



Оригинальная статья

УДК 669.054.8

DOI 10.17073/0368-0797-2022-9-619-628

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2394>

РЕГУЛИРОВАНИЕ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ХОДЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА ПЛАВКИ

А. В. Сивцов¹, О. Ю. Шешуков^{1,2}, Д. К. Егиазар'ян^{1,2},
М. М. Цымбалист¹, Д. А. Лобанов¹

¹ Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

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

Аннотация. Представлены результаты наблюдений за ходом окислительной стадии выплавки стали в ДСП-135, проведенных с помощью автоматизированной системы контроля электрических характеристик. В рабочем пространстве печи выделены три основные зоны, различающиеся по агрегатному состоянию находящихся в них материалов: дуговой разряд, расплав и вспененный шлак. Приведены данные о распределении электрической мощности по этим зонам. Отмечена асимметрия активных мощностей дуг под отдельными электродами, обусловленная асимметрией короткой сети. Показано, что основными факторами, влияющими на сопротивление расплава и шлака, являются продувка кислородом и перемещение электродов. Исследовано влияние подачи магнезиального флюса на сопротивление расплава. Замечено, что этим подачам соответствует резкий рост и последующее постепенное снижение сопротивления, а время усвоения добавок не превышает одной минуты. Приведены среднестатистические по отдельным плавкам электрические параметры зон рабочего пространства печи ДСП-135. Проведено сравнение характера изменения мощности дугового разряда и изменения температуры расплава. Отмечено совпадение профилей изменения этих характеристик – росту мощности дуги соответствует рост температуры расплава. Попытка корреляции содержания FeO в шлаке с мощностью дуги не дала положительного результата. Отмечено, что контроль этого параметра по изменению электрических параметров зон дуги и шлака вследствие подавляющего влияния на них интенсивного кислородного дутья, перемешивания расплава и перемещения электродов не отвечает критерию достоверности. Однако данную методику следует проверить в условиях рафинирования стали в агрегате ковш–печь.

Ключевые слова: электрическая дуга, дуговая сталеплавильная печь, шлаковый режим, контроль технологического процесса, окисленность металла, основность шлака

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук № 122020100125-6.

Для цитирования: Сивцов А.В., Шешуков О.Ю., Егиазар'ян Д.К., Цымбалист М.М., Лобанов Д.А. Регулирование шлакового режима выплавки стали в электродуговой печи на основе контроля электрических параметров в ходе окислительного периода плавки // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 9. С. 619–628. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-619-628>

Original article

SLAG MODE REGULATION IN ELECTRIC ARC FURNACE BASED ON ELECTRICAL PARAMETERS CONTROL DURING MELTING OXIDATION PERIOD

A. V. Sivtsov¹, O. Yu. Sheshukov^{1,2}, D. K. Egiazar'yan^{1,2},
M. M. Tsymbalist¹, D. A. Lobanov¹

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

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

Abstract. The results of observation of steelmaking oxidation stage at EAF-135 were analyzed with automated control system of the electrical characteristics. There are three main zones in the furnace working space, which differ by the aggregate state of the materials in them: arc discharge, melt and foamed slag. The distribution data of electric power over the furnace zones is given. There is active powers asymmetry of the arcs under single electrodes affected by asymmetry of the short network. It is shown that the main factors impacting the melt and slag resistances are oxygen blow and electrode movement. The authors studied the influence of magnesia flux feeds on the melt resistance. These feeds correspond to a sharp increase and a subsequent gradual decrease in resistance, and the time for assimilation of additives does not exceed one minute. The average electrical parameters of the working space zones are given for the EAF-135 at single heats. A comparison was made of the nature of change in the arc discharge power and the change in the melt temperature. The profiles match of changes in these characteristics to an increase in the arc power corresponds to increase in the melt temperature. An attempt to correlate FeO content in the slag with the arc power did not give a positive result. However, this methodology should be tested under conditions of steel refining in a ladle-furnace unit. It is noted that the parameter control at changing of the electrical parameters of the arc and slag zones due to the overwhelming influence of intense oxygen blast, melt mixing and electrode displacement does not meet the reliability criterion.

Keywords: electric arc, electric arc furnace, slag mode, process control, metal oxidation, slag basicity

Funding: The work was carried out according to the state task of the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No. 122020100125-6.

For citation: Sivtsov A.V., Sheshukov O.Yu., Egiazar'yan D.K., Tsymbalist 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, vol. 65, no. 9, pp. 619–628. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-619-628>

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное управление процессом выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) состоит в согласованном регулировании целевых параметров основных технологических режимов и при значительных их отклонениях требует своевременного вмешательства в его ход. При этом набор управляющих воздействий на процесс весьма ограничен и, по сути, включает в себя лишь автоматический регулятор мощности с функцией задания силы тока и полного сопротивления нагрузки (импеданса), а также корректирующие добавки шихтовых материалов.

Основными технологическими режимами плавки являются электрический режим, тесно с ним связанный режим перемещения электродов, а также шлаковый режим. Важнейшая задача электрического режима состоит в подаче требуемой электрической мощности и ее распределении – равномерном по электродам (фазам) и рациональном по зонам рабочего пространства печи [1 – 3]. Посадка электродов и соответствующие ей длины дуг должны обеспечивать необходимую на текущей стадии плавки плотность теплового потока и минимально возможную интенсивность испарения металлического расплава [4 – 6].

Шлаковый режим используют как на стадии окислительного рафинирования металла в ДСП, так и на восстановительной стадии в агрегате ковш-печь (АКП). От его исполнения во многом зависят показатели качества целевого продукта. Энергетические потребности этих стадий существенно ниже затрат электроэнергии в период плавления – поступающая в печь мощность должна лишь обеспечивать требуемую температуру расплава. Задачи и способы ведения указанных технологических режимов различны. Однако их общей чертой является то, что дуги горят под слоем шлака и электрически шунтированы им [7 – 9].

Для наблюдений за ходом процесса и сбора информации о параметрах технологических режимов авторами разработана автоматизированная система контроля (АСК) электрических параметров [10]. Для получения информации об электрическом режиме печи достаточно измерения и регистрации сигналов напряжения и производных токов, отбираемых от каждой из фаз печи с помощью поясов Роговского. Приведение сигналов к удобному для аналого-цифрового преобразования виду осуществляется с помощью нормирующих преобразователей. Для цифрового преобразования использован аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с частотой дискретизации 100 кГц, а для обработки цифровой информации – персональный компьютер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования были проведены на сверхмощной ДСП-135 «Северского трубного завода» в течение суток (25 плавов). Измерения осуществляли с интервалом 10 с и их цифровые реализации заносили в файлы данных. Далее по алгоритму метода динамических вольт-амперных характеристик (ВАХ) [10 – 11] их обрабатывали при помощи специально разработанного программного обеспечения. Данные о технологических параметрах, в частности, о составе металла и шлака, окисленности, температуре и основности, были взяты из паспортов плавов.

