

УДК 669.18.04:669.89

к.т.н. Куберский С. В.,
к.т.н. Проценко М. Ю.,
Воронько М. И.,
Проценко В. И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ЭЛЕКТРОДНОЙ СМЕСИ НА ТЕМПЕРАТУРУ СТОЛБА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Исследовано влияние химического и фракционного состава электродной смеси комбинированного электрода, используемого в рудно-восстановительных блоках процесса дугового глубинного восстановления, на температуру столба электрической дуги. С использованием метода термометрирования выполнен анализ влияния содержания отвального шлака от производства силикомарганца и доломитизированного известняка, а также их крупности на температурный режим горения электрической дуги. Показано, что ввод добавок вызывает снижение температуры столба дуги, а большие её значения достигаются при уменьшении крупности частиц шлака от производства силикомарганца и увеличении фракции использованного доломитизированного известняка.

Ключевые слова: *внепечная обработка, дуговое глубинное восстановление, комбинированный электрод, электродная смесь, состав, крупность, шлак силикомарганца, доломитизированный известняк, электрическая дуга, температура столба дуги.*

Снижение себестоимости товарной металлопродукции и повышение её качества являются основным направлением деятельности металлургических предприятий для обеспечения высокого уровня конкурентоспособности на внутреннем и мировом рынках.

Одним из основных звеньев технологической схемы производства стали является внепечная обработка, обеспечивающая высокий уровень её эксплуатационных свойств и качества. Поэтому вопросы усовершенствования технологий ковшевой металлургии с целью повышения её эффективности являются актуальными в современных условиях функционирования сталеплавильного производства.

Эффективность внепечной обработки в значительной степени зависит от расхода дорогостоящего сырья, материалов и энергоносителей, что заставляет вести поиск альтернативных их заменителей с целью снижения себестоимости металлопродукции.

Анализ технологий внепечной обработки показывает, что повышение её технико-

экономических показателей может быть достигнуто при использовании для рафинирования и раскисления-легирования различных промышленных отходов и вторичных сырьевых материалов взамен традиционных компонентов шихты. Такой подход положительно скажется не только на себестоимости передела, но и позволит снизить негативную нагрузку на окружающую среду.

Одним из путей решения отмеченной проблемы является использование метода дугового глубинного восстановления (ДГВ) элементов в железоуглеродистые расплавы [1]. Метод ДГВ позволяет одновременно решать основные задачи внепечной обработки, связанные с рафинированием, раскислением-легированием, гомогенизацией и нагревом расплава. Кроме того, данная технология предполагает использование в качестве рудного сырья различных промышленных отходов и вторичных материалов (шлак, шлам, бедные руды, бой огнеупоров и т. д.), которые содержат в своём составе полезные для металлургии элементы. Предложенный способ переработки отходов и

вторичных материалов позволяет снизить расход дорогостоящих ферросплавов и лигатур, сократить занимаемые отвалами площади, а также улучшить экологическую обстановку в промышленно развитых регионах. При этом технология обеспечивает снижение расхода энергоносителей при обеспечении высокого качества металла.

Одним из актуальных вопросов метода ДГВ, который не был изучен в ходе предыдущих исследований, является анализ температурных параметров горения комбинированных электродов (КЭ), набиваемых электродной смесью (ЭС) различного химического и фракционного состава.

Поэтому основная цель работы заключалась в определении влияния добавок шлака силикомарганца (ШМnC) и доломитизированного известняка (ДИ) в составе ЭС и их крупности на температуру столба электрической дуги. Выбор данных добавок обусловлен их относительной дешевизной и доступностью, а также наличием компонентов, восстановление которых может обеспечивать дополнительное раскисление-легиrowание железоуглеродистого расплава.

В процессе внепечной обработки металлического расплава методом ДГВ основным источником тепла является дуговой разряд. Тепловая энергия, выделяемая в дуговом узле, расходуется на нагрев и расплавление материалов рудно-восстановительного блока (РВБ), химические реакции, нагрев обрабатываемого расплава и потери в окружающую среду через рудно-восстановительную смесь (РВС) и сходящими газами.

Поток тепла, образующийся в зоне горения электрической дуги, напрямую зависит от её температуры, которая определяется мощностью, подводимой в зону дугового разряда, и оказывает основное влияние на скорость расходования КЭ и РВС. Зная количество тепла, выделяющегося при горении электрической дуги, можно определить энергетические параметры дугового узла.

