначальные управления.

Расчет выполняют согласно графикам ввода материалов и энергоносителей с учетом полного материального и энергетического балансов, термодинамического расчета и кинетической коррекции (скорость поступления реагентов, растворение, скорость усреднения ванны по химическому составу и температуре), имитируют плавку с заранее заданным (достаточно малым) шагом по времени Δt . Шаг расчета не должен превышать 5 с.

Имитацию плавки выполняют следующим образом (рис. 1).

Пусть в момент времени t_0 химический состав металла и шлака, а также средняя температура системы соответственно были равны $[P_0], (P_0)$ и T_0 . За интервал времени Δt устройством k будет введено материалов и энергоносителей $m^k = \Delta t \cdot q_{i,j}^k$. На основании этого выполняют расчет текущей температуры системы T и тем самым определяют количество расплавленного металлолома.

Далее прогнозируют изменение химического состава металла и шлака, их массу к моменту времени $t = t_0 + \Delta t$. Окончанием расчетов является достижение задания на плавку: масса, температура и химический состав металла к определенному времени выпуска. Для этого выполняют согласование скоростей нагрева металла и окисления примесей.

Изменяя положение фурмы, интенсивность ввода кислорода, моменты, тип и вес вводимых материалов, можно добиться согласованности в скоростях окисления примесей и нагрева металла, а также получения металла заданного химического состава и температуры. Например, недостаток окислителя можно компенсировать заменой известняком или добавкой руды; перегрев металла можно предупредить вводом охладителя; окисленность шлака можно регулировать положением фурмы и т. д. Как видно, качественная оценка возможных действий не представляет особой сложности, однако при этом следует учитывать влияние вносимых изменений на другие параметры плавки. В частности добавка известняка вместо извести требует больших энергетических

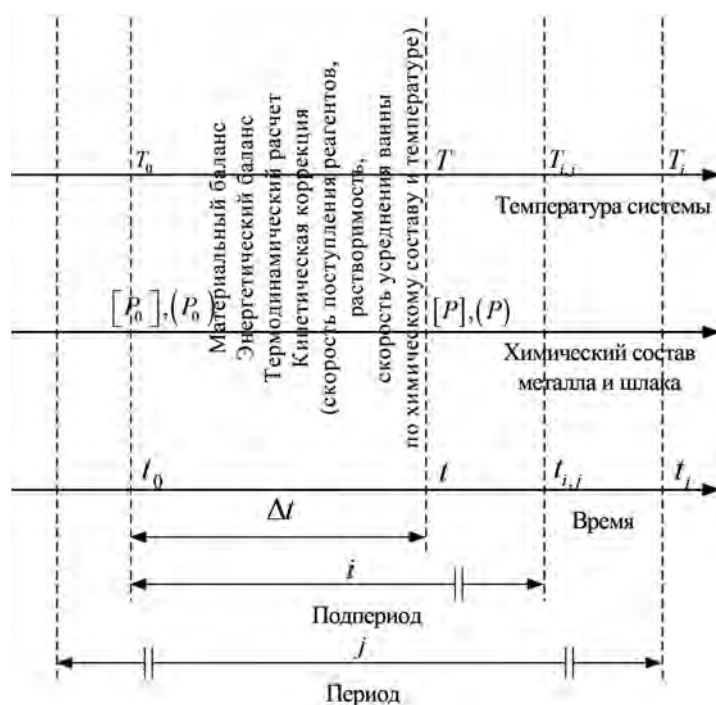


Рис. 1. Схема единичного цикла расчета

СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

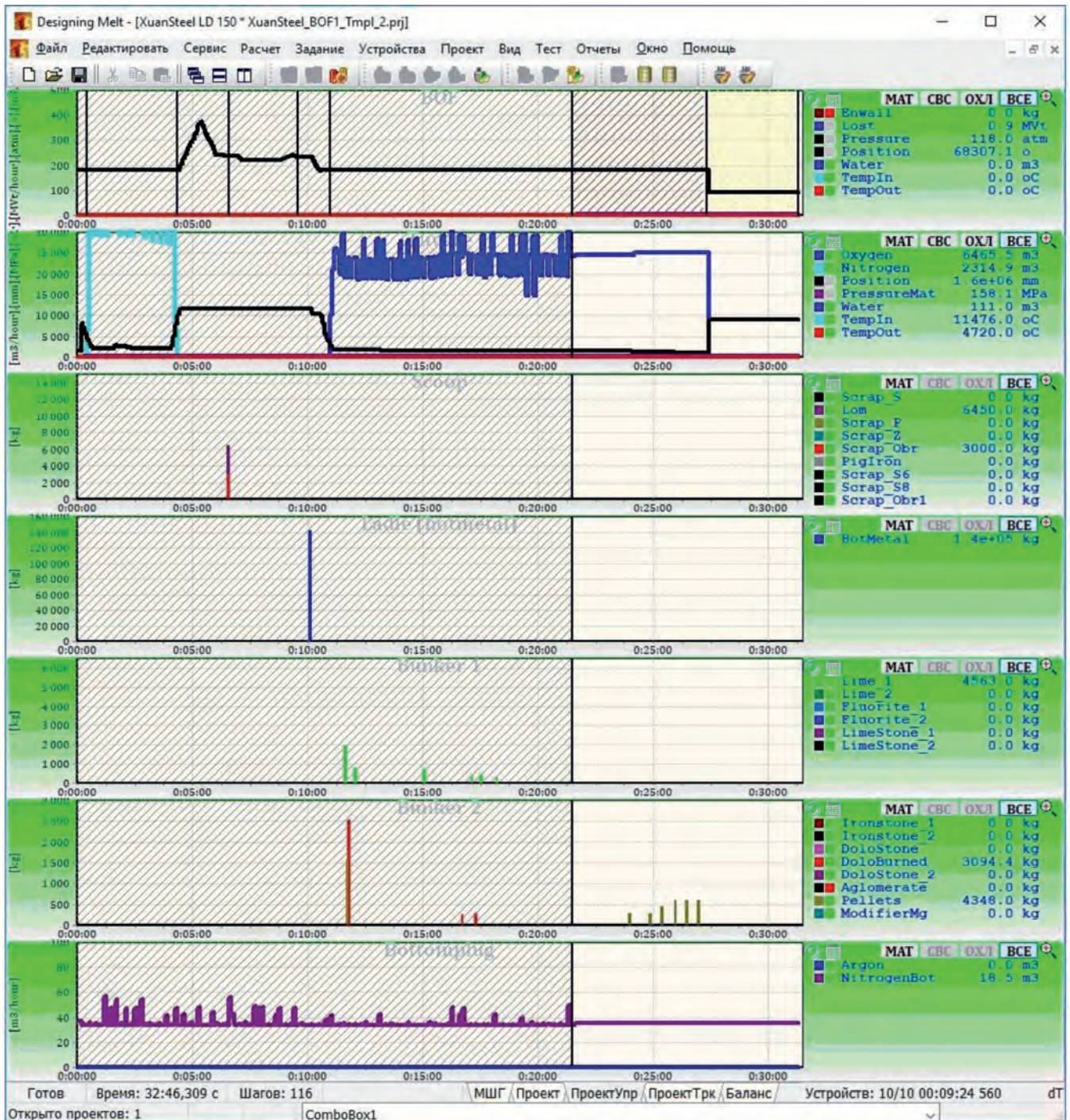
затрат; присадка руды или агломерата требует снижения расхода газообразного кислорода, изменение положения фурмы повлияет одновременно на температурный режим плавки, интенсивность перемешивания ванны и окисленность шлака и т. д.

