РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ПОЛУПРОДУКТА В ДСП ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ*

А. А. БАБЕНКО¹, д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, babenko251@gmail.ru; М. В. УШАКОВ², начальник подготовки производства; А. В. МУРЗИН², канд. техн. наук, главный металлург; Л. Ю. МИХАЙЛОВА¹, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов
(¹ Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, Россия, г. Екатеринбург; ² ПАО “Северский трубный завод”, Россия, г. Полевской)

Аннотация. Технология формирования магнезиальных шлаков обеспечивает повышение эффективности использования электрической энергии и стойкости футеровки печи за счет раннего формирования устойчивой шлаковой пены и снижения агрессивного воздействия шлака на огнеупоры. В то же время практика работы под магнезиальными шлаками показывает, что чрезмерное их перенасыщение оксидом магния сопровождается гетерогенизацией, снижением рафинирующих свойств и ухудшением отдельных технологических и технико-экономических показателей процесса. Поэтому исследование и разработка технологии формирования по периодам плавки в ДСП магнезиальных шлаков рационального состава является актуальной проблемой. Приведены результаты численного моделирования влияния температуры и химического состава шлаков по периодам плавки в ДСП на концентрацию насыщения MgO, анализа рафинирующих свойств магнезиальных шлаков в зависимости от степени насыщения MgO, исследования вязкости магнезиальных шлаков в зависимости от основности и концентрации насыщения MgO и изучения влияния химического и фазового состава магнезиальных шлаков на эффективность их вспенивания. Результаты теоретических и экспериментальных исследований легли в основу разработки рационального состава шлаков по периодам плавки в ДСП и технологических приемов их формирования. Внедрение в ЭСПЦ ПАО “Северский трубный завод” разработанной технологии с оставлением на “болоте” высокомагнезиальных шлаков предыдущей плавки и присадкой в окислительный период в два приема высокомагнезиального флюса “Магма” обеспечило рекордную стойкость огнеупорной футеровки ДСП, превышающую 1900 плавов за кампанию, и высокий уровень технологических и технико-экономических показателей процесса.

Ключевые слова: электросталеплавильное производство, формирование магнезиальных шлаков, концентрация насыщения MgO, рафинирующие свойства шлаков, химический и фазовый состав, стойкость футеровки, технологические и технико-экономические показатели.

Ссылка для цитирования: Бабенко А.А., Ушаков М.В., Мурзин А.В., Михайлова Л.Ю. Разработка и освоение технологии выплавки полупродукта в ДСП под магнезиальными шлаками // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 8. С. 936–943.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-8-936-943

ELABORATION AND MASTERING OF TECHNOLOGY OF SEMI-PRODUCT SMELTING IN EAF UNDER MAGNESIA SLAGS

A. A. BABENKO¹, HD (Tech.), Chief Res. Ass., Lab. of steel and ferroalloys, babenko251@gmail.ru; M. V. USHAKOV², Head of production preparation; A. V. MURZIN², PhD (Tech.), Chief Metallurgist; L. YU. MIKHAILOVA¹, PhD (Tech.), Res. Ass., Lab. of steel and ferroalloys
(¹ Institute of Metallurgy, Ural branch of Russian Academy of Sciences, Russia, Ekaterinburg; ² PAO “Seversky pipe plant”, Russia, Polevskoi)

Abstract. Technology of magnesia slags forming provides increase of electric energy utilization efficiency and furnace lining resistance due to early formation of stable slag foam and decrease of aggressive slag impact on the lining. At the same time the practice of operation with magnesia slags shows, that excessive over-saturation them by magnesium oxide results in heterogenization, decrease of refining properties and deterioration of some technological, technical and economic process indices. Therefore, study and elaboration technology of rational composition magnesia slags forming by periods of a heating in EAF is an actual task. Results of numerical simulation of slag temperature and chemical composition effect on MgO saturation concentration during different melting periods in EAF presented. Besides, results of analysis of refining abilities of magnesia slags depending on MgO saturation degree also presented study of magnesia slags viscosity effect depending on MgO basicity and saturation concentration, as well as magnesia slag chemical and phase composition effect on foaming efficiency. Results of theoretical and experimental study were used as a base of elaboration rational slag composition by periods of melting in the EAF and technological