Характерной чертой любого электрометаллургического агрегата является асимметрия вторичного токоподвода (короткой сети). В результате различия длин и сопротивлений токоведущих шин, поступающая непосредственно на отдельные электроды мощность распределена неравномерно. Поэтому различаются и активные мощности, выделяемые дугами, – мощность дуги под электродом с самым длинным токоподводом всегда ниже остальных.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведен характер изменения активных мощностей фаз (P) и дуг (P_d) в течение окислительного периода плавки. Как можно видеть, мощность первой фазы на протяжении всей стадии ниже мощностей остальных. Среднее значение мощности фазы за данный период составило 27,6 МВт, а отклонения от среднего для каждой из фаз соответственно равнялись $-2,30; 0,79$ и $1,50$ МВт или $-8,36; 2,90$ и $5,46$ % от средней мощности. Таким образом, отклонение мощности первой фазы представляет существенную величину.

Динамика мощностей дуг носит более хаотичный характер, что обусловлено постоянными изменениями электрических сопротивлений зон расплава и шлака,

сопряженных с отдельными электродами. Более того, если мощности фаз колеблются примерно около постоянного уровня, то уровень колебаний мощности дуг изменяется в более широких пределах. Однако среднее значение мощности дуг при этом равно 11,62 МВт, а абсолютные и относительные отклонения мощностей дуг соответственно составляют $-0,558; -0,178; 0,736$ МВт и $-4,80; -1,53; 6,33$ % от среднего значения. Дефицит мощности дуги на первой фазе и здесь достаточно высок ($-4,8$ %), т. е. пониженная нагрузка первой фазы предопределила и пониженное значение ее дуговой мощности.

На рис. 2 приведены временные ряды, описывающие изменение суммарной активной мощности печи и ее распределение по зонам дуги, расплава и шлака

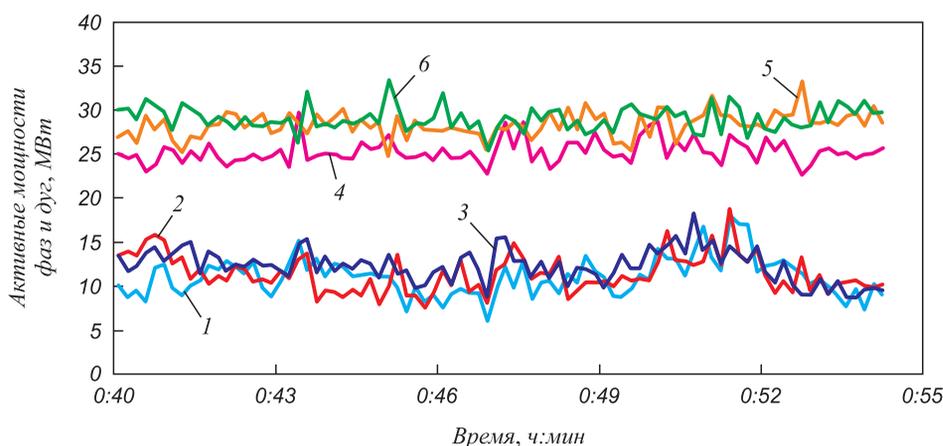


Рис. 1. Активные мощности фаз и дуг в течение окислительного периода плавки в ДСП:
 1 – P_{d1} ; 2 – P_{d2} ; 3 – P_{d3} ; 4 – P_1 ; 5 – P_2 ; 6 – P_3

Fig. 1. Active powers of phases and arcs during the melting oxidation period in EAF:
 1 – P_{d1} ; 2 – P_{d2} ; 3 – P_{d3} ; 4 – P_1 ; 5 – P_2 ; 6 – P_3

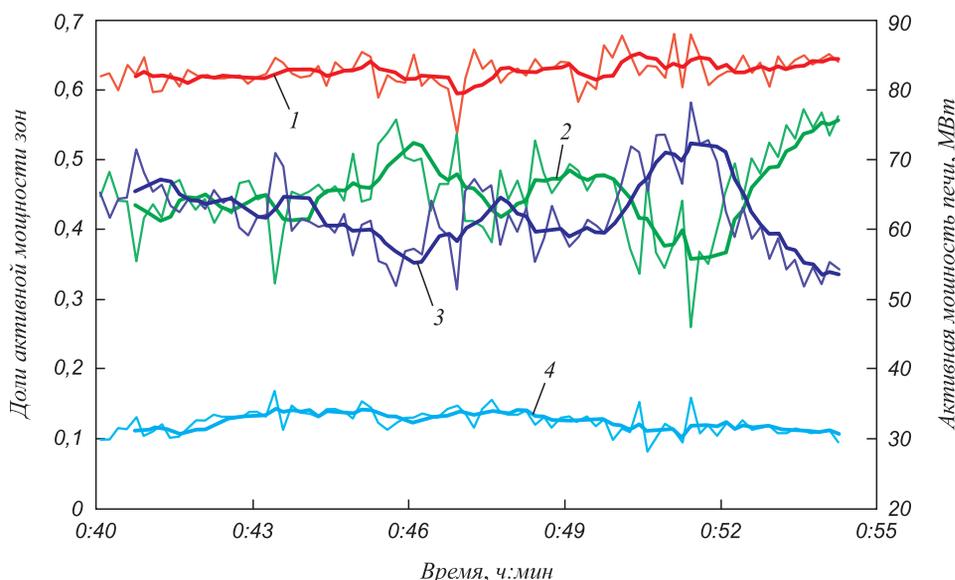


Рис. 2. Активная мощность печи (1) и ее распределение по зонам расплава (2), дуги (3) и шлака (4)

Fig. 2. Active power of the furnace (1) and its distribution over zones of the melt (2), arc (3) and slag (4)

на окислительной стадии плавки. Здесь и далее жирными линиями представлены характеристики, сглаженные по пяти точкам с помощью фильтра скользящего среднего.

Видно, что даже при незначительном изменении вводимой в печь электроэнергии, доли мощности дуги и расплава существенно изменяются, а их временные ряды являются зеркальным отражением друг друга. При этом изменения доли мощности, выделяющейся в шлаке, на этом фоне не столь заметны. Это является следствием работы автоматического регулятора мощности, который, поддерживая на постоянном уровне импеданс фазы, вызывает перераспределение мощности между расплавом и дуговым разрядом. Истинной же причиной служат процессы в зоне расплава, вызывающие изменение его сопротивления.

Отметим также, что и для остальных плавков характер распределения мощности практически не отличается от характеристик, представленных на данных рисунках.

