



УДК 669.187.2:621.365.21

DOI 10.17073/0368-0797-2024-4-481-489

Оригинальная статья  
Original article

## ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ В АСПЕКТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

А. В. Сивцов<sup>1</sup>✉, О. Ю. Шешуков<sup>1,2</sup>, Д. К. Егизарьян<sup>1,2</sup>,  
М. М. Цымбалист<sup>1</sup>, П. П. Орлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт металлургии Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

✉ aws2004@mail.ru

**Аннотация.** В работе определен и сформулирован подход к управлению основными режимами выплавки стального полупродукта в сверхмощных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) с использованием технологии цифровых двойников. Существующие регуляторы мощности не обладают функцией симметрирования полезных мощностей фаз и, соответственно, электрических дуг, так как они ориентированы на работу со средней величиной сигнала. Авторы предлагают использовать анализ динамических характеристик, построенных на мгновенных значениях входных параметров вместо действующих, как принято в большинстве реализованных устройств. Это дает возможность получить более точные данные о состоянии столба дуги и снизить количество требуемых времени и вычислительных мощностей на получение результата и формирование рекомендаций. Длительная регистрация данных при работе сверхмощной ДСП-135 показала связь постоянной составляющей напряжения дуги с окисленностью металлического расплава. Приведен пример ее использования в качестве критерия управления окислительной стадией плавки, что позволяет снизить расход электрохимических датчиков на каждую плавку в случае серийности выплавляемого металла. На основе регистрируемых данных подтверждена возможность своевременного определения неравномерности выделения дуговой мощности между электродами печи и выдачи рекомендаций по регулированию работы газогорелочных устройств для выравнивания скорости осаждения лома у электродов с меньшим выделением мощности. Авторами предложена идея использования цифровых двойников на базе моделей распределения активной мощности по зонам ванны и зависимости окисленности металла от расхода кислорода для контроля и управления электрическим режимом и режимом газового дутья на окислительной стадии процесса. Приведены упрощенные схемы этих двойников.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, цифровой двойник, система управления, электрический режим, электрическая дуга, рафинировочный период, постоянная составляющая напряжения дуги

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Института металлургии Уральского отделения РАН.

**Для цитирования:** Сивцов А.В., Шешуков О.Ю., Егизарьян Д.К., Цымбалист М.М., Орлов П.П. Проблемы автоматизированного управления технологическим процессом в дуговых сталеплавильных печах в аспекте применения технологии цифровых двойников. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(4):481–489. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-481-489>

# AUTOMATED PROCESS CONTROL IN ELECTRIC ARC FURNACES IN THE ASPECT OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

A. V. Sivtsov<sup>1</sup>, O. Yu. Sheshukov<sup>1, 2</sup>, D. K. Egiazar'yan<sup>1, 2</sup>,  
M. M. Tsymbalist<sup>1</sup>, P. P. Orlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

✉ aws2004@mail.ru

**Abstract.** An approach to managing the main modes of smelting steel in heavy-duty electric arc furnaces (EAF) using digital twin technology was defined and formulated. It was noted, that the existing power regulators do not have the function of balancing the effective power of phases and, accordingly, electric arcs because they are focused on working with a certain average value of the signal. It is proposed to use the analysis of dynamic characteristics based on instantaneous values of input parameters instead of operating ones, as it's usually implemented in most devices. This allows us to obtain more accurate data on the arc state and reduce the amount of time and computing power required to obtain a result and form recommendations. Based on the data obtained as a result of long - term observations of the heavy-duty EAF-135 operation, the relationship of the constant component of the arc voltage (CCAV) with the metal oxidation is shown. An example of its use as a criterion for controlling the melting oxidative stage is given. This reduces the consumption of electrochemical sensors for each melting in the case of serial metal production. Based on the recorded data, it is possible to timely determine the unevenness of the arc power release between the furnace electrodes and issue recommendations on gas burners operation regulating to equalize the rate of scrap melting at electrodes with less power release. The authors propose the idea of using digital twins based on models of the active power distribution across the melting bath zones and dependence of metal oxidation on oxygen blowing for monitoring and controlling the electric mode and the oxygen blast mode at the oxidative stage of the melting process. Simplified schemes of these twins are given.

**Keywords:** electric arc furnace, digital twin, control system, electric mode, electric arc, refining period, constant component of arc voltage

**Acknowledgements:** The work was performed within the state assignment of the Institute of Metallurgy of the Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Sivtsov A.V., Sheshukov O.Yu., Egiazar'yan D.K., Tsymbalist M.M., Orlov P.P. Automated process control in electric arc furnaces in the aspect of digital twin technology. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(4):481–489. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-481-489>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих областях промышленности и экономики прослеживается явная тенденция к широкомасштабному внедрению технологии цифровых двойников для управления процессами [1; 2]. Данный подход во многих случаях уже доказал свою эффективность в части снижения энергетических затрат и экономии сырьевых материалов. Суть указанного подхода состоит в создании виртуального аналога (собственно цифрового двойника управляемого агрегата), технологического режима или процесса, реализуемого посредством математического моделирования [3 – 5].