Для определения потока тепла, распространяющегося по КЭ в процессе сжига-

ния, было выполнено его термометрирование. КЭ (рис. 1) изготавливали из стальной трубки длиной 230 мм и диаметром 18 мм, в которой насверливали отверстия диаметром 1,0–1,5 мм с шагом 15 мм. Затем подготавливали усреднённую ЭС из заранее просеянных материалов определённой фракции. Для графита и каменноугольного пека крупность частиц составляла менее 0,63 мм, а для ШМnC и ДИ изменялась в пределах 0,05–2,5 мм. После этого погорячему (при температуре 100–120 °C) проводили набивку стальной трубки. Такая температура необходима для размягчения каменноугольного пека, что позволяет более плотно набивать ЭС. Затем электрод помещали в специальный стакан, выполненный из стальной трубы, заполняли его коксовой мелочью для предотвращения контакта КЭ с окружающей средой и опускали в шахтную печь для коксования в течение 8–10 ч. После коксования электроды извлекали из стакана, нарезали в верхней их части резьбу для крепления в лабораторной установке и определяли их длину и массу.

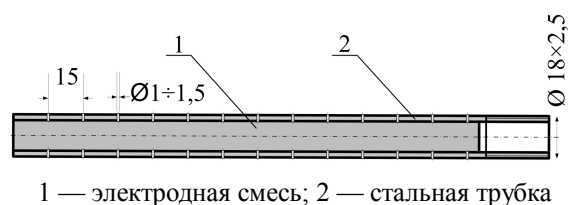


Рисунок 1 Общий вид КЭ

Лабораторные исследования проводили с использованием экспериментальных образцов КЭ, изготовленных в соответствии с матрицей двухфакторного планированного эксперимента с двумя звёздными точками (табл. 1) [2].

Содержание МnC и ДИ согласно матрице планированного эксперимента изменялось от 8,96 % до 16,04 %, а их фракция — от 0,05 мм до 2,5 мм.

В качестве источника питания использовали ТИР-630. В процессе сжигания опытных образцов КЭ работали на переменном токе и поддерживали значение силы тока 250 А.

Таблица 1
Значения исследуемых в планированном эксперименте параметров

№	Значения переменных факторов	
	f (фракция добавки, мм)	Q (количество добавки, %)
1	0,40	10
2	0,40	15
3	2,00	10
4	2,00	15
5	0,05	12,5
6	2,5	12,5
7	1,0	8,96
8	1,0	16,04
9	1,0	12,5

Перед проведением экспериментов по сжиганию КЭ теплоизолированный снаружи асбестом спай платино-платинородиевой термопары (ТПП) закрепляли в отверстии стальной трубки КЭ [3]. Теплоизоляция спая ТПП необходима для предотвращения его нагрева отходящими газами. КЭ сжигали внутри углеродистого трубчатого защитного кожуха Ø100×12 мм (рис. 2). В верхней части лабораторной установки располагался опытный образец КЭ, а в нижней — нерасходуемый (графитовый) электрод.

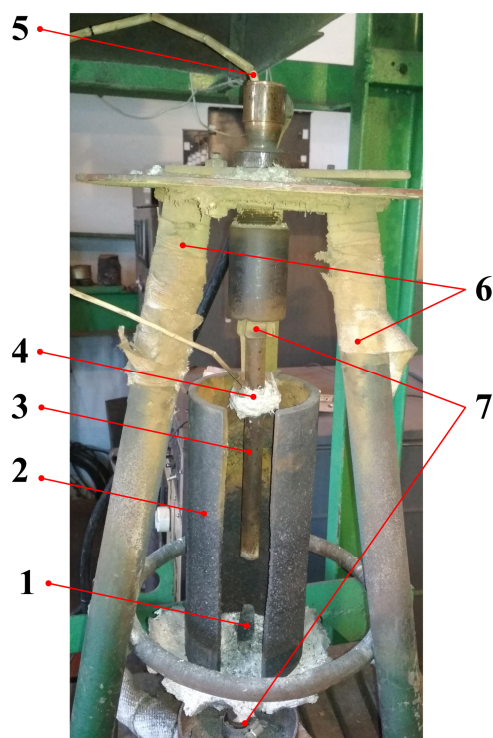
В процессе сжигания электрода спай ТПП приближался к области горения дугового разряда, при этом через каждые 30 с записывали показания ЭДС, измеряемой милливольтметром М2020. После проведения процесса сжигания определяли длину огарка КЭ и его вес, а полученные значения ЭДС с помощью градуировочной таблицы переводили в значения температуры. Огарки КЭ представлены на рисунке 3. После обработки полученных экспериментальных данных рассчитывали скорость расходования КЭ, с помощью которой можно определить, на каком расстоянии от зоны горения электрической дуги находится спай ТПП в определённый промежуток времени.