Для количественной оценки необходимо охватить все многообразие изменяемых параметров плавки и различных вариантов. Очевидно, что последних может быть большое количество, и выбор оптимального варианта простым перебором

является трудоемкой и алгоритмически сложной задачей.

В данной работе предложен метод согласования скоростей нагрева металла и окисления примесей, позволяющий рассчитать оптимальные количества шихтовых материалов и энергоносителей, введение которых в систему дает состав металла и температуру, удовлетворяющие заданным требованиям (ограничениям).

Результатом проектирования является расчетный график (рис. 2а) будущей плавки с детальной



а)

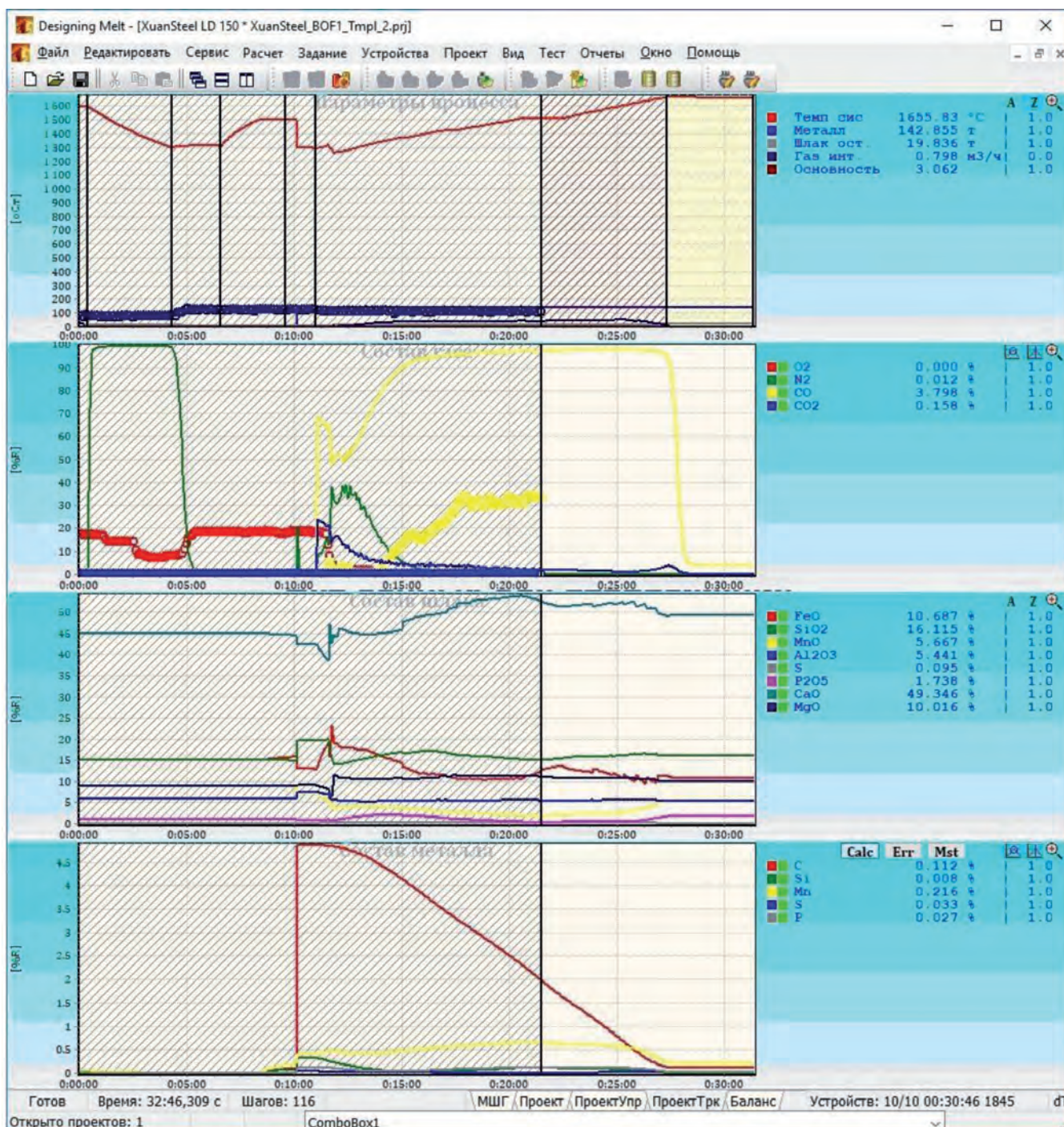
Рис. 2 а. Временной срез процесса на 22-й минуте плавки: управляющие воздействия. Затемненная область – фактический ход технологического процесса, светлая – проект плавки

проработкой режимов работы всех исполнительных механизмов (устройств): положения фурмы по ходу плавки, интенсивности ввода кислорода, интенсивности ввода инертного газа в днище, тип, вес и время ввода материалов. Оценивается динамика изменения составов и масс металла и шлака, а также средней температуры системы по ходу плавки (рис. 2б).