Одним из основных условий применения данного подхода является обеспечение двусторонней связи объекта с его виртуальным аналогом. В общем случае эта связь может осуществляться как путем непосредственного воздействия на элементы управления печью, так и в форме совета технологу или оператору дуговых сталеплавильных печей (ДСП) по применению того или иного управляющего воздействия на ход процесса. Вполне вероятно, что разработки автоматизированных систем контроля и управления технологическим процессом с функциями формирования совета можно отнести к разряду задач технологии цифровых двойников, по меньшей мере, в качестве предпосылок к их созда-

нию. Поэтому задачи исследования особенностей процессов, происходящих в электродуговых печах, с целью разработки методов контроля основных технологических параметров остаются по-прежнему актуальными.

В производстве стали и чугуна технологии цифровых двойников пока не нашли должного применения. Предпосылками к их созданию могут служить работы по математическому моделированию технологических процессов в сталеплавильных [6; 7] и доменных печах [8 – 10]. В качестве одного из первых существенных шагов в применении цифровых двойников к управлению ДСП следует отметить работу ученых ФГБОУ ВО МГТУ им. Г.И. Носова (МГТУ) [11], в которой достаточно подробно описан алгоритм и приведен пример его использования в регуляторе мощности.

Электрический режим ДСП сильно изменяется в течение плавки [12 – 15]. Как показывает практика регулирования, операторы и технологи очень редко используют такой эффективный рычаг управления, как изменение ступени напряжения по ходу плавки. Установив в начале какой-либо технологической стадии определенную ступень, они работают на ней практически в течение всей стадии, невзирая на изменение технологической обстановки и условий горения дуг.

Авторы, используя алгоритм цифрового двойника и результаты своих предшествующих исследо-

ваний [16; 17], реализовали отслеживание ситуаций, в которых настройки ПИИ-регулятора не оптимальны, и осуществляется итерационный подбор новой, соответствующей текущему состоянию объекта, оптимальной настройки. Это позволило существенно стабилизировать электрический режим за счет снижения стандартных отклонений токов и мощностей дуг соответственно на 15,9 и 4,8 % и снизить удельный расход электроэнергии (УРЭ) на 3 %, а время работы печи под током сократить на 2 мин.

Однако такой подход предполагает управление перемещением электродов по параметрам условно средней фазы и не обеспечивает симметрию полезной нагрузки печи. Это приводит к существенной неравномерности выделения дуговой мощности в областях отдельных электродов в условиях присущей практически всем сталеплавильным печам асимметрии короткой сети. Такая задача требует довольно сложного технического решения, связанного с организацией точек отбора сигналов напряжений непосредственно с электродов печи. Желательно, чтобы в своих дальнейших исследованиях авторы обратили внимание и на данный аспект оптимизации электрического режима.

**МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛА ОТ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Назначение электрического режима состоит в подаче и рациональном распределении в рабочем пространстве печи электрической мощности. При этом в качестве основной составляющей полезной электрической нагрузки выступает электрическая дуга – элемент с ярко выраженными свойствами и особенностями. От степени развития дугового разряда (мощности) и его стабильности зависят эффективность процесса плавления и основные технико-экономические показатели. Среднеквадратические (стандартные) отклонения действующих значений тока дуги и фазной мощности от некоторых заданных в соответствии со стадией процесса значений, безусловно, могут весьма успешно выступать

в роли индикаторов стабильности разряда и даже теплового состояния печи. Для модели цифрового двойника регулятора мощности такой прием приемлем. Однако в целом для подсистемы управления электрическим режимом как средства обеспечения рационального распределения мощности в ванне печи требуется более детальная информация о характеристиках электрической дуги.

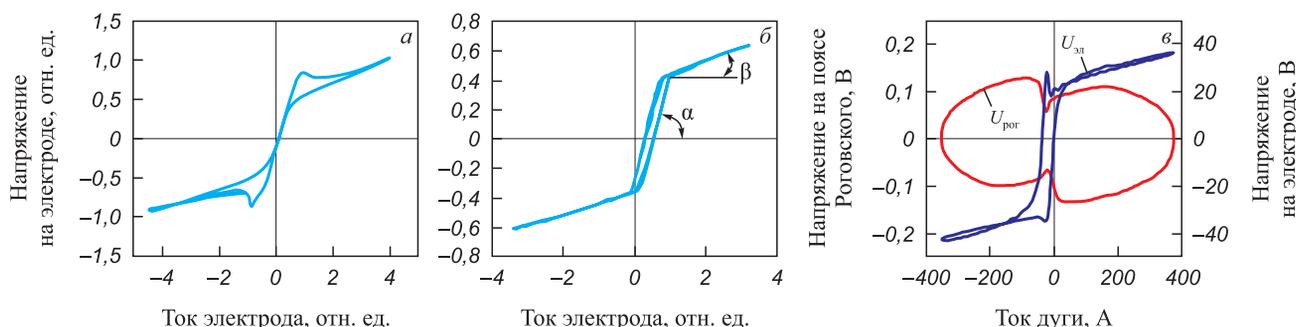
Поэтому предлагается применять в модели электрического режима не действующие, а мгновенные значения входных параметров. Целесообразность такого подхода подтверждается и проявлением в последние десятилетия интереса к гибридным моделям дуги переменного тока Касси-Майра, основанным на решении уравнений электрической проводимости дугового столба [18 – 21]. Однако использование таких моделей сопряжено с достаточно сложным математическим аппаратом и расчетами, требующими существенных затрат времени и оперативной памяти. К тому же, далеко не всегда модельные представления соответствуют реальным характеристикам объекта, в частности, осциллограммам тока и напряжения электрической дуги. Следовательно, следует отдать предпочтение анализу динамических характеристик, построенных по мгновенным значениям исходных сигналов:

- динамической вольтамперной характеристике (ВАХ) – зависимости активной составляющей фазного напряжения от тока;
- фазовой траектории – зависимости производной тока от тока дуги.