* Работа выполнена по государственному заданию ИМет УрО РАН.

techniques of their formation. A technology elaborated and implemented at PAO “Seversky pipe plant” EAF shop by leaving some amount of high-magnesia slags of the previous heat and addition in two stages high-magnesia flux of “Magma” grade during the oxidizing period. This resulted in a record resistance of the refractory EAF lining, exceeding 1900 heats within a campaign and a high level of technological, technical and economic process indices.

Keywords: EAF-base production, magnesia slag forming, MgO saturation concentration, slag refining properties, chemical and phase composition, lining performance, technological, technical and economic indices.

For citation: Babenko A.A., Ushakov M.V., Murzin A.V., Mikhailova L.Yu. Elaboration and mastering of technology of semi-product smelting in EAF under magnesia slags. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 8, pp. 936–943. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-8-936-943

В настоящее время одной из основных тенденций улучшения технологических и технико-экономических показателей в электросталеплавильном производстве является работа под магнезиальными шлаками [1–4]. Технология формирования магнезиальных шлаков обеспечивает повышение эффективности использования электрической энергии и стойкости футеровки печи за счет раннего формирования устойчивой шлаковой пены и снижения агрессивного воздействия шлака на огнеупоры. Например, по данным авторов работы [4], плавка под магнезиальными шлаками снижает расход электрической энергии на 5–10 %, а огнеупоров — на 30–60 %.

К важнейшим свойствам шлака, которые влияют на его “вспениваемость”, относят химический состав, основность, вязкость и наличие взвешенных твердых частиц, которые могут являться центрами зарождения газовых пузырей и стабилизировать пену [1–3, 5–8].

Но практика работы под магнезиальными шлаками показывает, что чрезмерное их насыщение оксидом магния сопровождается гетерогенизацией, снижением рафинирующих свойств и ухудшением отдельных технологических и технико-экономических показателей процесса [4, 9–11]. Поэтому исследование и разработка технологии формирования по периодам плавки в ДСП магнезиальных шлаков рационального состава, обеспечивающих раннее

формирование устойчивой шлаковой пены, обладающих низким агрессивным воздействием на огнеупорную футеровку и сохраняющих высокие рафинирующие свойства, является актуальной проблемой.

Для решения поставленной задачи был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, включающих:

- численное моделирование влияния температуры и химического состава шлака по периодам плавки в ДСП на концентрацию насыщения оксидом магния;
- анализ рафинирующих свойств магнезиальных шлаков в зависимости от химического состава и степени насыщения оксидом магния;
- исследование вязкости магнезиальных шлаков в зависимости от основности и концентрации насыщения оксидом магния;
- исследование влияния химического и фазового состава магнезиальных шлаков на эффективность их вспенивания.

Для исследования влияния температуры металла, основности и окисленности шлаков на концентрацию насыщения оксидом магния на опытных плавках были отобраны пробы металла и шлака с одновременным замером температуры металла по расплавлению и перед выпуском плавки. Средние значения химического состава шлака и температуры металла по периодам плавки приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ШЛАКОВ И ТЕМПЕРАТУРА МЕТАЛЛА

TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION OF SLAGS AND METAL TEMPERATURE

Момент отбора проб	Массовая доля компонентов, %							CaO/SiO ₂	Температура металла, °C
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	P ₂ O ₅		
По расплавлению	22,0	9,7	7,3	3,68	5,6	31,4	0,27	2,3	1587
Перед выпуском	18,2	8,2	10,0	3,2	5,4	34,4	0,20	2,2	1662

Используя метод симплексных решеток планирования эксперимента [12, 13], модель расчета концентрации насыщения шлака оксидом магния, основанную на анализе диаграмм состояния, содержащих MgO [14], и адаптированную по известным экспериментальным данным к реальной оксидной системе [15, 16], построили

для температур 1550 и 1650 °C математические модели, описывающие влияние состава шлака на концентрацию насыщения оксидом магния. Результаты математического моделирования представлены графически в виде диаграмм состав-свойство (концентрация насыщения MgO) на рис. 1.