Для иллюстрации процесса изменения (пересчета) проекта плавки во времени выделили шесть временных срезов, в которых изменяются

отдельные параметры технологического процесса, существенно влияющие на дальнейший ход плавки (табл. 1):

- изменение массы металлолома в завалку;
- изменение массы жидкого чугуна;
- изменение температуры жидкого чугуна;
- изменение химического состава жидкого чугуна;
- перепады давления кислорода в фурме;
- перепады интенсивности расхода кислорода в фурме;



б)

Рис. 2 б. Временной срез процесса на 22-й минуте плавки: траектория процесса. Затемненная область - фактический ход технологического процесса, светлая - проект плавки

Характеристика отдельных параметров процесса для выделенных временных срезов

№ среза	Время от начала плавки (от начала продувки), мм:сс	Контроль данных	
		Параметр	Значение
1	00:05 (-10:55)	Исходные данные на плавку: – химический состав чугуна, %; – масса жидкого чугуна, т; – температура жидкого чугуна, °С; – масса металлолома, т	[C] 4,95; [Si] 0,43; [Mn] 0,5; [P] 0,12; [S] 0,035; 145; 1320; 10
2	09:00 (-02:00)	Изменение массы металлолома, т	9,45
3	10:20 (-00:40)	Изменение параметров жидкого чугуна: – химический состав, %; – масса, т; – температура, °С	[C] 4,85; [Si] 0,32; [Mn] 0,41; [P] 0,117; [S] 0,037; 141,6; 1284
4 и 5	16:40 (05:40) и 21:40 (10:40)	Изменение параметров кислородной продувки: – флуктуации давления, МПа; – флуктуации интенсивности расхода, м ³ /час. Неточное взвешивание масс материалов по ходу продувки, т	
6	27:25 (16:25)	Фактический ход технологического процесса	

– неточности во взвешивании материалов, вводимых по ходу плавки;
– неточности во времени ввода материалов в конвертер.

Пересчитанный проект управления технологическим процессом для соответствующего временного среза (табл. 1) на 22-й минуте плавки представлен на рис. 2а, а соответствующая ему траектория процесса – на рис. 2б. На рисунках затемненная область представляет собой фактический ход технологического процесса, светлая – проект плавки.

Проектирование выполняется в течение всей плавки (в каждом периоде) от выпуска до выпуска. Это необходимо для более правильного учета

простоев, потерь, количества удаленного шлака и т. д.

Более подробно остановимся на периоде продувки кислородом, так как именно этот период определяет конечные характеристики выпускаемого металла.

Визуализация проектирования работы кислородной фурмы представлена на рис. 3. Кислородная продувка условно разбивается на этапы (I-IV), в которых особым образом регулируются параметры кислородной продувки: положение фурмы и интенсивность расхода или давление кислорода в фурме. Длительности и моменты перехода от одного этапа к другому не являются постоянными, и представлены здесь для большей наглядности.

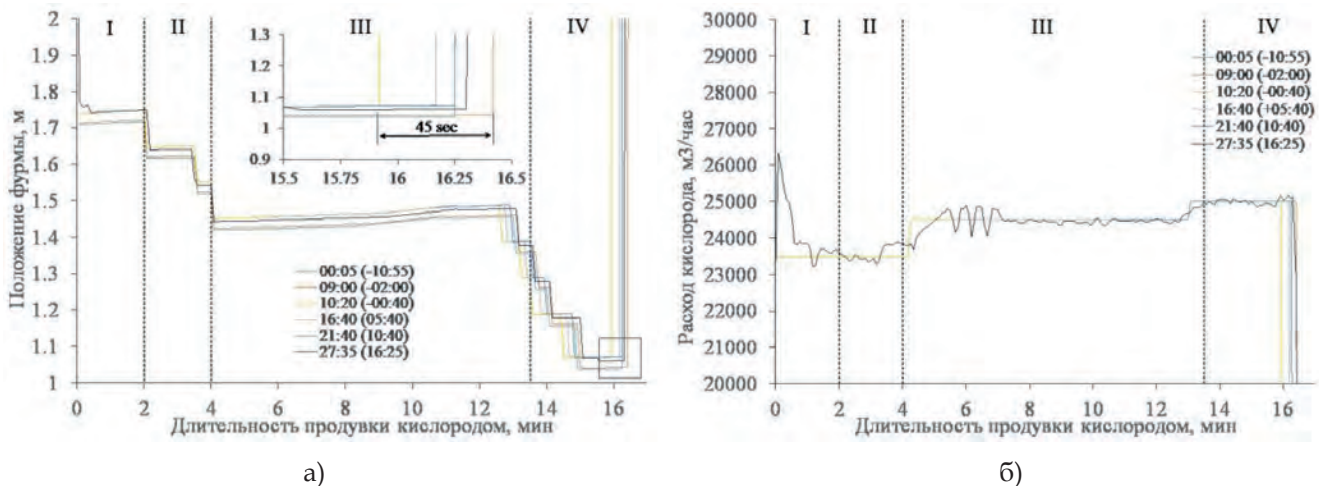


Рис. 3. Управление фурмой: а – положение; б – расход кислорода

На первом этапе необходимо создать условия для быстрого наведения высокоосновного жидкоподвижного шлака, способного ассимилировать фосфор и серу. Для этого необходимо в первые минуты продувки получить шлак с высоким содержанием оксида железа, в присутствии которого известь растворяется быстрее. По мере удаления кремния из металла и перехода его в шлак и повышения окисленности шлака создаются условия для растворения извести и доломита и наводки жидкоподвижного шлака с необходимой основностью. Длительность этого этапа определяется временем работы фурмы и удельным расходом кислорода на тонну завалки. Положение фурмы и интенсивность расхода кислорода определяются исходным химическим составом чугуна, его температурой и массой металлизавалки и чугуна.

Следующий этап (II) характеризуется окончанием процесса наведения шлака, увеличением интенсивности перемешивания и повышением скорости удаления углерода. На этом этапе выполняется мягкое снижение содержания оксида железа в шлаке до заданных пределов, которые определяются температурой системы, химическим составом шлака и его основностью. Это необходимо для поддержания шлака в жидкоподвижном состоянии и слежения за тем, чтобы шлак не переходил в гетерогенное состояние или наоборот – не переокислялся.

Третий этап определяет основной режим работы, в котором положением фурмы регулируют содержание оксида железа в шлаке, для поддержания необходимых характеристик шлака, а также интенсивность перемешивания и скорость удаления углерода.

На заключительном этапе положение фурмы изменяют по содержанию углерода в металле. По мере снижения содержания углерода в металле снижается газовыделение, что, в свою очередь, снижает интенсивность перемешивания ванны. Для компенсации снижения перемешивающего эффекта от выделения CO положение фурмы понижается, при этом контролируется содержание оксида железа. Параллельно меняется интенсивность расхода кислорода по ходу продувки от мягкого к более жесткому режиму.