Их типичные формы представлены на рис. 1.

По форме динамической ВАХ, в частности, по углам наклона ее прямолинейных участков к оси токов можно единственным образом определить величины включенных последовательно с дугой и шунтирующих ее сопротивлений. Это составляет основу метода динамических ВАХ, изложение которого достаточно подробно дано в работе [22].

С его помощью можно определить параметры электрической схемы замещения рабочего пространства ДСП: падения напряжения на дуге, сопротивления рас-



**Рис. 1.** Типичные формы динамической ВАХ и фазовой траектории цепей со свободно горящей (а) и шунтированной (б) электрической дугой, а также данные с реальной ДСП в период горения на жидкий металл (усреднение) (в)

**Fig. 1.** Typical forms of dynamic VAC and phase trajectory of circuits with non-shunted (a) and shunted (б) electric arc; data from a real EAF during the combustion period for liquid metal (averaging) (в)

плава и участка короткой сети, а также мощности дуг. На стадии рафинирования при шунтировании дуг шлаком можно определить токи в шлаковой и дуговой ветвях и мощности, выделяющиеся в этих зонах. Анализ фазовой траектории также имеет практическое применение в математической модели автоматизированного контроля параметров электрического режима ДСП.

В отличие от применения стандартных отклонений мощности и действующих значений тока в электроде, а также фазного напряжения для оценки стабильности дугового разряда, анализ форм фазовых траекторий и динамических ВАХ дает более наглядную информацию, позволяет контролировать по ходу плавки тепловое состояние печи и своевременно применять управляющие воздействия на ход процесса. Для оценки нестабильности дуговой плазмы на отдельных временных интервалах используют эффективные методы обработки сигналов, в том числе и кратковременное преобразование Фурье [22]. Применяемый авторами в этих целях показатель (индекс) нестабильности дуги

$$\tilde{v}_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{u_{\phi i}^2 - \tilde{u}_{\phi i}^2}{U_1^2}} \quad (1)$$

представляет собой отнесенное к амплитуде первой гармоники ( $U_1$ ) среднее по цифровой реализации ( $i = 1 \dots N$ ) сигнала фазного напряжения  $u_{\phi i}$  квадратичное отклонение исходного сигнала от его усредненного по нескольким (8 – 12) периодам Фурье-представления  $\tilde{u}_{\phi i}$ . Процедура усредненного преобразования Фурье более подробно описана в работе [23].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ

На рис. 2 приведены характерные для различных стадий плавки от начала до конца плавильного процесса реальные и усредненные динамические ВАХ и фазовые траектории. Они получены в результате отбора и аналого-цифрового преобразования электрических сигналов напряжений с выходов печного трансформатора и производных токов в электродах, отобранных с помощью поясов Роговского. Динамическая ВАХ обладает гистерезисом, поскольку построена для значений полного фазного напряжения. Видно, что по мере нагрева, плавления шихты и образования единой ванны жидкого сплава теплосодержание печи возрастает и характеристики стабилизируются, концентрируясь во все более узкой области.

Этот процесс находит свое отражение в изменении показателей нестабильности дуги на отдельных фазах, представленном на рис. 3. Данные были получены на сверхмощной ДСП-135 при выплавке стального полупродукта. Загрузка шихты осуществлялась в два приема, поэтому первый участок характеристики соответствует расплавлению первой бадьи шихты, второй

участок – плавлению второй бадьи и рафинировочному периоду. Практическое значение контроля этого показателя заключается в формировании совета сталевару по изменению уставок электрического режима, переключению ступени напряжения и принятию решений об отключении печи для загрузки второй бадьи или начале окислительной стадии процесса.