Процессы, протекающие в ванне печи, оказывают непосредственное влияние на величины сопротивлений зон расплава и шлака [12 – 14]. Так, изменение содержания в металлическом расплаве углерода вызывает соответствующие изменения удельного и общего электрического сопротивления зоны расплава. Присадки, корректирующие добавки шихтовых материалов и особенно продувка расплава, приводящая к его перемешиванию и насыщению кислородом, также оказывают влияние на данный параметр. Это и служит основной причиной реакции регулятора в виде перемещения электродов.

С другой стороны, перемещение электродов оказывает влияние на сопротивление шлакового слоя, зави-

сящее от глубины их погружения и площади контакта со шлаком. Это сопротивление зависит от множества факторов и, главным образом, от качества вспенивания шлака – чем более вспененный шлак, тем больше воздушных пузырьков содержится в шлаке и тем выше его сопротивление [15 – 17].

Кроме того, на сопротивление шлака оказывают влияние содержание угольной пыли и его химический состав. Однако влияние этих факторов, вероятно, менее значимо, чем влияние уровня шлака и площади его контакта с электродом.

На рис. 3 приведены характеристики изменения сопротивления фазы, расплава и шлака в течение окислительного периода плавки.

Наименьшим изменениям подвержено сопротивление фазы, поскольку регулятор, поддерживая полное сопротивление на постоянном уровне, попутно стабилизирует и этот параметр. Его среднее значение и разброс данных (стандартное отклонение) составляют $8,86 \pm 0,65$, т. е. относительное отклонение равно 7,4 %, что свидетельствует о вполне удовлетворительном качестве регулирования. Особого внимания заслуживает непрерывный рост сопротивления расплава в конце плавки, происходящий вследствие повышения окисленности металла.

Данные об изменении параметров электрического режима и характеристик шлака в ходе проведенных в течение суток плавков представлены в таблице.

В течение периода окислительного рафинирования металла в печь подают присадочные материалы и корректирующие добавки шихты. Как правило, в качестве присадки используют высокотемпературный магнезиальный флюс, а корректирующей добавкой служит известь. Данные материалы оказывают влияние на со-

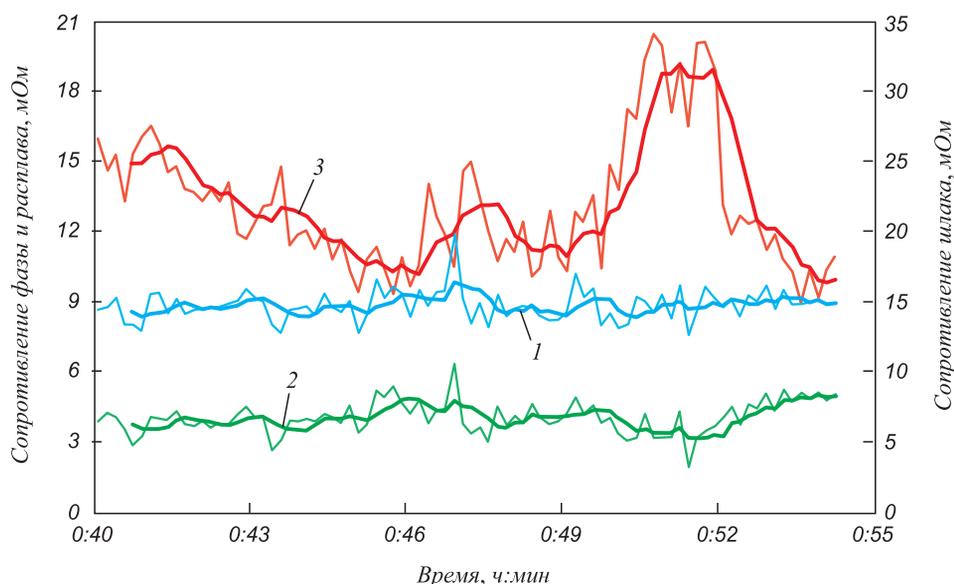


Рис. 3. Изменение сопротивления фазы (1), расплава (2) и шлака (3) по ходу плавки

Fig. 3. Resistance change of the phase (1), melt (2) and slag (3) during melting

Среднестатистические электрические параметры зон рабочего пространства и некоторые свойства шлака печи ДСП-135 Северского трубного завода

Average electrical parameters of working space zones and some slag properties of EAF-135 at Seversk Tube Plant