Таким образом, получается экспериментальное решение обратной задачи Й. Стефана — определяется температурное поле по длине электрода при известной ско-

рости его расходования. По экспериментально установленному распределению температуры вдоль электрода можно определить величину теплового потока по его длине.

В качестве исходных данных для расчёта теплового потока по длине электрода использовались следующие экспериментальные данные (табл. 2–4):

- время горения электрода (τ), с;
- температура в зоне спая ТПП (t), °С;
- длина сгоревшей части КЭ ($l_{\text{сг}}$);
- расстояние от нижнего торца КЭ до спая ТПП перед его сжиганием ($l_{\text{ТПП}}$).



1 — нерасходуемый электрод; 2 — защитный кожух; 3 — КЭ; 4 — ТПП; 5 — термопара ХА; 6 — станина; 7 — электрододержатели

Рисунок 2 Установка для сжигания КЭ



Рисунок 3 Огарки КЭ после их сжигания

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 2

Изменение температуры КЭ с добавкой ШМнС в ЭС при его сжигании в зоне спая ТПП

τ, с									t, °C								
КЭ1	КЭ2	КЭ3	КЭ4	КЭ5	КЭ6	КЭ7	КЭ8	КЭ9	КЭ1	КЭ2	КЭ3	КЭ4	КЭ5	КЭ6	КЭ7	КЭ8	КЭ9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	15	15	15	15	15	15	15	15
30	30	30	30	30	30	30	30	30	26	39	26	26	26	26	26	26	26
60	60	60	60	60	60	60	60	60	51	51	39	51	39	32	45	39	39
90	90	90	90	90	90	90	90	90	58	64	51	64	39	51	58	51	51
120	120	120	120	120	120	120	120	120	102	90	64	90	51	64	64	64	64
150	150	150	150	150	150	150	150	150	152	115	90	115	64	90	90	77	90
165		180	180	180	180	180	180	180	176		115	127	83	115	108	90	115
			200	210	210	210	210	210				152	102	127	121	127	139
				240	240	240	230	240					115	152	139	152	164
				270	270	245							133	164	146		
				300	280								139	164			
				310									152				

Таблица 3

Изменение температуры КЭ с добавкой ДИ в ЭС при его сжигании в зоне спая ТПП

τ, с									t, °C								
КЭ1	КЭ2	КЭ3	КЭ4	КЭ5	КЭ6	КЭ7	КЭ8	КЭ9	КЭ1	КЭ2	КЭ3	КЭ4	КЭ5	КЭ6	КЭ7	КЭ8	КЭ9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	15	15	15	15	15	15	15	15
30	30	30	30	30	30	30	30	30	19	19	26	26	19	19	16	19	19
60	60	60	60	60	60	60	60	60	26	26	26	26	26	26	26	26	26
90	90	90	90	90	90	90	90	90	39	26	39	39	39	39	32	39	39
120	120	120	120	120	120	120	120	120	39	26	51	51	45	58	39	51	51
150	150	150	150	150	150	150	150	150	51	26	64	77	58	64	51	64	64
180	180	180	160	180	180	180	180	180	64	26	77	83	64	77	64	77	90
210	210	210		210	210	210	210	210	77	77	83		77	90	77	96	127
	240			240	230	240	240	220		26			90	90	90	115	152
	270			265		270	270			45			90		102	127	
						300	280								115	139	
						330									127		
						360									152		
						375									152		

Таблица 4
Длина сгоревшего КЭ и расстояние
от нижнего его торца до ТПП

	КЭ1	КЭ2	КЭ3	КЭ4	КЭ5	КЭ6	КЭ7	КЭ8	КЭ9
ШМнС	$l_{сг.}, \text{ мм}$								
	53	59	88	47	74	58	53	80	75
	$l_{ТПП}, \text{ мм}$								
ДИ	83	97	121	92	116	101	93	106	100
	$l_{сг.}, \text{ мм}$								
	11	58	58	16	66	56	82	69	112
	$l_{ТПП}, \text{ мм}$								
	104	131	127	129	141	112	141	116	147

Для примера рассчитаем температуру дуги для комбинированного электрода № 2 с добавкой в электродную смесь 15 % ШМнС фракцией 0,40 мм. Процесс рассматриваем как стационарный, когда температура на торце оплавленной трубки составляет 1520 °С, а расстояние от оплавленного торца трубки до торца ЭС составляет 3 мм, т. е. до точки горения электрической дуги [1].