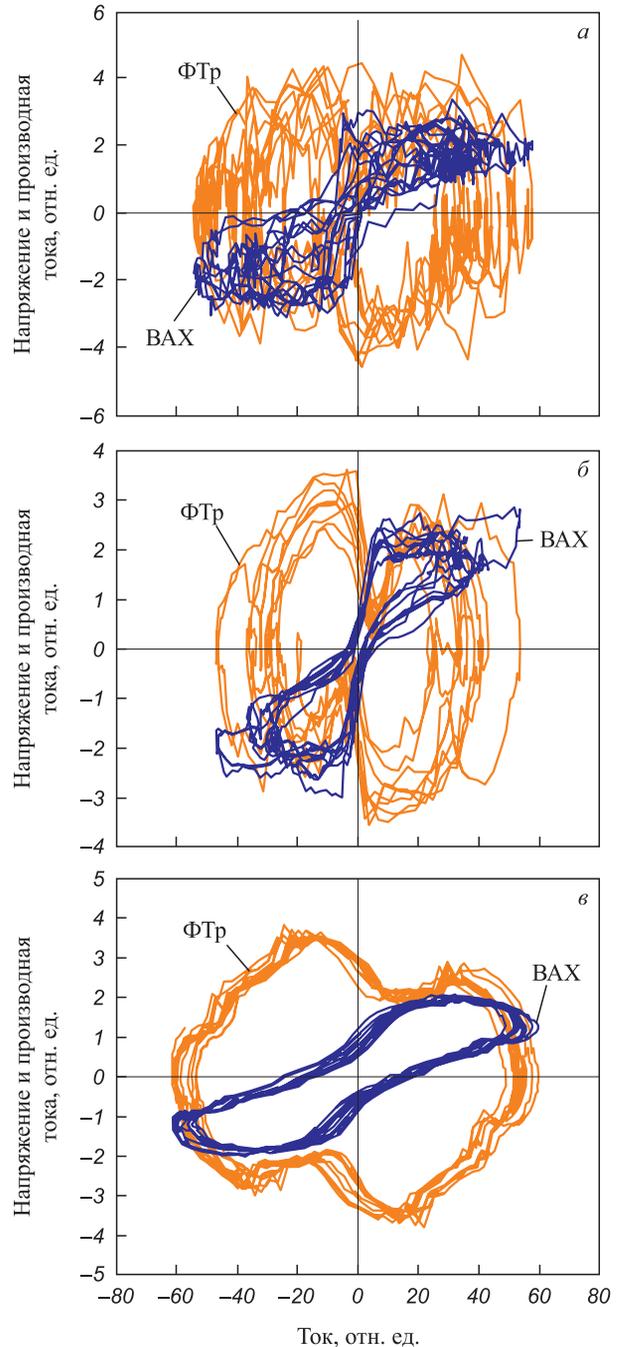


Рис. 2. Изменение динамических характеристик цепи с электрической дугой на стадиях плавления лома (а), горения дуги на ванну жидкого металла (б) и окислительного рафинирования (в)

Fig. 2. Change in dynamic characteristics of a circuit with electric arc at the stages of scrap melting (a), liquid metal bath forming (б) and oxidative refining (в)

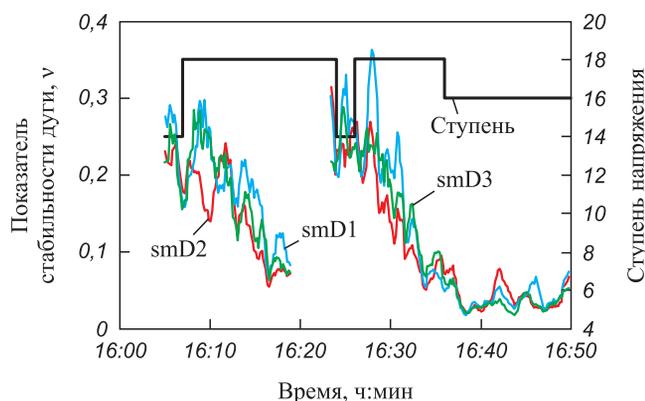


Рис. 3. Изменения показателя нестабильности дуги в ходе плавки

Fig. 3. Changes in arc instability index during melting

Своевременность принятия этих решений позволит сократить время плавки и снизить удельный расход электроэнергии (УРЭ). Отметим также запаздывание стабилизации напряжения на первой фазе. Вследствие асимметрии мощности дуг показатель нестабильности достигает значений, характерных для показателей остальных электродов, только спустя несколько минут. Для компенсации дефицита энергии и ускорения процесса плавления необходимо увеличить расход газа на горелках, работающих в зоне действия запаздывающей фазы.

Что же касается проблемы разработки цифрового двойника подсистемы управления электрическим режимом, то его весьма упрощенную схему можно представить на рис. 4.

В соответствие с данной схемой на вход подсистемы поступают сигналы фазного напряжения и токов в электродах (или при наличии поясов Роговского производных тока) от каждой из фаз. Их нормируют, оцифровывают с помощью аналого-цифрового преобразователя, подвергают дискретному преобразованию Фурье (ДПФ) с последующим определением показателя нестабильности дуги и обрабатывают по методу динамических ВАХ. Выходные характеристики (мощности дуг и пока-

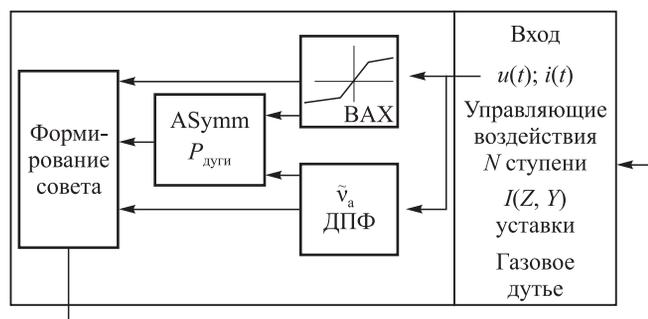


Рис. 4. Упрощенная блок-схема цифрового двойника подсистемы управления электрическим режимом в функции «Совет технологу»

Fig. 4. Simplified block diagram of a digital twin of electrical mode control subsystem in the “Advice to the technologist” function

затель нестабильности) поступают в блок определения асимметрии режима и напрямую в блок формирования совета технологу. Сформированный на основании информации о состоянии объекта совет заключается в указании оператору на применение того или иного управляющего воздействия, а именно: смены ступени напряжения, изменения уставок тока (проводимости или импеданса фазы) или изменения интенсивности газового дутья.

Регулирование электрического режима – важная, но отнюдь не основная задача управления технологическим процессом выплавки стали. Проблема качества выплавляемого продукта всегда имела наиболее высокий приоритет среди основных целей производства. В условиях постоянно снижающегося качества металлолома ее значение только растет.