Номер шлавки	Сопротивление, мОм			Мощность, МВт			Доля мощности			Шлак Содержание [FeO], %	
	фазы R_0	расплава R_{p0}	шлака $R_{шп0}$	фазы P_0	расплава P_{p0}	шлака $P_{шп0}$	расплава q_p	дуги q_d	шлака $q_{шп}$		
2232	8,86 ± 0,65	4,04 ± 0,70	21,92 ± 4,67	82,66 ± 2,20	37,54 ± 4,82	34,87 ± 4,95	10,26 ± 1,38	0,454 ± 0,059	0,421 ± 0,056	0,124 ± 0,016	21,84
2233	9,08 ± 0,61	5,16 ± 0,72	17,78 ± 3,07	84,73 ± 2,32	48,13 ± 5,44	28,25 ± 3,95	8,36 ± 1,20	0,568 ± 0,059	0,334 ± 0,048	0,099 ± 0,015	29,14
2234	9,07 ± 0,72	4,91 ± 0,89	18,11 ± 4,77	85,28 ± 2,75	46,04 ± 7,06	29,88 ± 5,82	9,36 ± 1,43	0,539 ± 0,078	0,351 ± 0,069	0,110 ± 0,016	28,24
2235	9,41 ± 1,00	4,72 ± 0,84	22,03 ± 7,28	84,81 ± 3,39	42,83 ± 7,93	32,55 ± 6,78	9,42 ± 1,84	0,505 ± 0,090	0,384 ± 0,080	0,111 ± 0,022	32,69
2236	9,53 ± 1,45	4,45 ± 1,11	22,69 ± 9,85	85,89 ± 3,86	40,68 ± 10,57	34,16 ± 8,68	11,05 ± 4,11	0,474 ± 0,123	0,398 ± 0,098	0,129 ± 0,046	23,65
2237	9,50 ± 1,27	4,67 ± 0,83	22,07 ± 7,00	84,90 ± 3,34	41,83 ± 6,02	33,11 ± 5,56	9,97 ± 2,07	0,493 ± 0,068	0,390 ± 0,064	0,117 ± 0,022	16,65
2238	9,48 ± 1,54	4,31 ± 1,01	23,82 ± 8,20	84,51 ± 4,62	39,05 ± 9,71	35,14 ± 7,34	10,32 ± 3,39	0,462 ± 0,112	0,416 ± 0,082	0,122 ± 0,038	19,36
2239	10,04 ± 2,64	4,39 ± 1,43	24,89 ± 10,55	83,52 ± 7,50	37,33 ± 10,82	34,74 ± 6,56	11,45 ± 5,39	0,445 ± 0,120	0,418 ± 0,078	0,137 ± 0,060	н/д
2240	9,18 ± 0,81	4,39 ± 1,09	22,54 ± 7,09	84,72 ± 3,57	40,60 ± 9,81	34,23 ± 7,89	9,89 ± 3,24	0,479 ± 0,113	0,404 ± 0,092	0,116 ± 0,036	21,00
2241	9,23 ± 0,92	4,51 ± 0,78	23,70 ± 5,24	85,22 ± 3,69	41,57 ± 6,20	34,60 ± 5,92	9,06 ± 2,22	0,489 ± 0,078	0,405 ± 0,060	0,106 ± 0,023	18,06
2242	9,32 ± 1,42	4,01 ± 0,87	25,40 ± 6,10	82,38 ± 4,45	35,61 ± 6,59	36,41 ± 5,59	10,36 ± 3,10	0,433 ± 0,080	0,441 ± 0,058	0,125 ± 0,035	27,38
2243	9,35 ± 1,29	4,27 ± 1,05	24,03 ± 7,02	82,20 ± 4,09	38,02 ± 9,75	34,34 ± 7,47	9,83 ± 4,17	0,464 ± 0,121	0,417 ± 0,083	0,119 ± 0,047	25,83
2244	8,95 ± 0,66	4,29 ± 0,86	20,87 ± 5,22	80,68 ± 4,14	38,99 ± 8,63	31,97 ± 5,25	9,72 ± 2,40	0,480 ± 0,096	0,398 ± 0,072	0,122 ± 0,042	25,92
2245	8,89 ± 0,62	4,38 ± 0,70	21,87 ± 3,84	81,80 ± 2,30	40,14 ± 5,17	32,84 ± 4,46	8,82 ± 1,21	0,491 ± 0,061	0,402 ± 0,054	0,108 ± 0,015	26,78
2246	9,02 ± 0,80	4,93 ± 0,85	18,85 ± 7,05	82,18 ± 2,40	45,10 ± 7,93	28,55 ± 6,49	8,52 ± 1,87	0,548 ± 0,093	0,348 ± 0,081	0,104 ± 0,022	29,66
2247	8,95 ± 0,96	4,01 ± 0,80	25,58 ± 4,92	81,62 ± 3,55	36,67 ± 6,99	35,93 ± 5,47	9,02 ± 2,64	0,450 ± 0,085	0,440 ± 0,060	0,110 ± 0,032	32,14
2248	9,10 ± 1,21	4,61 ± 0,75	20,39 ± 6,55	82,26 ± 4,23	41,65 ± 5,82	31,24 ± 6,14	9,37 ± 1,54	0,507 ± 0,072	0,379 ± 0,065	0,114 ± 0,019	32,83
2249	9,10 ± 0,95	4,68 ± 0,97	20,83 ± 7,20	84,21 ± 3,17	43,51 ± 9,01	31,55 ± 7,57	9,14 ± 2,46	0,517 ± 0,105	0,375 ± 0,088	0,109 ± 0,030	31,46
2250	9,31 ± 1,25	4,32 ± 1,19	23,10 ± 7,97	82,27 ± 4,95	39,15 ± 12,22	33,14 ± 7,71	9,98 ± 3,80	0,472 ± 0,135	0,405 ± 0,099	0,122 ± 0,049	33,21
2251	9,01 ± 0,70	4,65 ± 0,93	21,25 ± 5,30	82,47 ± 2,54	42,40 ± 7,38	31,42 ± 5,91	8,65 ± 1,85	0,514 ± 0,085	0,381 ± 0,073	0,105 ± 0,022	37,32
2252	9,15 ± 1,24	4,78 ± 0,84	19,57 ± 7,20	81,99 ± 3,57	42,99 ± 7,19	29,73 ± 6,16	9,27 ± 1,36	0,524 ± 0,079	0,363 ± 0,076	0,113 ± 0,016	25,84
2253	9,18 ± 1,03	5,27 ± 1,21	15,87 ± 7,74	83,87 ± 3,28	48,37 ± 10,46	26,04 ± 8,85	9,46 ± 2,49	0,577 ± 0,123	0,310 ± 0,103	0,113 ± 0,028	22,36
2254	9,51 ± 1,64	5,14 ± 1,31	18,69 ± 8,87	82,22 ± 4,55	44,93 ± 12,09	27,19 ± 8,49	10,10 ± 4,87	0,545 ± 0,141	0,332 ± 0,106	0,123 ± 0,060	17,91

противление зон печи, по меньшей мере, во время их усвоения расплавом и шлаком.

На рис. 4 показано влияние подач магнезиального флюса и извести на сопротивление расплава, где слева можно видеть, что подачам соответствует резкий рост и последующее постепенное снижение сопротивления. Время усвоения добавок не превышает одной минуты. Аналогичную картину наблюдаем и справа, на характеристике R_p , относящейся к другой плавке. Здесь, кроме прочего, была применена корректирующая добавка извести (500 кг), позволившая повысить основность шлака. После ее подачи заметен рост сопротивления, который, вероятно, не связан напрямую с этой подачей, а вызван окислением расплава в результате его продувки кислородом.

Сопротивление шлака $R_{шл} = 21,9 \pm 4,67$ мОм в несколько (5 – 6) раз выше сопротивления расплава $R_p = 4,04 \pm 0,70$ мОм и изменяется в более широком интервале (21,3 % против 17,3 %). Его изменения в основном являются реакцией электрода на изменение R_p . При снижении сопротивления расплава электрод идет вверх, стремясь за счет увеличения сопротивления дуги компенсировать рост тока, обусловленный снижением сопротивления фазы. При этом площадь контакта шлака с электродом уменьшается, а $R_{шл}$ растет. Увеличение R_p приводит к обратному эффекту, т. е. характеристика $R_{шл}$ изменяется соответственно перемещению электрода, а какие-либо отклонения могут быть вызваны резкими изменениями уровня и качества вспененного шлака.

На этом фоне все изменения, связанные с составом шлака, практически незаметны. Поэтому использование сопротивления шлака для контроля содержания в нем какого-либо из оксидов, например, FeO, возможным не представляется. Вероятно, для контроля подобных параметров в ходе плавки в АКП, где шлак не под-

вержен вспениванию и перемешиванию, такой подход найдет применение.

В подтверждение на рис. 5 приведены графики взаимных зависимостей сопротивления, шлаковой доли мощности и содержания FeO в шлаке, построенные по данным таблицы, в которую сведены среднестатистические значения электрических параметров и некоторые свойства шлаков отдельных плавов.

Если на зависимости шлаковой доли мощности еще проглядывается какая-то слабая тенденция к снижению при росте содержания FeO в шлаке, то зависимость $R_{шл}$ представлена облаком точек, а их линейная корреляция прямой, параллельной оси абсцисс. Та же ситуация характерна и для связи содержания FeO с долей мощности и сопротивлением расплава.