Для расчёта длины КЭ, вовлеченного в теплообмен, используется формула

$$L_{\tau} = \frac{l_{сг.}}{\tau_{общ.}} \cdot (\tau_2 - \tau_1) + l_{\tau}, \quad (1)$$

где $\tau_{общ.}$ — полное время горения КЭ (опыта);

τ_1 и τ_2 — начальное и конечное время горения КЭ для определённого промежутка времени, с;

l_{τ} — расстояние до спая ТПП после сжигания, мм.

Тогда через 150 с от начала сжигания КЭ расстояние до спая ТПП составит

$$l_{\tau} = l_{ТПП} - l_{сг.} = 97 - 59 = 38 \text{ мм},$$

а для 120 с, в соответствии с формулой (1),

$$L_{120} = \frac{59}{150} \cdot (150 - 120) + 38 = 50 \text{ мм},$$

и т. д.

Далее определяем средние значения натуральных логарифмов L_i и t ($\ln L_i$; $\ln t$; $(\ln L_i)^2$; $(\ln t)^2$; $\ln L_i \cdot \ln t$) для определённого

временного промежутка горения КЭ. После выполнения математических действий получаем средние значения натуральных логарифмов, которые представлены в таблице 5.

Линейная зависимость между значениями логарифмов L и t будет иметь вид

$$\ln t = b_{t/L} \cdot \ln(L) + t, \quad (2)$$

где $b_{t/L}$ — отношение выборочных дисперсий средних значений $\ln L$ и $(\ln L)^2$:

$$b_{t/L} = r_{t/L} \cdot \left(\frac{S_t}{S_L} \right), \quad (3)$$

где $r_{t/L}$ — коэффициент корреляции линейной зависимости L и t ;

S_t и S_L — выборочная дисперсия $\ln L$ и $(\ln L)^2$ соответственно, которая рассчитывается по формулам

$$S_L = \sqrt{\ln L^2 - (\ln L)^2}, \quad (4)$$

$$S_t = \sqrt{\ln t^2 - (\ln t)^2}, \quad (5)$$

где $\ln L$, $\ln t$ и $(\ln L)^2$, $(\ln t)^2$ — средние значения натуральных логарифмов L и t и их квадратов.

Таблица 5
Значение средних натуральных
логарифмов для L_i и t

$L_i, \text{ мм}$	$t, \text{ °С}$	$\ln L_i$	$\ln t$	$(\ln L_i)^2$	$(\ln t)^2$	$\ln L_i \cdot \ln t$
173	15	5,152	2,708	26,540	7,334	13,951
114	39	4,734	3,652	22,408	13,338	17,288
84	51	4,433	3,940	19,655	15,523	17,468
65	64	4,167	4,162	17,368	17,323	17,345
50	90	3,908	4,495	15,273	20,203	17,566
38	115	3,638	4,742	13,232	22,482	17,248
3	1520	1,099	7,327	1,207	53,677	8,049
Среднее		3,876	4,432	16,526	21,411	15,559

Рассчитываем коэффициент корреляции линейной зависимости:

$$r_{t/L} = \frac{\text{cov}_{t/L}}{S_L \cdot S_t}, \quad (6)$$

где $\text{cov}_{t/L}$ — ковариация между средними значениями $\ln L$ и $(\ln L)^2$, которая определяется по формуле

$$\text{cov}_{t/L} = (\ln L \cdot \ln t) - \ln L \cdot \ln t. \quad (7)$$

После потенцирования выражения (2) получаем зависимость температуры в данном поперечном сечении электрода, расположенном на определённом расстоянии от источника тепла (т. е. столба электрической дуги (t_0)):

$$t_0 = 5447 \cdot e^{-1,076 \ln L_r}. \quad (8)$$

По полученным экспериментальным данным с использованием пакета прикладных программ Microsoft Office Excel и предложенного в работе алгоритма была рассчитана t_0 для всех опытных образцов КЭ, значения которой представлены в таблице 6.