Качество выплавляемого в сверхмощных печах стального полупродукта в наибольшей степени зависит от реализации окислительного периода плавки. От нее зависят и энергетические показатели процесса, в частности, удельный расход электроэнергии и время работы печи под током. Недоокисленный сплав служит причиной повышенного содержания фосфора в конечном продукте, а избыточное окисление вызывает повышенный расход ферросплавов на стадии обработки в агрегате ковш-печь, увеличение длительности этой стадии и соответствующее повышение расхода кислорода и УРЭ. Поэтому непрерывный контроль степени окисления металлического расплава по ходу рафинировочного периода играет главную роль в управлении технологическим процессом.

На практике определение окисленности металла проводят эпизодически (2 – 3 раза за плавку) с помощью одноразовых электрохимических зондов. Из-за нерегулярности измерений и частых отказов зондов в работе данная методика контроля может быть расценена как оценочная и не отвечающая задачам оперативного контроля. Следовательно, необходим альтернативный метод, основанный на измерении параметра электрической природы, тесно связанного с окисленностью металла [24; 25].

Таким параметром является постоянная составляющая напряжения дуги (ПСНД), возникающая в цепях переменного тока вследствие разности токов термоэлектронной эмиссии из электродов различного химического состава [26 – 29]. Плотность тока термоэлектронной эмиссии описывается формулой Ричардсона-Дэшмана

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_e}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $A$  – эмиссионная постоянная;  $\Phi_e$  – работа выхода электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Как следует из формулы, на разность эмиссионных токов оказывают влияние два фактора: температурный

и химический. Поскольку температуры электродов лимитированы процессами сублимации графита и испарения железа, на разность токов наибольшее влияние оказывает химический фактор – разность работ выхода электронов, тем более, что этот параметр находится в показателе экспоненты. На величину работы выхода достаточно сильно влияют примеси. При этом, если химический состав графита не претерпевает каких-либо изменений по ходу плавки, то металлический расплав всегда содержит примеси, концентрация которых изменяется. Следовательно, в ходе окислительной стадии изменение ПСНД в большинстве случаев будет связано с изменением состава расплава.

Рафинировочная стадия плавки стального полупродукта организована таким образом, что после окончания процесса плавления лома в печь подают шлакообразующие материалы и восстановитель в виде кокса или антрацита. Кокс используют в качестве материала, способствующего вспениванию шлака. При этом рас-

творение углерода в жидком металле вызывает увеличение работы выхода электронов из расплава и соответствующее снижение ПСНД. И наоборот, насыщение расплава кислородом приводит к росту ПСНД.

Таким образом, непрерывный контроль ПСНД в течение окислительного периода плавки позволяет в любой момент времени оценивать окисленность металла в ванне печи. В работах [30 – 32] авторами достаточно полно изложена методика ее определения по величине ПСНД. Здесь дано только краткое описание алгоритма установления взаимосвязи этих характеристик и в качестве результата приводится зависимость степени окисления металлического расплава от расхода кислорода (рис. 5). Далее показано, каким образом он может быть использован в технологии цифрового двойника рафинировочной стадии плавки полупродукта в сверхмощных печах.

Основой двойника математической модели служит статистическая зависимость, связывающая средние значения ПСНД и окисленности металла. Как показано в работе [31], ее график представляет собой довольно широкое облако точек, вытянутое вдоль восходящего линейного тренда. Коэффициент корреляции этой зависимости низкий и не превышает 0,5. Тем не менее, эта аппроксимация использована в модели как статическая характеристика, служащая для задания некоего начального приближения искомой связи.

Приведенная на рис. 5 зависимость изначально представляла собой сглаженный с помощью фильтра скользящего среднего временной ряд, отражающий изменения ПСНД в ходе окислительной стадии процесса и приведенный посредством аппроксимации к кривой Ехр. Исходя из экспоненциального характера процесса декарбонизации сплава и линейности процесса окисления, путем аппроксимации конечных отрезков линейными зависимостями выделяем из исходной характеристики Ехр зависимость  $[O] = f(G_{O_2})$ . При этом, зная

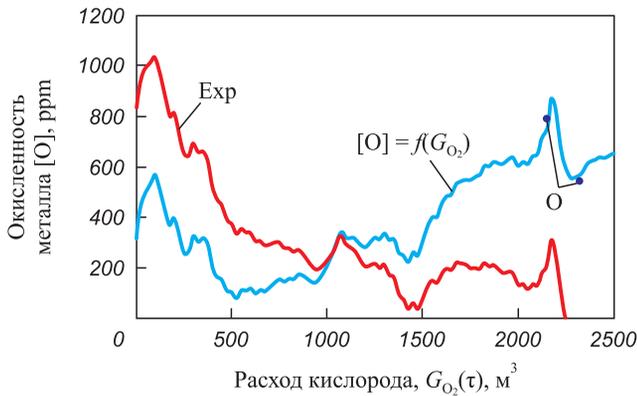


Рис. 5. Зависимость степени окисления металлического расплава от расхода кислорода на стадии рафинирования

Fig. 5. Dependence of metal oxidation degree on oxygen consumption at refining stage