На рис. 3 показаны временные срезы проекта управления кислородной фурмой (положение фурмы и расход кислорода). Для наглядности соответствующие проекты управления наложили друг на друга. Как видно, в зависимости от изменяющихся условий процесса проект плавки претерпевал изменения. По ходу плавки проектный момент времени окончания продувки изменялся в диапазоне 45 секунд (увеличенная область на рис. 3а). Для рассматриваемых условий выплав-

ки стали в конвертере в течение 45 секунд будет введено 300 м³ кислорода, содержание углерода снизится на 0,17–0,22 %, а температура увеличится на 18–21 °С. Таким образом, при статическом управлении плавкой без привлечения автоматизированной системы управления и учета постоянно изменяющихся условий продувки получили бы металл с конечными параметрами с ошибкой, соответствующей 45 секундам.

Проектирование ввода материалов также условно разбито на несколько этапов (рис. 4) и привязано к управлению фурмой. На первом этапе, как отмечалось ранее, наводят высокоосновный активный шлак. В этот период вводится известь для получения шлака заданной основности и обожженный доломит для получения в шлаке заданного содержания оксида магния, обусловленного растворимостью в шлаке (для снижения растворения футеровки конвертера). Также в это время вводится охладитель (железная руда или агломерат) для ускорения наведения шлака и балансировки теплового режима плавки. На этом этапе вводится от 60 до 70 % материалов, спроектированных на всю плавку.

На втором и третьем этапах выполняется коррекция химического состава шлака для поддержания его основных характеристик (окисленность, основность, содержание MgO) в заданных пределах (рис. 5).

На заключительном этапе в основном осуществляются добавки охладителя (железная руда, агломерат) для регулирования теплового баланса плавки и согласования одновременного выхода на заданную температуру и заданное содержание углерода в металле в конце продувки, а также для поддержания достаточной окисленности шлака и его фосфатной емкости.

Аналогично визуализации управления фурмой соответствующие временные срезы проектов управления вводом материалов для наглядности наложили друг на друга (рис. 4). Как видно, в зависимости от изменяющихся условий процесса моменты ввода и массы соответствующих материалов изменялись.

Таким образом, сам проект и окончательные показатели плавки по ходу плавки меняются (рис. 6). При этом целевые параметры плавки находятся в заданных пределах (рис. 7), что подразумевает одновременное получение заданной температуры металла и выход на заданное содержание углерода.

Возможен случай, когда решение указывает на невозможность в заданных условиях, например, с ограниченными массами шихтовых материалов и т. д., провести кислородную продувку за указанное время или получить одновременное попадание в заданные пределы. В такой ситу-

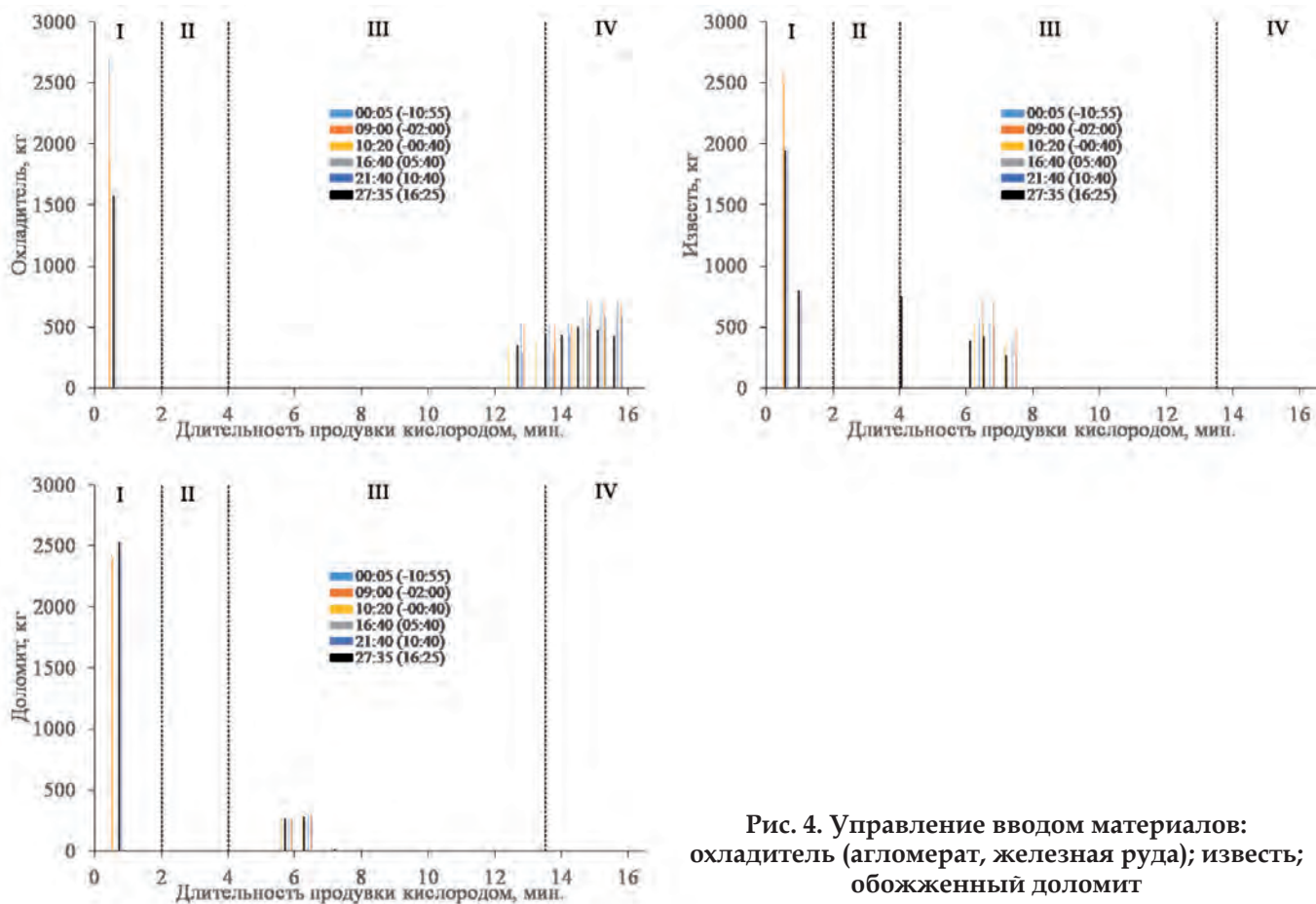


Рис. 4. Управление вводом материалов: охладитель (агломерат, железная руда); известь; обожженный доломит