Результаты полученных опытных данных для процесса сжигания КЭ с добавкой в ЭС ШМнС и ДИ были статистически обработаны с помощью стандартного пакета программ Statistica 64 Version 10. Полученные зависимости представлены на рисунке 4, а уравнения регрессии — в таблице 7.

Для удобства анализа представленных на рисунке 4 данных были построены парные зависимости исследуемых параметров при постоянном значении третьего (рис. 5). Парные уравнения регрессии для представленных на рисунке 5 зависимостей приведены в таблице 8.

Таблица 6

Температура дуги при изменении содержания добавки в ЭС (Q) и их фракции (f)

№ п/п	Значения переменных факторов		$t_0, ^\circ\text{C}$	
	$f, \text{мм}$	$Q, \%$	ШМнС	ДИ
1	0,40	10	8415	5225
2	0,40	15	5447	5647
3	2,00	10	6095	5880
4	2,00	15	6954	4834
5	0,05	12,5	7527	6000
6	2,33	12,5	8021	6669
7	1,0	8,96	7457	8192
8	1,0	16,04	6626	7879
9	1,0	12,5	7257	7055

Таблица 7

Уравнения регрессии, описывающие связь между t_0 и составом КЭ

Добавка в ЭС ШМнС
$t_d = 11267,6557 - 6461,7496 \cdot f +$ $+ 68,9056 \cdot (\text{ШМнС}) + 325,7065 \cdot f^2 +$ $+ 449,6729 \cdot f \cdot (\text{ШМнС}) - 29,1027 \cdot (\text{ШМнС})^2$
Добавка в ЭС ДИ
$t_d = 9010,84 + 4146,2336 \cdot f -$ $- 714,5592 \cdot (\text{ДИ}) - 737,6621 \cdot f^2 -$ $- 180,6922 \cdot f \cdot (\text{ДИ}) + 34,4002 \cdot (\text{ДИ})^2$

На рисунке 5 представлены парные зависимости величины t_0 от фракционного и химического состава ЭС при использовании в качестве добавки ШМнС и ДИ с крупностью до 1,0 мм.

Выбор данного ограничения по фракции материала обусловлен невозможностью получения плотной структуры набивки ЭС при крупности более 1,0 мм, а также возможным измельчением добавки в процессе набивки стальной трубки.

Полученные экспериментальные данные и результаты их статистической обработки свидетельствуют о том, что наибольшие значения температуры дуги наблюдаются при минимальной добавке ШМнС в ЭС. При этом увеличение крупности способствует снижению температуры дуги, что подтверждает данные, полученные в работе [4].

При добавке в ЭС ДИ t_0 значительно меньше, чем при использовании ШМнС. Причём увеличение количества добавки с 7 % до 11 % приводит к снижению t_0 , а дальнейшее её увеличение до 17 % способствует росту значений t_0 до величины, соответствующей 10 %. Кроме того, увеличение размеров частичек ДИ благоприятно сказывается на тепловом балансе процесса. Более низкая t_0 при использовании в составе ЭС ДИ может быть обусловлена протеканием реакций восстановления кальция и магния, которые требуют больших затрат тепла, а также процессом разложения ДИ.