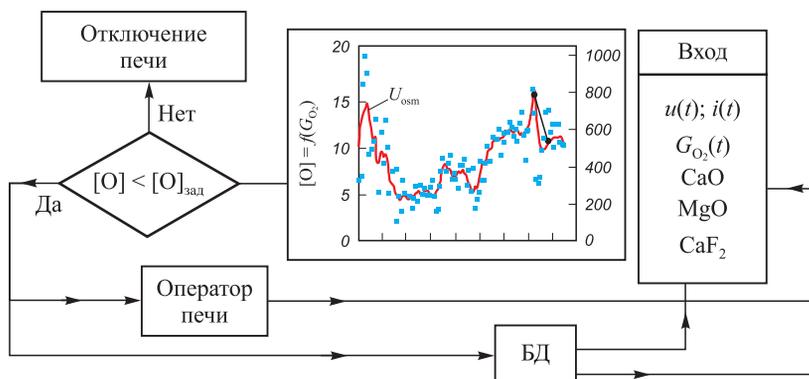


Рис. 6. Упрощенная блок-схема цифрового двойника регулирования параметров окислительной стадии процесса:  $u(t); i(t)$  – входные электрические сигналы фазных напряжений и токов электродов;  $G_{O_2}(t)$  – расход кислорода; CaO, MgO, CaF<sub>2</sub> – магнезиально-известковые добавки, плавиковый шпат; БД – база данных

Fig. 6. Simplified block diagram of a digital twin for regulating the oxidative stage parameters:  $u(t); i(t)$  – input electrical signals of phase voltages and electrode currents;  $G_{O_2}(t)$  – oxygen consumption; CaO, MgO, CaF<sub>2</sub> – magnesia-lime additives; fluor spar; БД – database

изменения параметров кислородного дутья, временную ось преобразовываем в ось расхода кислорода к данному моменту времени.

Отдельными точками на графике представлены значения окисленности расплава, полученные с помощью электрохимических датчиков. Нетрудно заметить, что эти точки, качественно повторяя скачок характеристики, лежали существенно выше исходной кривой Ехр, но после проведенных преобразований практически приняли значения скорректированной зависимости  $[O] = f(G_{O_2})$ . Блок-схема цифрового двойника контроля окисленности металла и регулирования кислородного дутья представлена на рис. 6.

На вход двойника поступают электрические сигналы от всех фаз (мгновенные значения), значение расхода кислорода на горелках, время и масса корректирующих добавок шихтовых материалов. По приведенному алгоритму определяют окисленность расплава, проверяют условие соответствия текущего значения заданному и формируют совет оператору, который принимает решение о применении управляющих воздействий на ход процесса. Параллельно информация заносится в базу данных с целью ее дальнейшей статистической обработки для уточнения настраиваемых параметров алгоритма. Настройка параметров должна быть адаптирована к конкретному агрегату и учитывать качество сырья, особенности печи, характер и величину отклика на применение воздействия и, вполне вероятно, марку выплавляемого продукта.

## Выводы

Рациональное управление электрическим режимом требует более широкого подхода, чем обеспечение надежной работы регулятора мощности на заданных ступенях напряжения и уставках регулируемого параметра. Проблемы асимметрии активной мощности фаз и дуг, не находящие эффективного решения даже при использовании современных регуляторов, целесообразно решать с помощью цифрового двойника подсистемы управления электрическим режимом. Это позволит существенно расширить и круг регулируемых параметров, и функциональные возможности системы управления.

Контроль состояния окислительной стадии процесса выплавки полупродукта и его регулирование наиболее рационально вести с использованием цифрового двойника, основанного на взаимосвязи окисленности металла с постоянной составляющей напряжения дуги и анализе ее зависимости от расхода кислорода газовыми горелками. В этом случае, за счет накопления и систематизации статистической информации в базе данных, время адаптации системы к конкретному агрегату существенно сократится.

Технология цифровых двойников пока еще новое и постоянно развивающееся направление в управлении процессами и агрегатами металлургического

комплекса. Его перспективы в части экономии материально-энергетических ресурсов и повышении технико-экономических показателей производства широки и особо востребованы при переходе от систем автоматизированного контроля к автоматическим регуляторам технологических режимов и отдельных агрегатов сталеплавильного производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. Concept of digital twins at life cycle stages of production systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2020;20(6):815–827. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827>
2. Xiang F., Zhi Z., Jiang G. Digital twins technology and its data fusion in iron and steel product life cycle. In: *2018 IEEE 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Networking, Sensing and Control (ICNSC), 27–29 March 2018*. Zhuhai: 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2018.8361293>
3. Ueda S., Natsui S., Nogami H., Yagi J., Airuama T. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace. *ISIJ International*. 2010;50(7):913–923. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.914>
4. Takatani K., Inada T., Ujisawa Y. Three-dimensional dynamic simulator for blast furnace. *ISIJ International*. 1999;39(1): 15–22. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.15>
5. Matsuzaki S., Nishimura T., Shinotake A., Kunimoto K., Naito M., Sugiyama T. Development of mathematical model of blast furnace. *Nippon Steel Technical Report*. 2006; 94:87–95.
6. Чистякова Т.Б., Новожилова И.В., Козлов В.В., Лактионов Н.В. Программный комплекс для управления электросталеплавильным процессом в дуговой печи. *Известия СПбГТИ(ТУ)*. 2019;51(77):82–89. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2019-51-77-82-89>  
Chistyakova T.B., Novozhilova I.V., Kozlov V.V., Laktionov N.V. Software complex for control of electrosteel process in the arc furnaces. *Izvestiya SPbGTI(TU)*. 2019;51(77):82–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2019-51-77-82-89>
7. Николаев А.А. Повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами: Монография. Магнитогорск: Издательство МГТУ им. Носова; 2015:161.
8. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Мониторинг состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи на основе цифровых технологий. Екатеринбург: АМБ; 2022:156.
9. Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Краснобаев А.В., Онорин О.П., Косаченко И.Е. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки. Екатеринбург: УрФУ; 2011:462.
10. Дмитриев А.Н., Чэнь К., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Математическое моделирование доменного процесса. Екатеринбург: АМБ; 2023:232.
11. Николаев А.А., Дема Р.Р., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С. Разработка алгоритма энергоэффективного управления дуговой сталеплавильной печью с использованием циф-