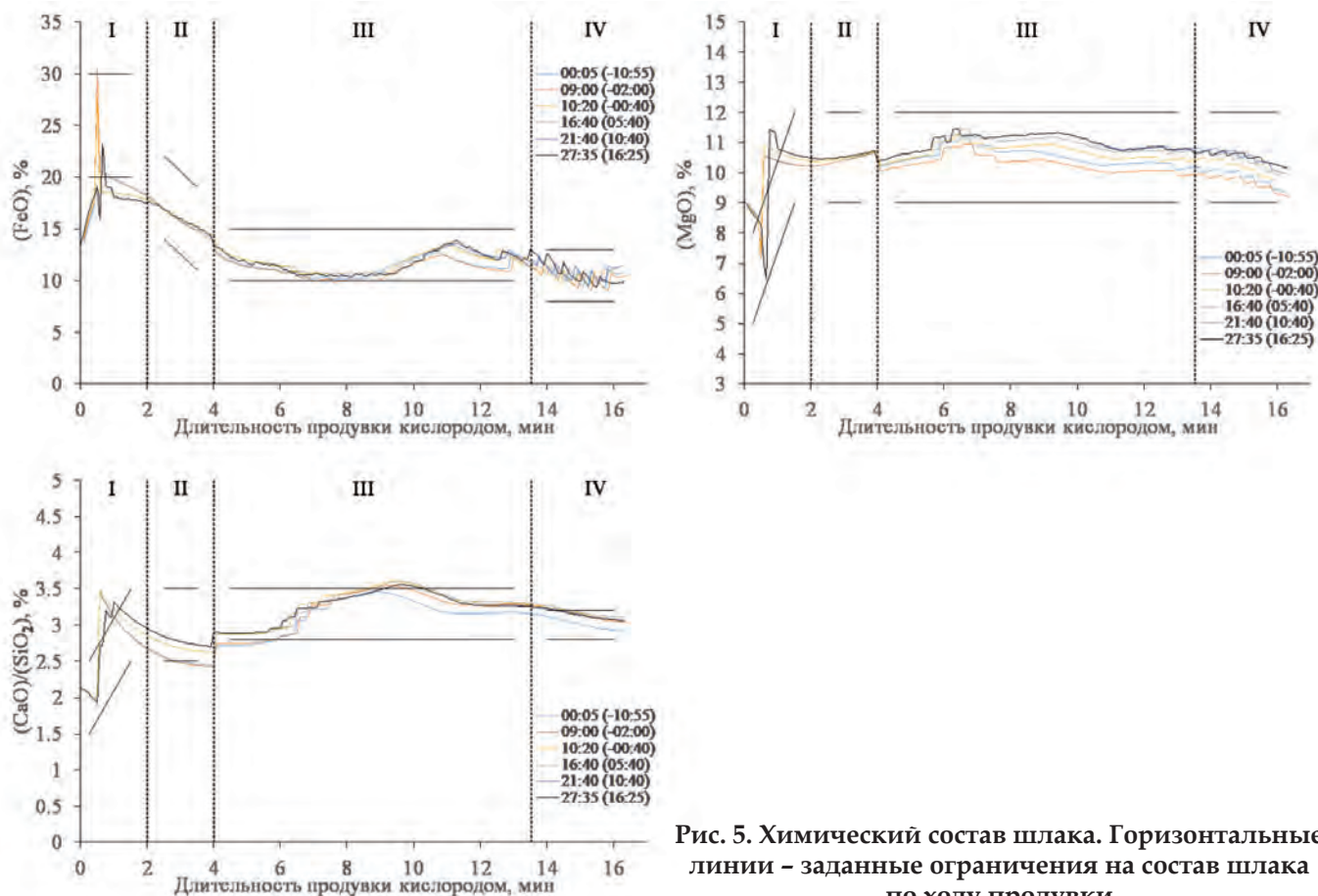


Рис. 5. Химический состав шлака. Горизонтальные линии - заданные ограничения на состав шлака по ходу продувки

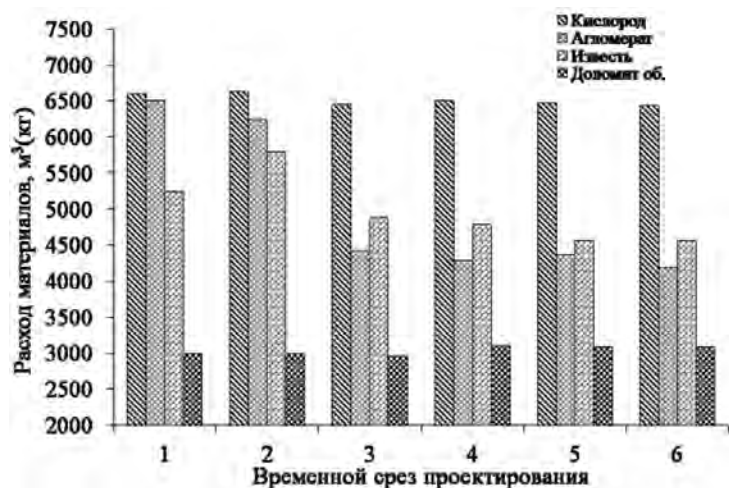


Рис. 6. Изменение проектных показателей плавки по ходу процесса выплавки стали в конвертере