Однако имеется еще один фактор, оказывающий влияние на содержание FeO в шлаке. Электрическая дуга является эффективным преобразователем электрической энергии в теплоту. В отличие от равномерно распределенного по объему зон расплава и шлака джоулева тепла ($I^2R\Delta t$), электрические дуги, суммарная мощность которых может превышать 40 МВт, передают энергию в окружающую среду посредством излучения на поверхности этих зон. Такой интенсивный нагрев сравнительно тонкого слоя материала, ограниченного в объеме и локализованного в близлежащих к дугам областях, зачастую вызывает повышенное испарение железа и потери целевого материала. Рассмотрим в этом аспекте влияние мощности дуги на температуру металлического расплава.

В ходе каждой плавки, ближе к ее окончанию, регулярно (4 – 5 раз за плавку) с помощью специальных зондов проводят измерения температуры и окисленности расплава. На рис. 6 представлены фрагменты ряда плавов, во время которых были проведены измерения температуры. На графиках отражены полученные тем-

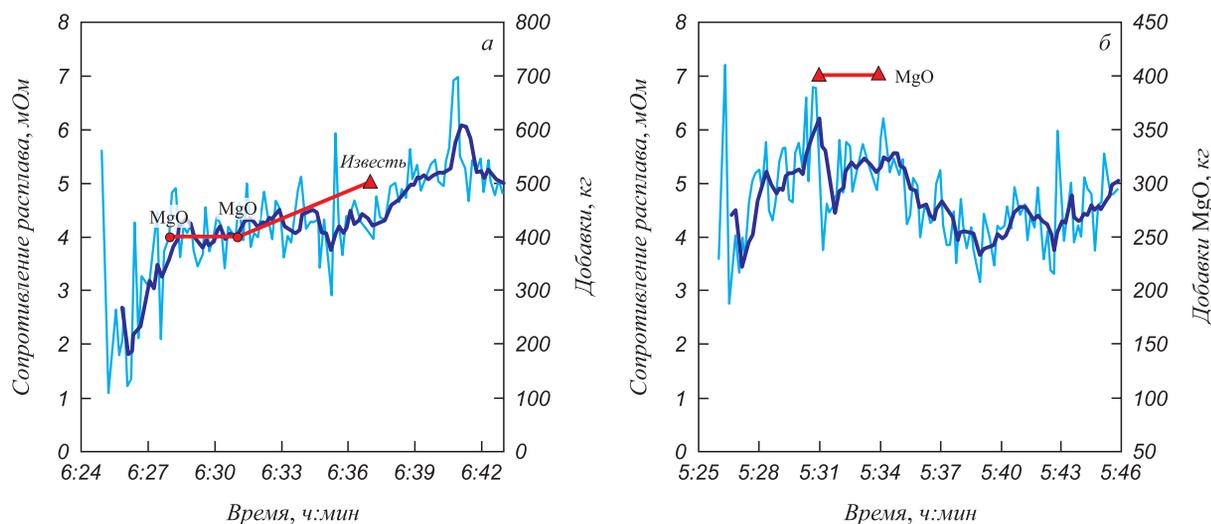


Рис. 4. Влияние на сопротивление расплава присадок MgO и извести

Fig. 4. MgO and lime additions effect on melt resistance

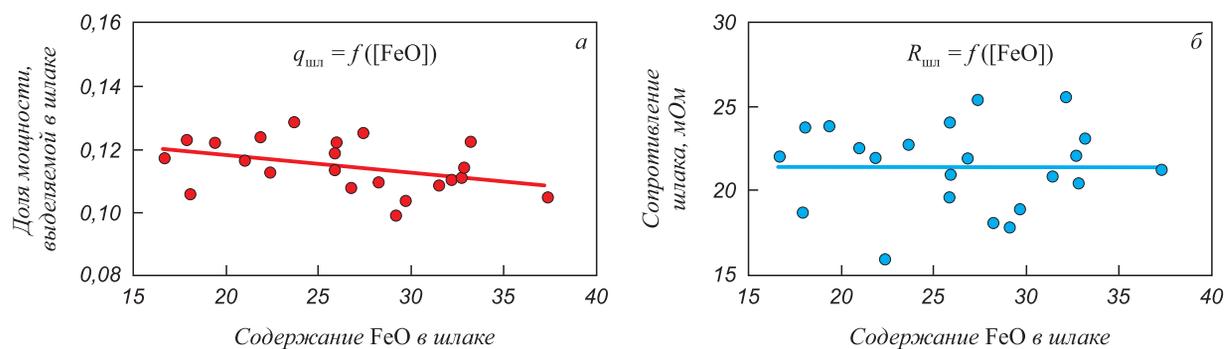


Рис. 5. Взаимосвязь электрических параметров шлаковой зоны и содержания FeO в шлаке

Fig. 5. Relationship between electrical parameters of slag zone and FeO content in the slag