Рис. 1. Диаграммы концентрации насыщения оксидом магния шлаков системы CaO-FeO-SiO_2 , содержащих, %: 7 MnO , 0,3 P_2O_5 , 4 Al_2O_3 (сплошные линии — MgO_n , %; пунктирные — основность шлака)

Fig. 1. Diagrams of saturation concentration by magnesium oxide of CaO-FeO-SiO_2 system slags, containing, %: 7 MnO , 0,3 P_2O_5 , 4 Al_2O_3 (continuous lines — MgO_n , %; dotted lines — basicity of slag)

На диаграммах выделены области, соответствующие химическому составу и основности реальных шлаков периода плавления (см. рис. 1, а) и окислительного периода (см. рис. 1, б).

Из приведенных диаграмм видно, что в изучаемой области химического состава шлаков явно прослеживается влияние температуры и основности на концентрацию насыщения оксидом магния. При температуре 1550 °C (см. рис. 1, а) в интервале основности шлака 1,5–2,0 и окисленности 25–40 % наблюдается максимальная концентрация насыщения шлаков оксидом магния, достигающая 9–10 %. Увеличение основности шлака до 2,5–3,0 сопровождается снижением концентрации насыщения шлаков оксидом магния до 7 %. При этом в зависимости от основности шлака наблюдается либо отсутствие влияния окисленности на концентрацию насыщения оксидом магния, либо проявление основных свойств монооксида железа, обеспечивающего сохранение концентрации насыщения оксидом магния, достигаемой в области повышенной основности. Причем чем выше основность шлака, тем длиннее участок диаграммы, где практически отсутствует влияние окисленности шлака на концентрацию насыщения оксидом магния. Например, формирование шлака основностью 1,6 обеспечивает концентрацию насыщения шлака оксидом магния 10 %, которая практически не зависит от окисленности шлака в диапазоне 25–27 % FeO (см. рис. 1, а). Положитель-

ное влияние окисленности шлака на концентрацию насыщения оксидом магния начинает проявляться при содержании FeO 28–31 % и основности 1,5. С увеличением основности формируемых шлаков увеличивается диапазон уровня окисленности, который не оказывает влияния на концентрацию насыщения оксидом магния. При формировании шлаков, например основностью 2,7, влияние окисленности (в диапазоне 25–36 %) на концентрацию насыщения оксидом магния практически отсутствует и начинает проявляться в диапазоне повышенной до 37–40 % окисленности шлака.

Аналогичные закономерности влияния основности и окисленности шлака на концентрацию насыщения оксидом магния прослеживаются и в области повышенной до 1650 °C температуры (см. рис. 1, б).

Рафинирующие свойства высокомагнезиальных шлаков оценивали по равновесной концентрации фосфора в металле $[\text{P}]_p$ под шлаками известного состава, рассчитанной с использованием модели, описанной в работе [16], и полноте протекания реакции окисления фосфора в металле $[\text{P}]_f/[\text{P}]_p$ по периодам плавки в ДСП.

Результаты термодинамического моделирования влияния окисленности, основности и степени насыщения шлаков оксидом магния на рафинирующие свойства в период плавления и в окислительный период плавки приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. ВЛИЯНИЕ ОКИСЛЕННОСТИ, ОСНОВНОСТИ И СТЕПЕНИ НАСЫЩЕНИЯ ШЛАКА ОКСИДОМ МАГНИЯ $(\text{MgO})_{\text{ф}}/(\text{MgO})_{\text{н}}$ НА РАФИНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА

TABLE 2. INFLUENCE OF OXIDABILITY, BASICITY AND SLAG SATURATION DEGREE BY MAGNESIUM OXIDE $(\text{MgO})_{\text{ф}}/(\text{MgO})_{\text{н}}$ ON REFINING PROPERTIES