- рового двойника. *Черные металлы*. 2023;(8):4–12. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.08.01>
- Nikolaev A.A., Dema R.R., Tulupov P.G., Ryzhevol S.S. Development of an algorithm for energy-efficient control of an arc steelmaking furnace using a digital twin. *Chernye metalli*. 2023;(8):4–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2023.08.01>
12. Mironov Yu.M., Mironova A.N. Analysis of characteristics of electric arc furnaces as control objects. *Russian Electrical Engineering*. 2017;88(7):395–399. <https://doi.org/10.3103/S1068371217070124>
  13. Mironov Yu.M., Mironova A.N. Analysis of electrical conditions of electric arc furnaces during different periods of melting. *Metallurgist*. 2021;65:177–184. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01146-5>
  14. Raisz D., Sakulin M., Renner H., Tehlivets Y. Recognition of the operational states in electric arc furnaces. In: *Ninth Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.00EX441)*, 1–4 Oct. 2000, Orlando, Florida USA. IEEE; 2:475–480. <https://doi.org/10.1109/ichqp.2000.897725>
  15. Zhao H., Chen F., Zhao Z. Study about the methods of electrodes motion control in the EAF based on intelligent control. In: *2010 Int. Conf. on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering 24–26 Aug. 2010 Changchun, China*. IEEE; 4:68–71. <https://doi.org/10.1109/cmce.2010.5610213>
  16. Николаев А.А., Корнилов Г.Л., Якимов И.А. Исследование режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Часть 2. *Электротехнология*. 2014;(6):9–13.  
Nikolaev A.A., Kornilov G.L., Yakimov I.A. Investigation of the operating modes of electric arc furnaces in combination with static thyristor reactive power compensators. Part 2. *Elektrometallurgiya*. 2014;(6):9–13. (In Russ.).
  17. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Ячиков И.М., Якимов И.А., Карандаев А.С. Быстродействующая система управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи. *Известия вузов. Электромеханика*. 2017;60(6):45–54. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2017-6-45-54>  
Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Yachikov I.M., Yakimov I.A., Karandaev A.S. High-speed control system for the electric mode of an arc steelmaking furnace. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 2017;60(6):45–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2017-6-45-54>
  18. Yang F., Tang Z., Shen Y., Su L., Yang Z. Parameter determination method of cassie-mayr hybrid arc model based on magnetohydrodynamics plasma theory. *Frontiers in Energy Research*. 2022;10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.808289>
  19. Guardado J.L., Maximov S.G., Melgoza E., Naredo J.L., Moreno P. An improved arc model before current zero based on the combined Mayr and Cassie arc models. *Transactions on Power Delivery*. 2005;20(1):138–142. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.837814>
  20. Chittora P., Singh A., Singh M. Modeling and analysis of power quality problems in electric arc furnace. In: *Annual IEEE India Conf. (INDICON). New Delhi: 17-20 December 2015*. IEEE: 1–6. <https://doi.org/10.1109/INDICON.2015.7443638>
  21. King-Jet T., Yaoming W., Vilathgamuwa D.M. An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr electric arc model for power electronics simulations. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1997;12(3):429–436. <https://doi.org/10.1109/63.575670>
  22. Shakti P.S., Debi P.D., Santosh K.B., Nigamananda R. Instability and fault analysis of arc plasma using advanced signal processing methods. *Review of Scientific Instruments*. 2023;94(10):104710. <https://doi.org/10.1063/5.0161187>
  23. Sivtsov A.V., Sheshukov O.Yu., Tsymbalist M.M., Nekrasov I.V., Egiazar'yan D.K., Makhnutin A.V., Orlov P.P. Steel semiproduct melting intensification in electric arc furnaces using coordinated control of electric and gas conditions: II. On-line control of the state of the charge and melt zones in electric arc furnaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019;2019(6):565–569. <https://doi.org/10.1134/S003602951906017X>
  24. Sivtsov A.V., Egiazar'yan D.K., Sheshukov O.Yu., Tsymbalist M.M., Orlov P.P., Mikheenkov M.A. Method for controlling the parameters and characteristics of an electric arc to evaluate the efficiency of using briquetted metallized scale for steel smelting. *Metallurgist*. 2022;66:11–18. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01296-0>
  25. Sivtsov A.V., Sheshukov O.Yu., Tsymbalist M.M., Nekrasov I.V., Egiazar'yan D.K. The valve effect of an electric arc and problems in controlling electric-arc furnaces *Metallurgist*. 2015;59(5–6):380–385. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0113-6>
  26. Никольский В.Н. Выпрямляющее действие дуги трехфазной сталеплавильной печи. *Электричество*. 1951;(11):34–37.  
Nikol'skii V.N. Rectifying effect of arc of a three-phase steelmaking furnace. *Elektrichestvo*. 1951;(11):34–37. (In Russ.).
  27. Марков Н.А., Баранник О.В. Влияние на работу дуговой сталеплавильной электропечи постоянной составляющей токов электродов. *Электрические аппараты: Труды Куйбышевского политехнического института*. 1970;(2):145–150.  
Markov N.A., Barannik O.V. Effect of a constant component of electrode currents on operation of an electric arc steelmaking furnace. *Elektricheskie apparaty: Tr. Kuibyshevskogo politekhnicheskogo instituta*. 1970;(2):145–150. (In Russ.).
  28. Педро А.А., Суслов А.П. Вентильный эффект в электродной печи. *Цветные металлы*. 2012;(12):91–95.  
Pedro A.A., Suslov A.P. Valve effect in an electrode furnace. *Tsvetnye metalli*. 2012;(12):91–95. (In Russ.).
  29. Белоглазов И.И., Педро А.А. О природе вентильного эффекта в рудно-термической печи. *Электротехнология*. 2016;(2):20–27.  
Beloglazov I.I., Pedro A.A. On valve effect in an ore-thermal furnace. *Elektrometallurgiya*. 2016;(2):20–27. (In Russ.).
  30. Пат. RU 2485185. Способ контроля окисленности шлака и металла при выплавке сплавов на основе железа в электродуговых печах переменного тока / Сивцов А.В., Цымбалист М.М., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В.; заявлено 13.09.2011; опубликовано 20.06.2013, Бюллетень № 17.
  31. Сивцов А.В., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Цымбалист М.М., Егиазарьян Д.К., Орлов П.П. О некоторых особенностях применения постоянной составляющей напряжения дуги для контроля окисленности металла на стадии рафинирования стали. *Электротехнология*. 2020;(1):2–8.