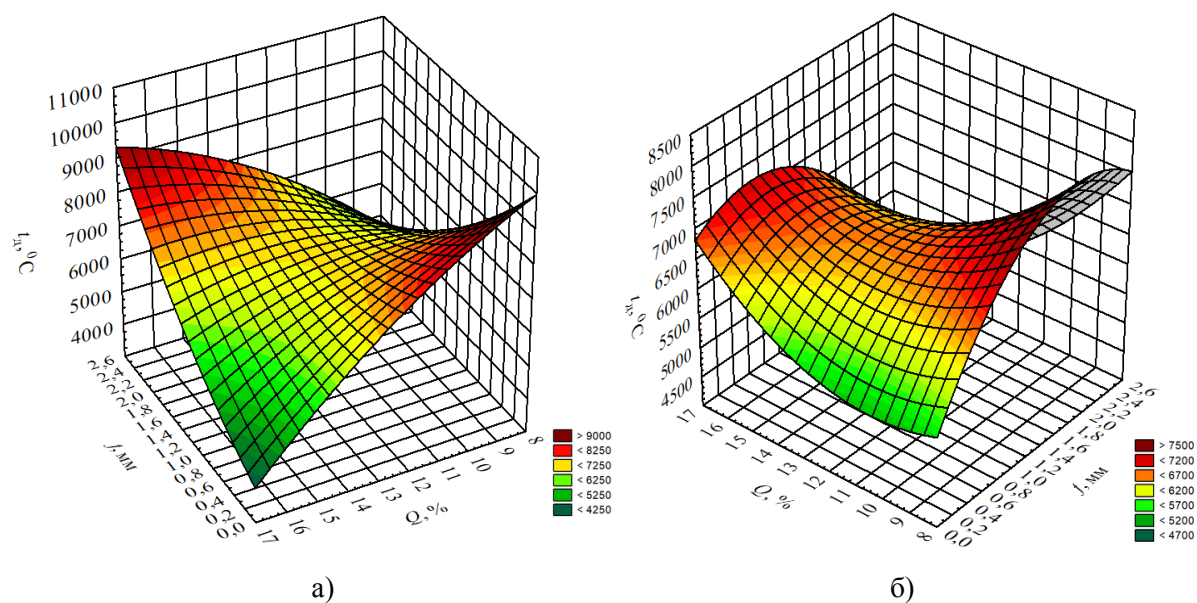


Рисунок 4 Зависимости температуры дуги от содержания добавки в ЭС и её фракции: а — ШМnC, б — ДИ

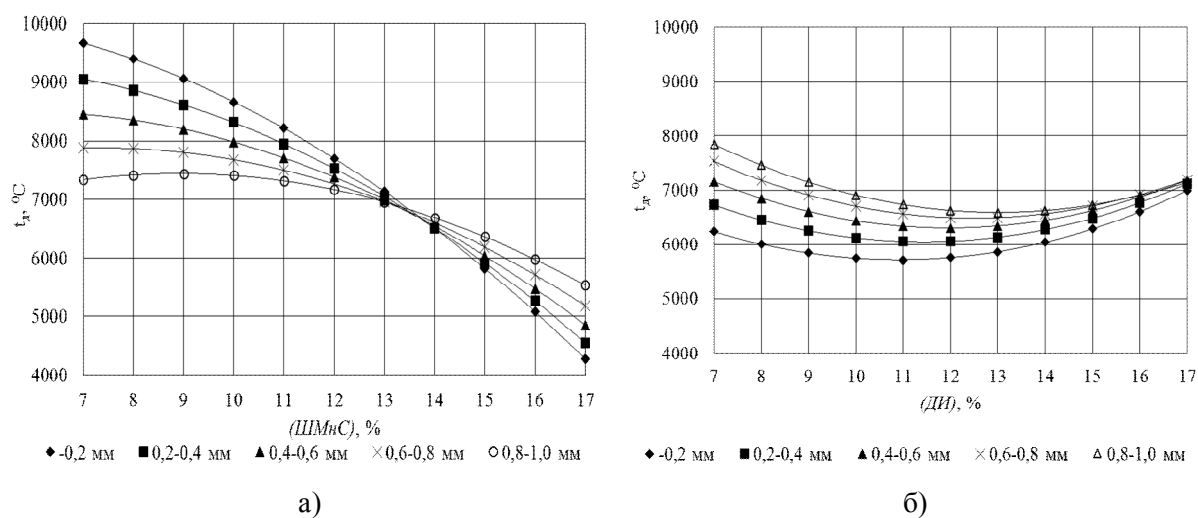


Рисунок 5 Влияние состава ЭС на t_d : а — ШМnC; б — ДИ

Таблица 8

Уравнения регрессии, описывающие влияние состава ЭС на t_d

Количество добавки в ЭС, %	Уравнение регрессии	
	ШМnC	ДИ
-0,2 мм	$t_d = -29,103 \cdot (\text{ШМnC})^2 + 158,84 \cdot (\text{ШМnC}) + 9988,3$	$t_d = 34,4 \cdot (\text{ДИ})^2 - 750,7 \cdot (\text{ДИ}) + 9810,6$
0,2÷0,4 мм	$t_d = -29,103 \cdot (\text{ШМnC})^2 + 248,77 \cdot (\text{ШМnC}) + 8735,1$	$t_d = 34,4 \cdot (\text{ДИ})^2 - 786,84 \cdot (\text{ДИ}) + 10551$
0,4÷0,6 мм	$t_d = -29,103 \cdot (\text{ШМnC})^2 + 338,71 \cdot (\text{ШМnC}) + 7507,9$	$t_d = 34,4 \cdot (\text{ДИ})^2 - 822,97 \cdot (\text{ДИ}) + 11233$
0,6÷0,8 мм	$t_d = -29,103 \cdot (\text{ШМnC})^2 + 428,64 \cdot (\text{ШМnC}) + 6306,7$	$t_d = 34,4 \cdot (\text{ДИ})^2 - 859,11 \cdot (\text{ДИ}) + 11856$
0,8÷1,0 мм	$t_d = -29,103 \cdot (\text{ШМnC})^2 + 518,58 \cdot (\text{ШМnC}) + 5131,6$	$t_d = 34,4 \cdot (\text{ДИ})^2 - 895,25 \cdot (\text{ДИ}) + 12419$