Период плавки	$(\text{MgO})_{\text{ф}}/(\text{MgO})_{\text{н}}$	$t_{\text{мет}}, ^\circ\text{C}$	B	(FeO), %	$[\text{P}]_{\text{ф}}, \%$	$[\text{P}]_{\text{р}}, \%$	$[\text{P}]_{\text{ф}}/[\text{P}]_{\text{н}}$
Период плавления	0,93	1589	1,7	24,9	0,0060	0,0036	1,66
	1,24	1588	1,9	26,4	0,0070	0,0040	1,76
Период окисления	0,8	1653	2,0	27,2	0,0054	0,0050	1,10
	1,34	1643	1,8	25,7	0,0087	0,0066	1,38

Анализ полученных данных показал, что шлаки периода плавления сохраняют достаточно высокие рафинирующие свойства независимо от степени насыщения шлаков MgO, однако наблюдаемая полнота протекания реакции окисления фосфора в металле под шлаками изучаемой оксидной системы характеризует достаточно высокую степень ее отклонения от равновесия.

Шлаки окислительного периода с повышенной в среднем до 2 основностью и окисленностью до 27,2 %, формируемые в области, стремящейся к насыщению оксидом магния, обладают высокими рафинирующими свойствами, обеспечивающими сохранение процесса дефосфорации металла в этот период плавки. Среднее содержание фосфора в металле (0,0054 %) практически не превышает его концентрацию в металле периода плавления (0,0060 %). При этом реакция окисления фосфора в металле под шлаком исследуемой оксидной системы практически приближается к равновесию ($[\text{P}]_{\text{ф}}/[\text{P}]_{\text{р}} = 1,1$).

Смещение шлаков окислительного периода с пониженной в среднем до 1,8 основностью и

окисленностью до 25,7 % в область пересыщения оксидом магния сопровождается ухудшением рафинирующих свойств формируемых шлаков и, как следствие, значительным отклонением реакции окисления фосфора от равновесия ($[\text{P}]_{\text{ф}}/[\text{P}]_{\text{р}} = 1,38$). При этом наблюдается развитие процесса рефосфорации металла. Содержание фосфора в металле окислительного периода достигает в среднем 0,0087 % против 0,0070 % в металле периода плавления.

К важнейшим свойствам шлака, которые влияют на его «вспениваемость» относят, как уже отмечалось выше, химический состав, вязкость и наличие взвешенных твердых частиц [1–3, 5–8].

Для исследования влияния окисленности и основности магниевых шлаков различной степени насыщения оксидом магния на их вязкость были использованы промышленные шлаки, отобранные по расплавлению и в конце окислительного периода перед выпуском металла из печи. Вязкость шлаков измеряли на вибрационном вискозиметре. Результаты измерения вязкости опытных образцов шлака приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. ВЯЗКОСТЬ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ШЛАКА

TABLE 3. VISCOSITY OF SLAG TEST SAMPLES

Период плавки	$t_{\text{мет}}, ^\circ\text{C}$	$(\text{MgO})_{\text{ф}}/(\text{MgO})_{\text{н}}$	$(\text{MgO})_{\text{ф}}, \%$	(FeO), %	$\eta_{\text{пл}}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
Период плавления	1550	0,45	2,9	23,0	3,1	0,32
		1,04	7,1	22,0	3,1	0,46
		1,48	10,1	21,0	3,1	0,54
		0,88	7,2	31,0	2,2	0,05
Период окисления	1600	0,59	3,9	24,0	3,4	0,09
		1,05	7,2	23,0	3,4	0,12
		1,41	10,4	22,0	3,4	0,24
		1,14	10,0	31,0	2,2	0,047

Шлак периода плавления, не достигающий насыщения оксидом магния (0,45), формируемый в области с низким содержанием оксида магния (2,9 %), умеренной окисленности (23 % FeO) и повышенной до 3,1 основности, характеризуется при температуре 1550 °C относительно низкой вязкостью, не превышающей 0,32 Па·с. Смещение шлаков в область насыщения и пере-