Sivtsov A.V., Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Tsybmalist M.M., Egiazar'yan D.K., Orlov P.P. On some features of application of arc voltage constant component to control metal oxidation during steel refining. *Elektrometallurgiya*. 2020;(1):2–8. (In Russ.).

32. Сивцов А.В., Шешуков О.Ю., Егиазарьян Д.К., Цымбалист М.М., Лобанов Д.А. Регулирование шлакового режима выплавки стали в электродуговой печи на основе контроля электрических параметров в ходе окислитель-

ного периода плавки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(9):619–628.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-619-628>

Sivtsov A.V., Sheshukov O.Yu., Egiazar'yan D.K., Tsybmalist M.M., Lobanov D.A. Slag mode regulation in electric arc furnace based on electrical parameters control during melting oxidation period. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022;65(9):619–628. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-619-628>

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Андрей Владиславович Сивцов**, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории проблем техногенных образований, Институт металлургии Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-7840-1088

E-mail: aws2004@mail.ru

**Олег Юрьевич Шешуков**, д.т.н., главный научный сотрудник, Институт металлургии Уральского отделения РАН; профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-2452-826X

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

**Денис Константинович Егиазарьян**, к.т.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт металлургии Уральского отделения РАН; доцент кафедры металлургии железа и сплавов Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-9833-7191

E-mail: avari@mail.ru

**Михаил Михайлович Цымбалист**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-9570-040X

E-mail: cherknimne@yandex.ru

**Павел Петрович Орлов**, к.т.н., инженер, старший преподаватель кафедры металлургии железа и сплавов института новых материалов и технологий, Уральский Федеральный Университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0003-4616-306X

E-mail: p.p.orlov@urfu.ru

**Andrei V. Sivtsov**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of Technogenic Formations Problems, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-7840-1088

E-mail: aws2004@mail.ru

**Oleg Yu. Sheshukov**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-2452-826X

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

**Denis K. Egiazar'an**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Technogenic Formations Problems, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy of Iron and Alloys of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-9833-7191

E-mail: avari@mail.ru

**Mikhail M. Tsybmalist**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-9570-040X

E-mail: cherknimne@yandex.ru

**Pavel P. Orlov**, Cand. Sci. (Eng.), Engineer, Senior Lecturer of the Chair of Metallurgy of Iron and Alloys of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0003-4616-306X

E-mail: p.p.orlov@urfu.ru

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**А. В. Сивцов** – общее руководство исследованием, теоретические изыскания, планирование эксперимента, проведение промышленных испытаний, написание статьи.

**О. Ю. Шешуков** – постановка задачи исследований, планирование промышленных испытаний, корректировка и редактирование статьи.

**Д. К. Егиазарьян** – проведение лабораторных исследований, обсуждение результатов.

**М. М. Цымбалист** – программное обеспечение экспериментальных исследований, проведение промышленных испытаний.

**П. П. Орлов** – проведение лабораторных исследований.

**A. V. Sivtsov** – general scientific guidance, conducting theoretical research, planning experiments, conducting industrial tests, writing the text.

**O. Yu. Sheshukov** – setting the research task, planning industrial tests, correcting and editing the article.

**D. K. Egiazaryan** – conducting laboratory research, discussing the results.

**M. M. Tsybmalist** – software for experimental research, conducting industrial tests.

**P. P. Orlov** – conducting laboratory research.

Поступила в редакцию 28.02.2024

После доработки 09.04.2024

Принята к публикации 19.06.2024

Received 28.02.2024

Revised 09.04.2024

Accepted 19.06.2024