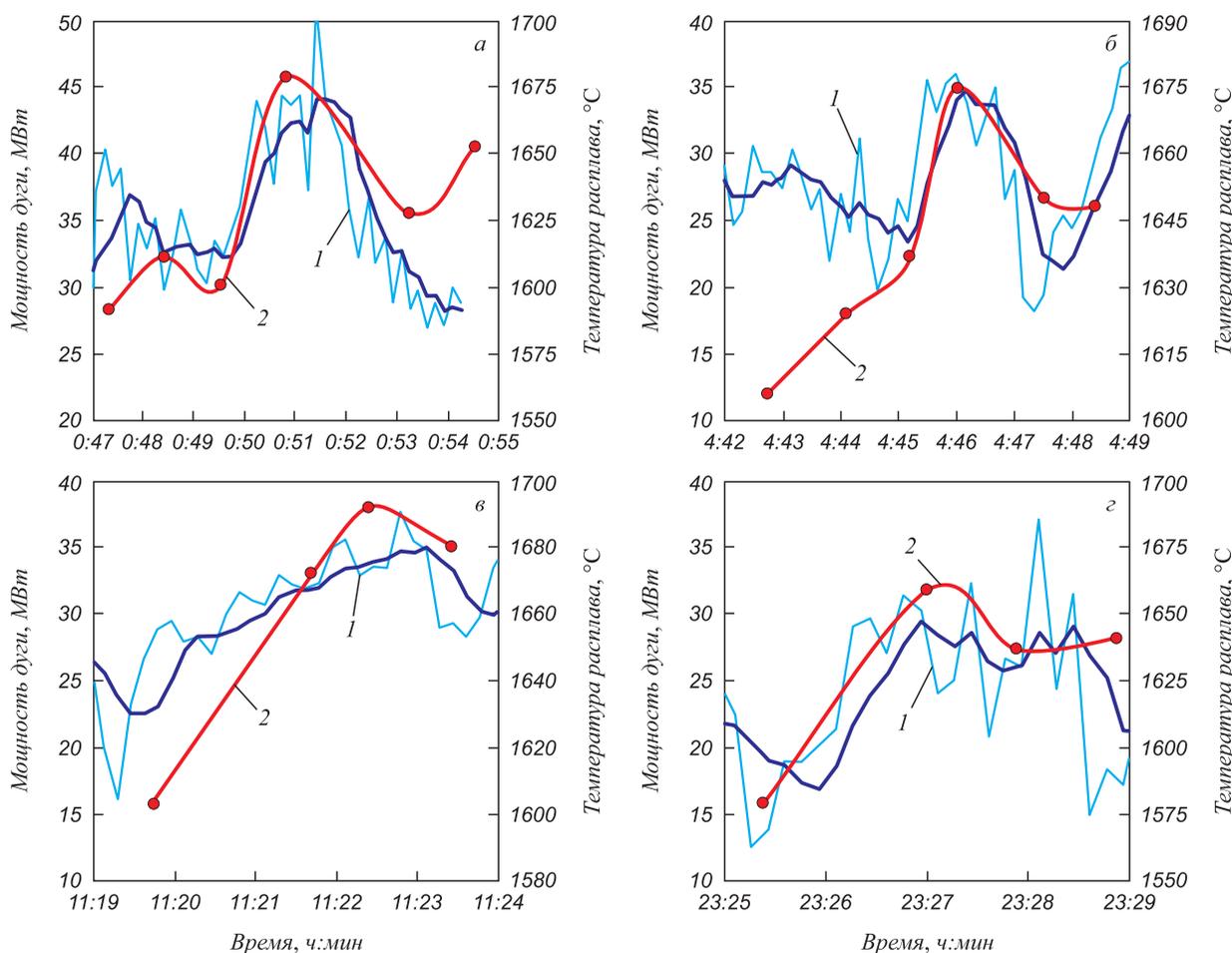


Рис. 6. Характеристики мощности дуги и температуры расплава в отдельные периоды плавки:
1 – $P_{до}$; 2 – T

Fig. 6. Characteristics of arc power and melt temperature in certain periods of melting:
1 – $P_{до}$; 2 – T

пературные профили и характеристики изменения мощности дуги. Обратим внимание, что ход кривых температуры совпадает с ходом сглаженной характеристики мощности дуги.

Фрагменты были подобраны таким образом, чтобы на них присутствовали максимумы температуры. Для всех плавок интервал изменения температуры не пре-

вышает 100 град., но достаточен для перегрева и интенсификации испарения металла. В этом аспекте следовало бы ожидать и корреляции содержания FeO в шлаке с мощностью дуги. Однако, как и на рис. 5, взаимная зависимость этих параметров имеет вид облака, т. е. какой-либо приемлемой для задач контроля связи не существует.

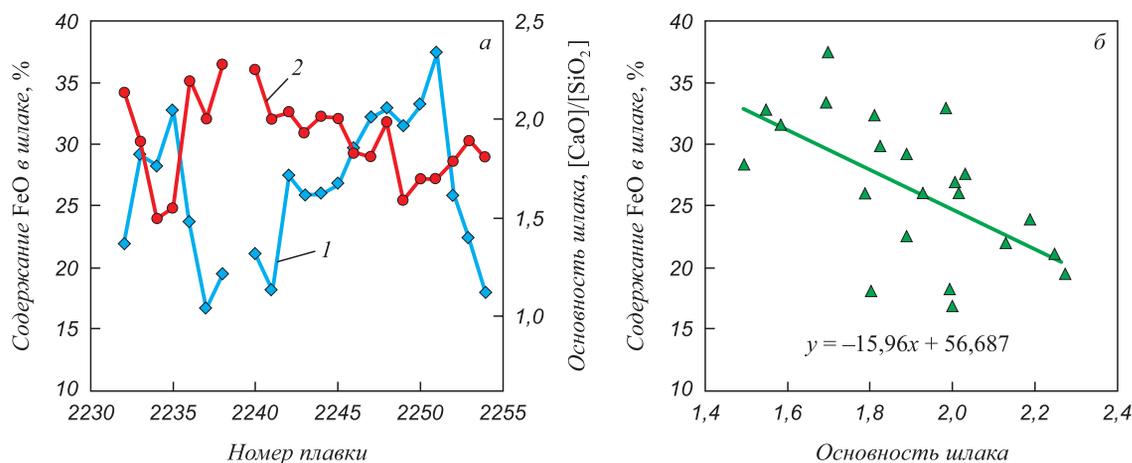


Рис. 7. Взаимосвязь содержания FeO (1) и основности шлака (2)

Fig. 7. Relationship between FeO (1) content and slag basicity (2)

Причинами большого разброса точек здесь служат более сильные факторы – интенсивная продувка металлической ванны кислородом и связанная с ней нестабильность сопротивления расплава. Тем не менее, нет оснований для отказа от применения такого подхода к контролю содержания FeO в шлаке в других металлургических агрегатах, в частности, в АКП, где способы перемешивания расплава не предполагают его интенсивного окисления.

В условиях ДСП можно оценить содержание FeO в шлаке по его основности, с ростом которой содержание FeO снижается. Основность шлака, в свою очередь, может быть определена по величине постоянной составляющей напряжения дуги [18 – 20]. На рис. 7 представлены временные ряды, отражающие изменение этих параметров по плавкам, и их взаимосвязь. Характерной особенностью этого графика является большой разброс точек, хотя в области повышенных значений основности (больше 2) он уже не столь значителен.

На столь высокую дисперсию, безусловно, оказывает существенное влияние качество исходной шихты и, главным образом, содержание в ломе оксидов железа. Широкий интервал изменения основности свидетельствует об ошибках в расчете состава шихты, обусловленных частыми изменениями качества сырья [21 – 23].

Еще одной причиной разброса может служить неравномерность кислородного дутья.

И, хотя непрерывный контроль содержания FeO по ходу плавки не представляется пока реально достижимым,

анализ дополнительной информации о технологических параметрах и операциях позволит уточнить эту весьма важную для управления процессом характеристику.