сыщения оксидом магния (1,04 и 1,48) сопровождается при практически равных условиях (FeO = 21 и 22 % и B = 3,1) повышением вязкости шлаков до 0,46–0,54 Па·с. Шлак периода плавления, стремящийся к насыщению оксидом магния (0,88), формируемый в области с повышенной концентрацией оксида магния (7,2 %), высокой окисленности (31 % FeO) и умеренной основно-

сти (2,2) характеризуется высокой текучестью. Вязкость такого шлака при температуре 1550 °С не превышает 0,05 Па·с.

Шлаки окислительного периода при температуре 1600 °С характеризуются пониженной до 0,047–0,24 Па·с вязкостью с сохранением описанных выше закономерностей.

Несмотря на высокую жидкоподвижность магнезиальных шлаков высокой окисленности и умеренной основности, их формирование в области насыщения MgO обеспечивает интенсивное вспенивание шлака за счет присутствия в жидкой фазе твердых частиц — высокотемпера-

турных соединений ларнита и серии твердых растворов магнезиовюстита и магнезиоферрита [17].

Ниже приведены результаты исследования структуры и фазового состава опытных образцов магнезиального шлака с высоким уровнем окисленности, отобранных в конце периода плавления (образец 1) и в конце окислительного периода (образец 2) на плавке с формированием устойчивой шлаковой пены. Химический состав исследованных образцов шлака приведен в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИССЛЕДОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ШЛАКА

TABLE 4. CHEMICAL COMPOSITION OF STUDIED SLAG SAMPLES

Номер образца	Массовая доля компонентов в шлаке, %								CaO/SiO ₂
	CaO	SiO ₂	MgO	FeO	MnO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	S	
1	29,7	13,2	7,2	30,7	9,5	0,3	5,5	0,14	2,2
2	26,5	12,0	10,0	30,7	8,8	0,3	5,4	0,09	2,2

Минерально-фазовый состав рассмотренных образцов шлака независимо от периода плавки количественно практически идентичен. Основу твердых образцов шлака составляют пленки-частицы ларнита заовально-вытянутой формы (рис. 2 и 3), концентрация которого достигает 35,3–37,7 %. Данные частицы имеют вид чередующихся, сообщающихся, разнонаправленных цепочек.

Рис. 2. Микроструктура шлака (образец 1), ×2000:
1–5 — твердые растворы магнезиоферрита и магнезиовюстита; 6–9, 13–15 — ларнит; 10–12, 16, 17 — серия твердых растворов, близких по составу к гелениту с вкраплениями частиц ферритов кальция

Fig. 2. Slag microstructure (sample 1), ×2000:
1–5 — solid solutions of magnesia-ferrite and magnesia-wustite; 6–9, 13–15 — larnire; 10–12, 16, 17 — series of solid solutions, close by content to helenite with inclusions of calcium ferrite particles

Рис. 3. Микроструктура шлака (образец 2), ×2000:
1–4 — твердые растворы магнезиоферрита и магнезиовюстита; 5–9, 24 — ларнит; 10–13 — серия твердых растворов, близких по составу к гелениту; 14–23 — ферриты кальция

Fig. 3. Slag microstructure (sample 2), ×2000:
1–4 — solid solutions of magnesia-ferrite and magnesia-wustite; 5–9, 24 — larnire; 10–13 — series of solid solutions, close by content to helenite; 14–23 — calcium ferrites

В высокотемпературной силикатной массе присутствуют отдельные крупные частицы округлой и вытянутой формы, представляющие собой серию твердых растворов магнезиовюстита и магнезиоферрита, концентрация которых достигает 26,7–29,5 %.

Низкотемпературная фаза в исследованных образцах шлака представлена в основном бес-

форменными, вытянутыми, прерывистыми пленками, по составу близкими к гелениту ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$), с отдельными вкраплениями частиц ферритов кальция ($n\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), суммарная концентрация которых составляет 13,4–18,8 %.