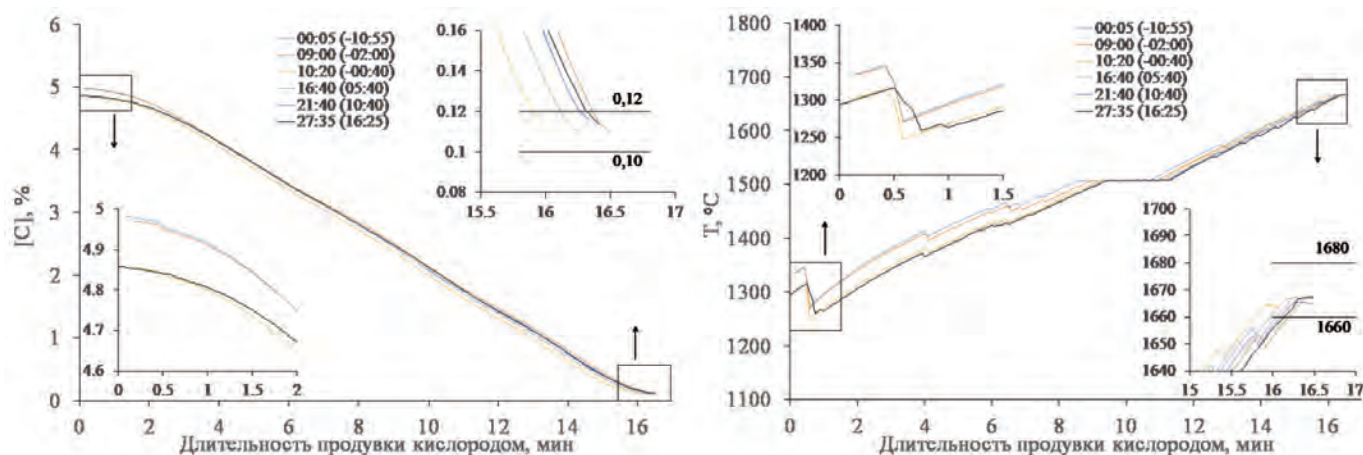


Рис. 7. Динамика удаления углерода и нагрева металла

ации будет предложен проект плавки с минимальными отклонениями конечных параметров от заданных.

Ниже представлены результаты промышленных испытаний системы управления кислородным конвертером на основе проектирования технологического процесса. Была проведена серия из 8 плавок (3413–3420), на которых управление фурмой (расход кислорода и положение) и ма-

териалами полностью выполнялось в автоматическом режиме вплоть до поднятия фурмы. На представленных плавках полностью исключалось влияние человека на управление технологическим процессом.

Исходные химический состав, температура и масса жидкого чугуна, а также количество металлолома в завалку изменялись в достаточно широком диапазоне (табл. 2).

Таблица 2

Исходные параметры плавок

№ плавки	Жидкий чугун								Металлолом		
	Химический состав, %								Температура, °C	Масса, кг	Масса, кг
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti				
3413	4,67	0,34	0,434	0,123	0,037	0,034	0,066	1254	144400	11250	
3414	4,69	0,32	0,447	0,121	0,029	0,032	0,073	1289	144900	7750	
3415	4,92	0,41	0,502	0,122	0,021	0,028	0,069	1350	143600	11400	
3416	4,94	0,32	0,363	0,112	0,037	0,02	0,066	1314	141100	14550	
3417	4,84	0,42	0,522	0,125	0,024	0,034	0,082	1338	142900	14350	
3418	4,86	0,32	0,413	0,117	0,037	0,029	0,064	1284	141600	9450	
3419	4,74	0,31	0,482	0,126	0,033	0,037	0,08	1234	140300	10200	
3420	4,83	0,33	0,397	0,114	0,027	0,025	0,06	1241	142300	10700	

СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Каждая плавка была проведена по индивидуальному режиму. Окончательный вид управлений фурмой и отдачей материалов приведены на рис. 8. Как видно, управления не являются шаблонными, а определяются исходя из текущих условий плавки.

Анализ результатов испытаний показал, что на каждой плавке были достигнуты конечные целевые показатели как по химическому составу

металла и его температуре на выпуске (рис. 9), так и по химическому составу шлака (рис. 10).

Возможность автоматического окончания плавки является следствием достаточной точности прогноза основных параметров технологического процесса (рис. 9–10): $\Delta[C] \pm 0,015\%$; $\Delta(\text{FeO}) \pm 2\%$; $\Delta(\text{MgO}) \pm 2\%$; $\Delta(B) \pm 0,1$; $\Delta T \pm 10^\circ\text{C}$.

Выводы. На примере проектирования технологического процесса в кислородном конвертере

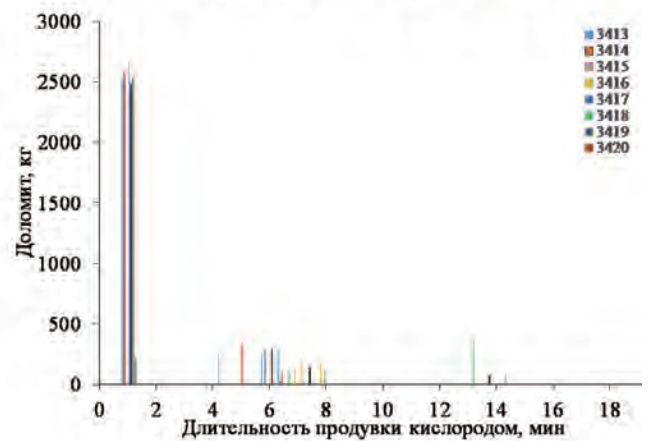
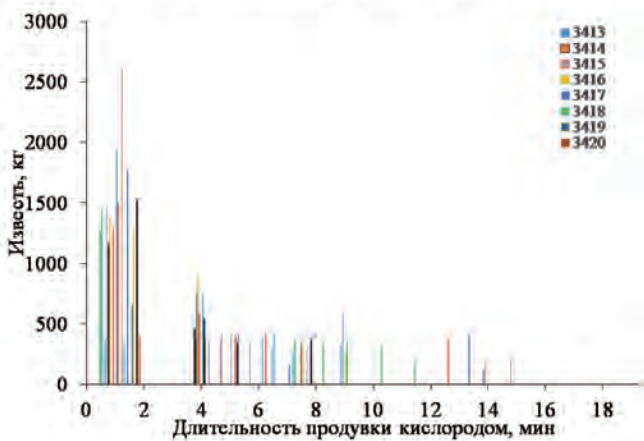
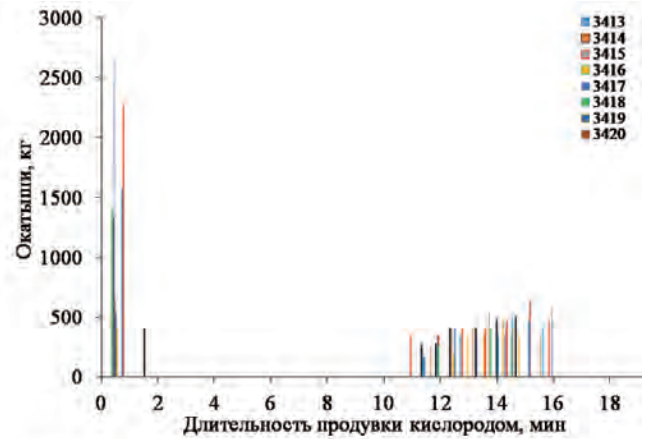
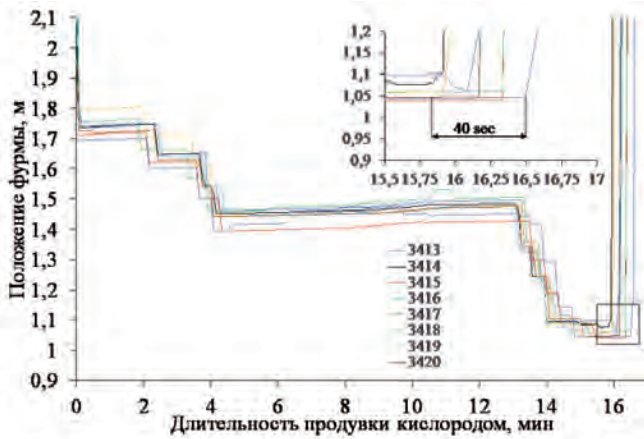