Выводы

Анализ параметров зон ванны ДСП и распределения по ним электрической мощности существенно расширяет объем информации о текущем состоянии технологического процесса. Оперативный контроль шлакового режима выплавки стали позволяет вносить исправления в его ход. Своевременное применение корректирующих добавок к шихте и перераспределение энергии между зонами и фазами печи являются эффективными мерами воздействия на показатели процесса. Вследствие подавляющего влияния на сопротивление зон расплава и шлака интенсивного кислородного дутья, перемешивания расплава и перемещения электродов, контроль содержания отдельных оксидов в шлаке по этим параметрам не отвечает требованию достоверности. На основе того, что при отсутствии основных факторов влияния на электрические параметры зон печи, таких как продувка кислородом и интенсивное перемешивание металла, удастся получить корреляцию электрических характеристик с содержанием отдельных оксидов в шлаке, применение приведенной методики анализа к процессам в агрегате ковш-печь вероятно позволит устранить этот недостаток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. Москва: Теплотехник, 2007. 528 с.
2. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. Санкт-Петербург: Лань, 2014. 384 с.
3. Dong Q., Zhang J. Simulation of fluid flow and heat transfer in plasma ARC region of AC electric ARC furnace // CFD Modeling and

1. Dudkin D.A., Kisilenko V.V. *Modern Technology of Steelmaking*. Moscow: Teplotekhnika, 2007, 528 p. (In Russ.).
2. Makarov A.N. *Heat Transfer in Electric Arc and Flame Metallurgical Furnaces and Energy Units*. St. Petersburg: Lan', 2014, 384 p. (In Russ.).
3. Dong Q., Zhang J. Simulation of fluid flow and heat transfer in plasma ARC region of AC electric ARC furnace. In: *CFD Modeling and*

- Simulation in Materials Processing. 2016. P. 35–42.
<https://doi.org/10.1002/9781119274681.ch5>
4. Lee B., Sohn I. Review of innovative energy savings technology for the electric arc furnace // JOM. 2014. Vol. 66. No. 9. P. 1581–1594.
<https://doi.org/10.1007/s11837-014-1092-y>
 5. Bai E.-w. Minimizing energy cost in electric arc furnace steel making by optimal control designs // Journal of Energy. 2014. Vol. 2014. Article 620695. <https://doi.org/10.1155/2014/620695>
 6. Balan R., Maties V., Hancu O., Stan S., Ciprian L. Modeling and control of an electric arc furnace // Proceedings of the 15th Mediterranean Conf. on Control and Automation, Athens, Greece, July 2007. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MED.2007.4433737>
 7. Миронов Ю.М. Установки электрошлаковой металлургической технологии. Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2018. 404 с.
https://doi.org/10.12737/monography_5a40ac170cdab6.31947003
 8. Toulouevski Y.N., Zinurov I.Y. Modern steelmaking in electric arc furnaces: history and development // Innovation in Electric Arc Furnaces: Scientific Basis for Selection. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 2013. P. 1–24.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-36273-6_1
 9. Тулуевский Е.Н., Зинуров И.Ю. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2010. 347 с.
 10. Сивцов А.В., Шешуков О.Ю., Цымбалист М.М., Некрасов И.В., Махнутин А.В., Егиазарьян Д.К., Орлов П.П. Интенсификация выплавки стального полупродукта в дуговых сталеплавильных печах на основе согласованного регулирования электрического и газового режимов. Часть I. Особенности теплообмена и строения рабочего пространства в дуговых сталеплавильных печах // Электрометаллургия. 2018. № 11. С. 2–9.
 11. Сивцов А.В., Шешуков О.Ю., Цымбалист М.М., Некрасов И.В., Махнутин А.В. Егиазарьян Д.К., Орлов П.П. Интенсификация выплавки стального полупродукта в дуговых сталеплавильных печах на основе согласованного регулирования электрического и газового режимов. Часть II: Оперативный контроль состояния зон шихты и расплава в дуговых сталеплавильных печах // Электрометаллургия. 2018. № 11. С. 3–9.
<https://doi.org/10.31044/1684-5781-2018-0-12-3-9>
 12. Макаров А.Н., Окунева В.В., Кузнецов А.В. Влияние высоты слоя шлака, состава газа, емкости печей на КПД дуг и теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Влияние высоты слоя шлака и емкости печи на КПД дуг // Металлург. 2020. № 10. С. 11–18.
 13. Макаров А.Н., Крупнов А.В. Влияние высоты слоя шлака, состава газа, емкости печей на КПД дуг и теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. Часть II. Влияние высоты слоя шлака на величину теплового излучения дуг на стены // Металлург. 2020. № 11. С. 24–31.
 14. Миронов Ю.М., Петров В.Г. Особенности тепловой работы дуговых печей литейного класса // Электрометаллургия. 2009. № 7. С. 23–26.
 15. Миронов Ю.М. Об оптимизации мощности трансформаторов дуговых сталеплавильных печей // Электрометаллургия. 2019. № 11. С. 9–14. <https://doi.org/10.31044/1684-5781-2019-0-11-9-14>
 16. Makarov A.N., Singh K.D. The effect of arc length on heat exchange and electric power consumption in electric arc steel-making furnaces (EAF) // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1888. Article 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1888/1/012026>
 17. Tomažič S., Andonovski G., Škrjancand I., Logar V. Data-driven modelling and optimization of energy consumption in EAF // Metals. 2022. Vol. 12. No. 5. Article 816.
<https://doi.org/10.3390/met12050816>
 18. Sheshukov O.Yu., Nerkašov I.V., Mikheenkov M.A., Egiazar'yan D.K., Sivtsov A.V., Chencov V.P., Gertsberg G.E. Unit ladle-furnace: Slag forming conditions and stabilization // Technogen – 2017. Conference Proceedings. 2017. P. 70–75.
<https://doi.org/10.18502/kms.v2i2.949>
- Simulation in Materials Processing. 2016, pp. 35–42.
<https://doi.org/10.1002/9781119274681.ch5>
4. Lee B., Sohn I. Review of innovative energy savings technology for the electric arc furnace. JOM. 2014, vol. 66, no. 9, pp. 1581–1594.
<https://doi.org/10.1007/s11837-014-1092-y>
 5. Bai E.-w. Minimizing energy cost in electric arc furnace steel making by optimal control designs. Journal of Energy. 2014, vol. 2014, article 620695. <https://doi.org/10.1155/2014/620695>
 6. Balan R., Maties V., Hancu O., Stan S., Ciprian L. Modeling and control of an electric arc furnace. Proceedings of the 15th Mediterranean Conf. on Control and Automation, Athens, Greece, July 2007, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MED.2007.4433737>
 7. Mironov Yu.M. Installations of Electroslag Metallurgy: Monograph. Moscow: INFRA-M, 2018, 404 p. (In Russ.).
https://doi.org/10.12737/monography_5a40ac170cdab6.31947003
 8. Toulouevski Y.N., Zinurov I.Y. Modern steelmaking in electric arc furnaces: history and development. In: Innovation in Electric Arc Furnaces: Scientific Basis for Selection. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 2013, pp. 1–24.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-36273-6_1
 9. Tuluevski Yu.N., Zinurov I.Yu. Innovations for Electric Arc Furnaces. Scientific Basis of Choice. Novosibirsk: NSTU, 2010, 347 p. (In Russ.).
 10. Sivtsov A.V., Sheshukov O.Y., Tsybalist M.M., Nekrasov I.V., Makhnutin A.V., Egiazar'yan D.K., Orlov P.P. Steel semiproduct melting intensification in electric arc furnaces using coordinated control of electric and gas conditions: I. Heat exchange and structure of the electric arc furnace laboratory. Russian Metallurgy (Metally). 2018, vol. 2018, no. 11, pp. 1108–1113.
<https://doi.org/10.1134/S0036029518120142>
 11. Sivtsov A.V., Sheshukov O.Yu., Tsybalist M.M., Nekrasov I.V., Makhnutin A.V., Egiazar'yan D.K., 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, vol. 2019, no. 6, pp. 565–569.
<https://doi.org/10.1134/S003602951906017X>
 12. Makarov A.N., Okuneva V.V., Kuznetsov A.V. Effect of the slag layer thickness, gas composition, and furnace capacity on the arc efficiency and heat transfer in arc furnaces. Part I. Effect of the slag thickness and furnace capacity on arc efficiency. Metallurgist. 2020, vol. 64, no. 9-10, pp. 987–996.
<https://doi.org/10.1007/s11015-021-01080-6>
 13. Makarov A.N., Krupnov A.V. Effect of the slag layer thickness, gas composition, and furnace capacity on the arc efficiency and heat transfer in arc furnaces. Part II. Effect of the slag thickness on the magnitude of arc heat radiation incident to the walls. Metallurgist. 2021, no. 11-12, pp. 1121–1129.
<https://doi.org/10.1007/s11015-021-01097-x>
 14. Mironov Yu.M., Petrov V.G. Thermal losses and power efficiency of arc furnaces of a foundry class. Russian metallurgy (Metally). 2010, no. 12, pp. 650–654.
 15. Mironov Yu.M. Optimization of the electric arc furnace transformer power. Russian metallurgy (Metally). 2020, vol. 2020, no. 6, pp. 654–658. <https://doi.org/10.1134/S0036029520060142>
 16. Makarov A.N., Singh K.D. The effect of arc length on heat exchange and electric power consumption in electric arc steel-making furnaces (EAF). Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1888, article 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1888/1/012026>
 17. Tomažič S., Andonovski G., Škrjancand I., Logar V. Data-driven modelling and optimization of energy consumption in EAF. Metals. 2022, vol. 12, no. 5, article 816.
<https://doi.org/10.3390/met12050816>
 18. Sheshukov O.Yu., Nerkašov I.V., Mikheenkov M.A., Egiazar'yan D.K., Sivtsov A.V., Chencov V.P., Gertsberg G.E. Unit ladle-furnace: Slag forming conditions and stabilization. In: Technogen – 2017. Conference Proceedings. 2017, pp. 70–75.
<https://doi.org/10.18502/kms.v2i2.949>