Результаты приведенных теоретических и экспериментальных исследований были положены в основу разработки рационального состава магнезиальных шлаков по периодам плавки в ДСП, обеспечивающего формирование устойчивой шлаковой пены, сохранение высоких рафинирующих свойств и обладающих низким агрессивным воздействием на футеровку печи. В период плавления при средней температуре металла 1550 °С, основности 2,0–2,5 и окисленности шлака 25–30 % концентрацию MgO достаточно поддерживать на уровне 7,5–8,5 %. В окислительный период при средней температуре металла 1650 °С, основности 2–3 и окисленности шлака 30–40 % концентрацию MgO необходимо поддерживать на уровне 8–9 %. При этом авторы работ [17, 18] отмечают, что формирование, например, шлаков основностью 1,9–2,5, содержащих 24–36 % FeO и более 7,2 % MgO, обеспечивает высокую вероятность достижения уровня вспенивания шлака в ДСП-135 в диапазоне 400–500 мм и, как следствие, пониженный (не более 54 МВт·ч) расход электроэнергии и длительность работы печи под током не более 39 мин.

Для формирования магнезиальных шлаков рекомендованного состава были разработаны технологические приемы, включающие оставление на “болоте” высокомагнезиальных шлаков предыдущей плавки и присадку в окислительный период при расходе 75–88 % электроэнергии за плавку высокомагнезиального флюса “Магма” в два приема в количестве 6,5–10,0 кг/т стали [19].

Внедрение разработанных технологических режимов формирования по периодам плавки магнезиальных шлаков в совокупности с реализацией комплекса технических и технологических решений обеспечило рекордную стойкость огнеупорной футеровки печи более 1900 плавов за кампанию и высокий уровень основных технологических и технико-экономических показателей процесса. Продолжительность работы печи под током сократилась в среднем на 1,5 мин, удельный расход электроэнергии уменьшился в среднем на 11 кВт·ч/т. Отмечено сокращение расхода извести в среднем на 6,7 кг/т, углеродсодержащих материалов для вспенивания шлака на 3,9 кг/т, расхода огнеупорных материалов на футеровку в среднем на 4,6 кг/т, торкрет-массы на ремонт шлакового пояса на 0,7 кг/т и заправочных материалов на восстановление откосов на 3,4 кг/т. При этом формируемые шлаки сохраняют высокие рафинирующие свойства. Содержание фосфора в металле в конце окислительного периода плавки не превышает 0,010 % при средней концентрации 0,005 % [18, 20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поррачин П., Онести Д., Гроссо А., Миани Ф. Роль вспенивания шлака в оптимизации тепловой работы ДСП переменного тока // *Сталь*. 2005. № 4. С. 84–86.
2. Шалимов А.Г. Формирование вспененных шлаков в дуговой сталеплавильной печи // *Электromеталлургия*. 2013. № 9. С. 8–13.
3. Увеличение стойкости огнеупоров на ДСП фирмы Pacific Steel, Новая Зеландия // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2005. № 1. С. 25, 26.
4. Вспенивание шлака в ДСП // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2011. № 5. С. 24–26.
5. Экспериментальное определение высоты вспененного шлака и скорости реакции C–FeO // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2011. № 3. С. 27–30.
6. Ito K., Fruehan R.J. Study on the foaming of CaO–SiO₂–FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results // *Metallurgical transactions*. 1989. V. 20 B. P. 509–514.
7. Кожухов А.А. Влияние химического состава шлака на его способность вспениваться по ходу продувки ванны в кислородном конвертере // *Сталь*. 2013. № 4. С. 20–22.
8. Кожухов А.А. Исследование влияния вязкости и температуры плавления конвертерного шлака на его вспенивание // *Сталь*. 2014. № 2. С. 15–19.
9. Обст К.Х., Штрадтман Ю., Редер М. Воздействие на растворение извести добавками природных и синтетических флюсов // *Черные металлы*. 1978. № 16. С. 834–841.
10. Мероприятия производственной стратегии, влияющие на производительность конвертеров при выплавке стали // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2009. № 5. С. 30–32.
11. Сарычев А.Б., Николаев О.А., Сарычев А.Ф., Чигасов Д.Н. Технологические особенности обеспечения заданных содержаний серы и фосфора при производстве низколегированной стали // *Сталь*. 2006. № 12. С. 15–18.
12. Ким В.А., Николай Э.Н., Акбердин А.А. и др. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков: методическое пособие / Отв. ред. В.П. Малышев. — Алма-Ата: Наука КазССР. 1989. — 114 с.