Рис. 8. Управление фурмой и отдачей материалов по ходу кислородной продувки. Промышленные плавки

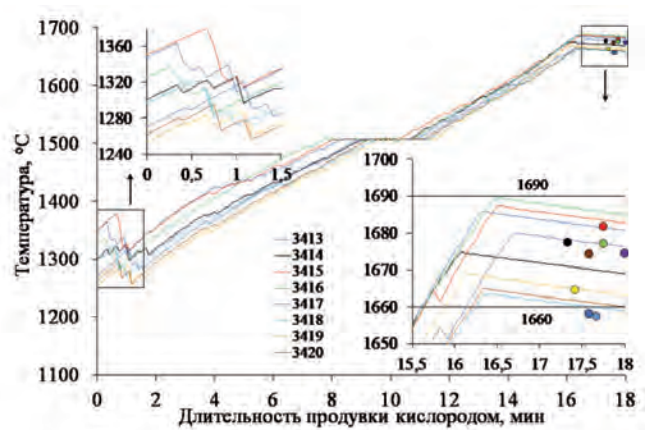
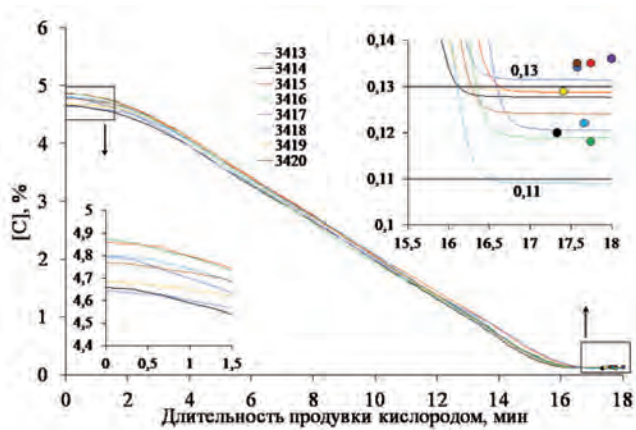


Рис. 9. Динамика удаления углерода (а) и нагрева металла (б) в сравнении с фактическими данными в конце плавки

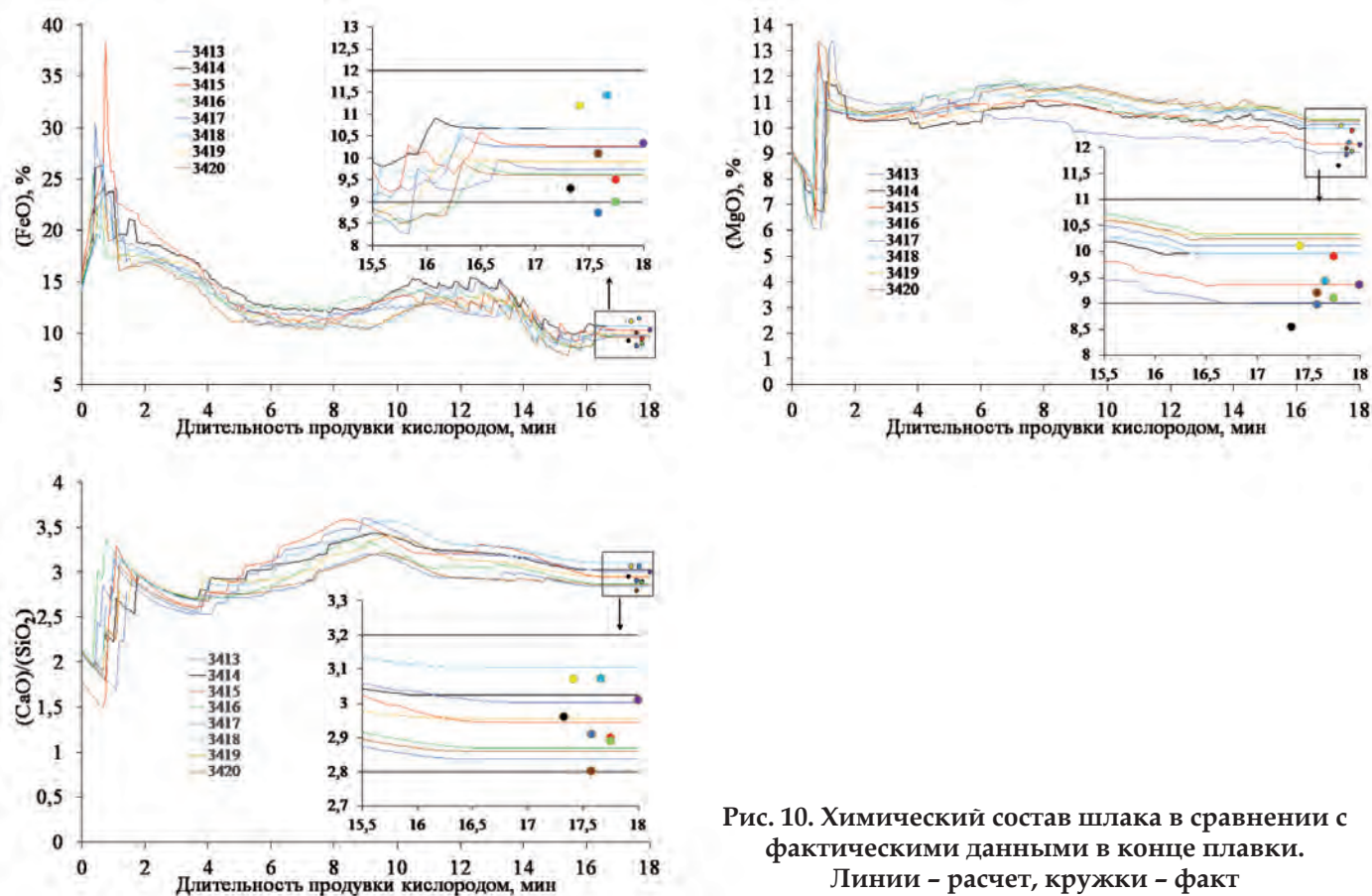


Рис. 10. Химический состав шлака в сравнении с фактическими данными в конце плавки. Линии – расчет, кружки – факт

показаны основные функции системы автоматизированного проектирования и ее работа в системе управления от начала плавки до получения полупродукта с заданными параметрами.