19. Сивцов А.В., Шешуков О.Ю., Цымбалист М.М., Некрасов И.В., Егиазарьян Д.К. Вентильный эффект электрической дуги и проблемы управления дуговыми печами // *Металлург*. 2015. № 5. С. 36–40.
20. Saboohi Y., Fathi A., Škrjanc I., Logar V. Optimization of the electric arc furnace process // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 66. No. 10. P. 8030–8039. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2883247>
21. Миронов Ю.М. Энерготехнологические соотношения в дуговых сталеплавильных печах // *Электromеталлургия*. 2021. №. 4. С. 2–21. <https://doi.org/10.31044/1684-5781-2021-0-4-2-10>
22. Lee B., Ryu J.W., Sohn I. Effect of hot metal utilization on the steel-making process parameters in the electric arc furnace // *Steel Research International*. 2015. Vol. 86. No. 3. P. 302–309. <https://doi.org/10.1002/srin.201400157>
23. Czapla M., Karbowniczek M., Michaliszyn A. The optimisation of electric energy consumption in the electric arc furnace // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2008. Vol. 53. No. 2. P. 559–565.
19. 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, vol. 59, no. 5-6, pp. 380–385. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0113-6>
20. Saboohi Y., Fathi A., Škrjanc I., Logar V. Optimization of the electric arc furnace process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019, vol. 66, no. 10, pp. 8030–8039. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2883247>
21. Mironov Yu.M. Energy-technological relationships in electric arc furnaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021, vol. 2021, no. 12, pp. 1538–1543. <https://doi.org/10.1134/S003602952112017X>
22. Lee B., Ryu J.W., Sohn I. Effect of hot metal utilization on the steelmaking process parameters in the electric arc furnace. *Steel Research International*. 2015, vol. 86, no. 3, pp. 302–309. <https://doi.org/10.1002/srin.201400157>
23. Czapla M., Karbowniczek M., Michaliszyn A. The optimisation of electric energy consumption in the electric arc furnace. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2008, vol. 53, no. 2, pp. 559–565.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Владиславович Сивцов, д.т.н., ведущий научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН
E-mail: aws2004@mail.ru

Andrei V. Sivtsov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: aws2004@mail.ru

Олег Юрьевич Шешуков, д.т.н., главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН; профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
E-mail: o.j.sheshukov@urfu.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
E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Денис Константинович Егиазарьян, к.т.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт металлургии УрО РАН; доцент Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: [0000-0002-9833-7191](https://orcid.org/0000-0002-9833-7191)
E-mail: avari@mail.ru

Denis K. Egiazar'yan, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Laboratory, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Assist. Prof. of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: [0000-0002-9833-7191](https://orcid.org/0000-0002-9833-7191)
E-mail: avari@mail.ru

Михаил Михайлович Цымбалист, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН
E-mail: cherknimne@yandex.ru

Mikhail M. Tsymbalist, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: cherknimne@yandex.ru

Даниил Андреевич Лобанов, к.т.н., научный сотрудник Группы проблем техногенных отходов, Институт металлургии УрО РАН
E-mail: summerdanny@yandex.ru

Daniil A. Lobanov, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Group of Technogenic Waste Problems, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: summerdanny@yandex.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. В. Сивцов – формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, научное руководство, анализ результатов исследований.

A. V. Sivtsov – formation of the main concept, goals and objectives of the research, scientific guidance, analysis of the research results.

О. Ю. Шешуков – анализ результатов исследований, формулировка выводов, научное руководство.

O. Yu. Sheshukov – analysis of the research results, conclusion formation, scientific guidance.

Д. К. Егиазарьян – формулировка выводов, проведение расчетов.

D. K. Egiazar'yan – calculations, formation of the conclusions.

М. М. Цымбалист – разработка программного обеспечения, проведение расчетов.

M. M. Tsymbalist – calculations, software development.

Д. А. Лобанов – подготовка текста, доработка текста, корректировка выводов.

D. A. Lobanov – preparation and revision of the text, correction of the conclusions.

Поступила в редакцию 15.06.2022
После доработки 18.07.2022
Принята к публикации 26.08.2022

Received 15.06.2022
Revised 18.07.2022
Accepted 26.08.2022