13. Чемлева Т.А., Микешина Н.Г. Применение симплекс-решетчатого планирования при исследовании диаграмм состав–свойство. Новые идеи в планировании эксперимента / Отв. ред. В.В. Налимов. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1969. С. 191–208.
14. Охотский В.Б. Модели металлургических систем. — Днепропетровск: Системные технологии, 2006. — 287 с.
15. Suito H., Inoue R., Takada M. Phosphorus distribution between liquid iron and MgO saturated slags of the system CaO–MgO–FeO–SiO₂. // Trans. of Iron and Steel Inst. Japan. 1981. V. 21. № 4. P. 250–259.
16. Бабенко А.А., Кривых Л.Ю., Левчук В.В. Влияние оксида магния на рафинирующие свойства конвертерных шлаков // Изв. вузов. Черная металлургия. 2010. № 4. С. 20–23.
17. Ушаков М.В., Бабенко А.А., Кузякин В.Г., Степанов А.И. и др. Влияние химического и фазового состава магнезиальных шлаков на эффективность их вспенивания в процессе выплавки в ДСП // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XVI междунар. конф. (5–9 октября 2015 г., г. Магнитогорск). — Челябинск, 2015. С. 50–55.
18. Ушаков М.В., Бабенко А.А., Мурзин А.В. и др. Теоретические и технологические особенности выплавки полупродукта в ДСП под магнезиальными шлаками // Конгресс сталеплавателей и производителей металла: сборник трудов (15–19 октября 2018 г., г. Тула). — Москва–Тула, 2018. С. 142–148.
19. Пат. 2493263 РФ, МПК С 21 С 5/52. Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи / А.А. Бабенко, С.П. Бурмасов, А.В. Воронцов и др. // Заявл. 20.07.2012; опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26.
20. Зуев М.В., Бабенко А.А., Бурмасов С.П. и др. Комплекс технологических решений снижения энерго- и материалоемкости процесса выплавки стального полупродукта в современных ДСП // Металлург. 2014. № 7. С. 45–49.

Поступила 20 мая 2019 г.