На основании полученных данных можно сделать вывод, что ДИ нецелесообразно использовать в качестве добавки для ЭС, а добавку мелких фракций ШМнС можно использовать лишь для обеспечения синхронного расходования всех элементов рудно-восстановительных блоков.

В ходе дальнейших исследований предполагается проанализировать влияние химического и фракционного состава ЭС на энергетические параметры процесса горения КЭ, их линейную и массовую скорости расходования.

Библиографический список

1. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст] : монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 320 с.
2. Воронько, М. И. Разработка методики для оценки влияния состава электродной смеси на её электропроводность [Текст] / М. И. Воронько, В. О. Десятников, М. Ю. Проценко // *Металлургия XXI столетия глазами молодых : материалы IV Международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов*. — Донецк, 2018. — С. 39–42.
3. Проценко, М. Ю. Анализ температурных и энергетических параметров процесса дугового глубинного восстановления элементов [Текст] / М. Ю. Проценко, С. Б. Эссельбах, С. В. Куберский, В. С. Эссельбах, Е. В. Штепан // *Сб. науч. тр. ДонГТУ*. — Алчевск, 2010. — Вып. 32. — С. 261–270.
4. Куберский, С. В. Исследование влияния состава электродной смеси на её удельное электросопротивление [Текст] / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, М. И. Воронько, В. И. Проценко // *Сб. науч. тр. ДонГТУ*. — Алчевск, 2018. — № 10 (53). — С. 70–75.

© Куберский С. В.
© Проценко М. Ю.
© Воронько М. И.
© Проценко В. И.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., зам. нач. ЦЛК филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (ПАО «АМК») Тарасовым В. Н.

Статья поступила в редакцию 16.10.18

к.т.н. Куберский С. В., к.т.н. Проценко М. Ю., Воронько М. И., Проценко В. И. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ СКЛАДУ ЕЛЕКТРОДНОЇ СУМІШІ НА ТЕМПЕРАТУРУ СТОВПА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

Досліджено вплив хімічного і фракційного складу электродної суміші комбінованого електроду, що використовується в рудно-відновлювальних блоках процесу дугового глибинного відновлення, на температуру стовпа електричної дуги. З використанням методу термометрування виконано аналіз впливу вмісту відвального шлаку від виробництва силікомарганцю і доломітизованого вапняку, а також їх крупності на температурний режим горіння електричної дуги. Показано, що введення добавок викликає зниження температури стовпа дуги, а великі її значення досягаються при зменшенні крупності частинок шлаку від виробництва силікомарганцю і збільшенні фракції використаного доломітизованого вапняку.

Ключові слова: позапічна обробка, дугове глибинне відновлення, комбінований електрод, електродна суміш, склад, крупність, шлак силікомарганцю, доломітизований вапняк, електрична дуга, температура стовпа дуги.

PhD Kubersky S. V., PhD Protsenko M. Yu., Voronko M. I., Protsenko V. I. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

**ANALYSIS OF ELECTRODE MIXTURE COMPOSITION IMPACT
ON THE TEMPERATURE OF THE ELECTRIC ARC**

The influence of the chemical and fractional composition of the electrode mixture of the combined electrode used in the ore-reduction blocks of the arc depth reduction process on the temperature of the electric arc was investigated. Using the thermometry method the impact analysis has been made for waste slag content at the production of silicomanganese and dolomitic limestone, as well as their size on the temperature of the electric arc. It is shown that additives input cause the arc temperature fall, but its greater values are achieved with lessening the size of slag particles from the production of silicomanganese and increasing the fraction of used dolomitic limestone.

Key words: *after-treatment, arc deep recovery, combined electrode, electrode mixture, composition, grain size, silicomanganese slag, dolomitic limestone, electric arc, arc column temperature.*