Разработанная САПР позволяет проектировать управления фурмой (положение, расход кислорода) и отдачей материалов (тип, вес и время ввода). Работа системы основана на строгой модели физико-химических процессов, протекающих в сталеплавильной ванне. Это позволяет управлять ходом технологического процесса выплавки стали в автоматическом режиме от старта продувки до поднятия фурмы без вмешательства оператора.

В работе приведены критерии управления фурмой и вводом материалов. На этой основе достигается оптимальное управление, позволяющее получить металл и шлак с заданными химическим составом и температурой.

Представленная система автоматизированного проектирования внедрена в составе системы управления конвертерной плавкой на заводе XuanSteel (КНР).

Библиографический список / References

1. Максимов П. Измерительный зонд для автоматического определения параметров плавки в конвертере / П. Максимов // СТА. – 2007. – № 4. – С. 36–39.

Maksimov, P. *Izmeritel'nyy zond dlya avtomaticheskogo opredeleniya parametrov plavki v konvertere. STA*, 2007, no. 4, pp. 36-39.

2. Bathla R. Carbon prediction model using the offgas analysis at ArcelorMittal Indiana Harbor No.2 steel producing BOF shop with no bottom blowing and suppressed hood combustion system / R. Bathla // *Iron and Steel Technology*. – 2011. – № 11. – С. 70–77.

3. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика / Дж. В. Гиббс. – М.: Наука, 1982. – 584 с.

Gibbs, Dzh. V. *Termodinamika. Statisticheskaya mekhanika*. Moscow, Nauka, 1982, 584 p.

4. Харченко А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом энтальпийного теплового баланса / А. В. Харченко // *Металл и литье Украины*. – 2005. – № 6. – С. 13–17.

Kharchenko, A. V. *Termodinamicheskoe modelirovanie sistemy «metall-shlak-gaz» s uchetom ental'piynogo teplovogo balanssa*. Metall i lit'e Ukrainy, 2005, no. 6, pp. 13-17.

5. Харченко А. В. Термодинамическая модель многокомпонентной шлаковой фазы / А. В. Харченко, Р. В. Синяков // *Научные труды ЗГИА. Металлургия*. Вып. 36. – Запорожье, ЗГИА, 2016. – С. 16–22.

Kharchenko, A. V., Sinyakov, R. V. *Termodinamicheskaya model' mnogokomponentnoy shlakovoy fazy*. Nauchnye trudy ZGIA. Metallurgiya. Vypusk 36. Zaporozh'е, ZGIA, 2016, pp. 16-22.

6. Харченко А. В. О кинетике межфазного массопереноса в металлургических агрегатах / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко // *Металл и литье Украины*. – 2002. – № 12. – С. 41-42.

Kharchenko, A. V., Ponomarenko, A. G. *O kinetike mezhfaznogo massoperenosa v metallurgicheskikh agregatakh*. Metall i lit'e Ukrainy, 2002, no. 12, pp. 41-42.

7. Пономаренко А. Г. Термодинамика и кинетика в современных системах управления металлургической плавкой / А. Г. Пономаренко, Р. В. Синяков, С. В. Довгонюк, Е. Л. Корзун // *Вестник ЮУрГУ*. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – № 2. – С. 32–35.

Ponomarenko, A. G., Sinyakov, R. V., Dovgonyuk, S. V., Korzun, E. L. *Termodinamika i kinetika v sovremennykh sistemakh upravleniya metallurgicheskoy plavkoy*. Vestnik YuUrGU. Chelyabinsk, Izd-vo YuUrGU, 2002, no. 2, pp. 32-35.

8. Синяков Р. В. Разработка элементов системы автоматизированного проектирования технологического процесса выплавки стали в высокомоощной ДСП: дис. ... канд., техн., наук: 05.16.02 / Р. В. Синяков. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – 194 с.

Sinyakov, R. V. *Razrabotka elementov sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskogo protsessa vyplavki stali v vysokomoshchnoy DSP: Diss. kand, tekhn, nauk: 05.16.02*. Donetsk, DonNTU, 2005, 194 p.

Мета. Розробка системи автоматизованого проектування і управління киснево-конвертерною плавкою сталі.

Методика. Застосування комплексу методів багатопараметричної оптимізації (лінійне і динамічне програмування) процесу плавки сталі на основі термодинамічного моделювання системи «метал – шлак – газ» з використанням методу хімічних потенціалів Гіббса.

Результати. На прикладі проектування технологічного процесу в кисневому конвертері показано

основні функції системи автоматизованого проектування і її робота в системі управління від початку плавки до отримання напівпродукту із заданими параметрами.

Наукова новизна. У роботі наведено критерії управління фурмою і введенням матеріалів. На цій основі досягається оптимальне управління, що дозволяє отримати метал і шлак із заданими хімічним складом і температурою.

Практична значущість. Наведену систему автоматизованого проектування впроваджено в складі системи управління киснево-конвертерною плавкою сталі на заводі XuanSteel (КНР).

Ключові слова: кисневий конвертер, технологія, автоматизоване управління, проектування процесу, метод Гіббса.

Purpose. Development of a computer-aided design and control system for oxygen-converter steel fusion.

Methodology. The application of a complex of multiparametric optimization methods (linear and dynamic programming) of the steel melting process based on the thermodynamic modeling of the «metal-slag-gas» system using the Gibbs chemical potential method.

Findings. On the example of designing the technological process in the oxygen converter, the basic functions of the computer-aided design system and its operation in the control system from the beginning of melting to the production of a semi-product with a specified parameters are shown.

Originality. The paper presents description of criterions for the oxygen lance control as well as for control of the materials input. On this basis, an optimal control is achieved, which makes it possible to obtain metal and slag with a specified chemical composition and temperature.

Practical value. The presented computer-aided design system is implemented as part of the control system for oxygen-converter steel fusion at the XuanSteel plant (China). (IL 10. Bibliography: 8 titles)

Key words: oxygen converter, technology, automated control, process design, Gibbs method.

Рекомендована к публикации
д. т. н. К. Г. Низяевым

Поступила 15.06.2018