REFERENCES

1. Porrachin P., Onesti D., Grosso A., Miani F. The role of slag foaming in AC EAF heat operation optimization. *Stal'*, 2005, no. 4, pp. 84–86. (In Russ.).
2. Shalimov A.G. Forming of foaming slags in electric arc steelmaking furnace. *Elektrometallurgiya*, 2013, no. 9, pp. 8–13. (In Russ.).
3. Increasing of the refractories resistance on DSP by particleboard Pacific Steel, New Zealand. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*, 2005, no. 1, pp. 25, 26. (In Russ.).
4. Foaming of slag in DSP. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*, 2011, no. 5, pp. 24–26. (In Russ.).
5. Experimental determination of foaming slag height and C–FeO reaction speed. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*, 2011, no. 3, pp. 27–30. (In Russ.).
6. Ito K., Fruehan R.J. Study on the foaming of CaO–SiO₂–FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results. *Metallurgical transactions*, 1989, vol. 20 B, pp. 509–514.
7. Kozhukhov A.A. Influence of slag chemical composition on its foaming ability during bath blow-down in an oxygen converter. *Stal'*, 2013, no. 4, pp. 20–22. (In Russ.).
8. Kozhukhov A.A. Study of the influence of BOF slag viscosity and melting temperature on its foaming. *Stal'*, 2014, no. 2, pp. 15–19. (In Russ.).
9. Obst K.Kh., Shtradtman Yu., Reder M. Impact on lime solubility by additives of natural and synthetic fluxes. *Chernye metally*, 1978, no. 16, pp. 834–841. (In Russ.).
10. Measures of production strategy, effecting BOF productivity at steel melting. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*, 2009, no. 5, pp. 30–32. (In Russ.).
11. Sarychev A.B., Nikolaev O.A., Sarychev A.F., Chigasov D.N. Technological peculiarities of given sulfur and phosphorus content provision at production of low alloyed steel. *Stal'*, 2006, no. 12, pp. 15–18. (In Russ.).
12. Kim V.A., Nikolai E.N., Akberdin A.A. etc. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii fiziko-khimicheskikh svoistv metallurgicheskikh shlakov* [Experiment planning at study of physical and chemical properties of metallurgical slags]. Malyshev V.P. ed. Alma-Ata: Nauka KazSSR, 1989, 114 p. (In Russ.).
13. Chemleva T.A., Mikesheva N.G. *Primenenie simpleks-reshetchatogo planirovaniya pri issledovanii diagramm sostav-svoistvo*. [Application of simplex-lattice planning at the study of composition-property diagrams] *Novye idei v planirovanii eksperimenta* [New ideas in experiment planning]. Nalimov V.V. ed. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1969, pp. 191–208. (In Russ.).
14. Okhotskii V.B. *Modeli metallurgicheskikh sistem* [Models of metallurgical systems]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2006, 287 p. (In Russ.).
15. Suito H., Inoue R., Takada M. Phosphorus distribution between liquid iron and MgO saturated slags of the system CaO–MgO–FeO–SiO₂. *Trans. of Iron and Steel Inst. Japan*, 1981, vol. 21, no. 4, pp. 250–259.
16. Babenko A.A., Krivikh L.Yu., Levchuk V.V. Influence of magnesium oxide on the refining properties of BOF slags. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2010, no. 4, pp. 20–23. (In Russ.).
17. Ushakov M.V., Babenko A.A., Kuzyakin V.G., Stepanov A.I., Tsikarev V.G. *Vliyanie khimicheskogo i fazovogo sostava magnezial'nykh shlakov na effektivnost' ikh vspenivaniya v protsesse vyplavki v DSP* [Influence of magnesium slags chemical and phase composition on efficiency of their foaming in the process of smelting in EAF]. *Sovremennye problemy elektrometallurgii stali: materialy XVI mezhdunar. konf. (5–9 oktyabrya 2015 g., g. Magnitogorsk)* [Current problems of steel electrometallurgy: materials XVI int. conf. (October 5–9, 2015, Magnitogorsk)]. Chelyabinsk, 2015, pp. 50–55. (In Russ.).

18. Ushakov M.V., Babenko A.A., Murzin A.V., Kuzyakin V.G., Shartdinov R.R. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osobennosti vyplavki poluprodukta v DSP pod magnezial'nymi shlakami* [Theoretical and technological peculiarities of semi-product smelting in EAF under magnesium slags]. *Kongress staleplavil'shchikov i proizvoditelei metalla: sb. tr. (15–19 oktyabrya 2018 g., Tula)* [Congress of steelmakers and metal manufacturers: Sat. woks (October 15-19, 2018, Tula)]. Moscow–Tula, 2018, pp. 142–148. (In Russ.).
19. Babenko A.A., Burmasov S.P., Vorontsov A.V. etc. *Sposob vyplavki stali v dugovoi staleplavil'noi pechi* [A method of steel smelting in arc steel-making furnace]. Patent RF no. 2493263. IPC C 21 C 5/52. *Byulleten' izobretenii*, 2013, no. 26. (In Russ.).
20. Zuev M.V., Babenko A.A., Burmasov S.P. etc. A complex of technological solutions for decreasing energy- and material capacity of the process of steel semi-product smelting in modern EAF. *Metallurg*, 2014, no. 7, pp. 45–49. (In Russ.).

Received May 20, 2019