

УДК: 669.17.046.003.12

**Д.Н.Тогобицкая, В.П.Пиптюк, И.Н.Логозинский*, Б.А.Левин*,
С.В.Греков, А.А.Аносова, Н.Е.Ходотова**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
СЕРОПОГЛОТИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ШЛАКОВ ПРОИЗВОДСТВА
ЭЛЕКТРОСТАЛИ**

*Институт чёрной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины
ПАО «Днепроспецсталь» (ПАО «ДСС»)

Цель настоящей работы состояла в систематизации данных о составе рафинировочных шлаков производства электростали применительно к условиям ПАО «Днепроспецсталь». Рассчитаны интегральные физико-химические параметры шлака, спрогнозирована серопоглотительная способность шлака, подготовлены исходные данные для разработки рекомендаций по рациональному шлаковому режиму процессов рафинирования при производстве подшипниковой, конструкционных и инструментальной марок стали.

Ключевые слова: состав шлака, интегральные параметры, серопоглотительная способность

Состояние вопроса. Современный уровень научного познания и определения свойств шлаковых расплавов, предусматривает, наряду с экспериментальным, использование теоретических методов физико-химического и математического моделирования. Ввиду отсутствия экспериментальных возможностей с использованием разработанной в ИЧМ НАНУ концепции, направленной химической связи, проведены теоретические исследования с целью оптимизации задач рафинирования металла и эффективного использования шлакообразующих материалов в процессах производства электростали. В настоящих исследованиях продолжено прогнозное изучение основных характеристик рафинировочного шлака сталеплавильного передела применительно к используемым на ПАО «ДСС» их составам при производстве подшипниковой, конструкционных и инструментальной марок стали.

Изложение основных результатов исследования. В последние годы в ИЧМ НАНУ для прогнозирования свойств рафинировочных шлаков, используемых при производстве конвертерной и электростали, проводится комплекс теоретических исследований с использованием концепции направленной химической связи. Целью работ такой направленности является оптимизация задач по рафинированию металла, определение рациональных составов рафинировочных шлаков для решения технологических задач производства и обеспечение ресурсоэнергосбережения.

Ранее [1] получены аналитические выражения для прогнозирования, в частности, серопоглотительной способности и вязкости шлаков применительно к конвертерному производству стали. Указанная работа выполнена на основании анализа данных о производстве стали на

ПАО «МК Азовсталь», ПАО «ДМКД» и ПАО «ЕМЗ», проведённой систематизации опубликованных значений вязкости и серопоглотительной способности рафинировочных шлаков сталеплавильного производства при использовании параметров межатомного взаимодействия в металлических расплавах. Для процесса десульфурации стали, произведённой в условиях ПАО «ДМКД», разработана методика, результаты расчётно-аналитического анализа шлакового режима и граничные условия в терминах состав / свойство, определяющие получение кондиционной по сере стали трубного марочного сортамента [2].

В настоящих исследованиях продолжено прогнозное изучение серопоглотительной способности (S) рафинировочных шлаков электросталеплавильного производства применительно к используемым на ПАО «ДСС» их составам при производстве подшипниковой (ШХ15), конструкционных (65Г, Ст.20, Ст.45, 40ХН2МА и др.) и инструментальной (Х12МФ) марок стали сортамента СПЦ-3.

Для расчёта этого параметра использовали уравнение, приведённое в [3]:

$$\lg C_S = 2,97 \Delta e + 12,07 \rho - 3,17 Z(k-a) - 2,06 \quad (1)$$

где d , Δe , ρ , $\operatorname{tg} \alpha$ и $Z(k-a)$ - параметры межатомного взаимодействия физико-химической модели шлаковых расплавов.

Химический состав шлака разных этапов ковшовой обработки металла и соответствующие интегральные параметры межатомного взаимодействия шлака применительно к стали исследуемого сортамента приведены в табл. 1-4.

Таблица 1 – Химический состав шлака промышленных плавов электростали ПАО «ДСС» до обработки на У КП

Номер по порядку	Марка стали	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	CaO	CaF ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	65Г	14,1	13,3	12	0,99	0,35	0,03	54,7	4,3
3	65Г	15,7	9,7	8,5	0,35	0,2	0,1	54	11,4
4	45	13,8	14,1	8,4	0,75	0,25	0,01	52,3	10,15
5	45	11,3	16,3	11,9	0,9	0,19	0,07	51,7	7,43
6	45	10,5	18,7	12,9	0,77	0,21	0,07	46,8	9,9
7	45	9,5	10,9	6,9	1,08	0,15	0,09	55,6	15,5
8	45	8,9	8,4	7,4	1,35	0,18	0,09	61,1	12,5
9	9Г2Ф	10,4	9,7	8,3	0,23	0,29	0,09	55	14,8
10	9Г2Ф	18	9,5	17,8	0,58	0,7	0,09	37,2	15,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	40XH2MA	11,2	10,1	5,95	0,25	0,24	0,09	59,6	12,5
12	40XH2MA	16	12,2	18,9	0,33	0,36	0,09	26	26
13	X12MФ	15,2	7,3	7,4	1,4	0,38	0,43	56	11,6
14	40X	11,1	13,9	12,9	0,48	0,31	0,19	46,5	14,3
15	ШХ15	9,4	11,2	5,05	1,19	0,12	0,09	51,5	21,2
16	45/Y/Y1	9,5	8,9	4,45	1,3	0,33	0,09	64	11,4
17	20	18,5	13,2	11,2	0,42	0,23	0,01	48,2	8
18	38XC	17,2	7,9	9,2	0,4	0,2	0,14	50,6	13,4
19	60C2A	15,2	7,9	8,4	1	0,1	0,1	55,4	11,7

Таблица 2 – Интегральные параметры рафинировочного шлака ПАО «ДСС» до обработки на УКП

Номер по порядку	d	de	tgα	ρ	DZ M	Z(k-a)	lgCs	Cs
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	2,772	-1,605	0,151	0,814	0,015	0,505	1,39728	24,96204
3	2,714	-1,382	0,148	0,78	0,014	0,569	1,44633	10,17841
4	2,688	-1,326	0,149	0,783	0,011	0,617	1,4967	27,94667
5	2,752	-1,478	0,152	0,806	0,01	0,589	1,41163	15,30101
6	2,78	-1,527	0,154	0,791	0,009	0,553	1,19917	32,85035
7	2,621	-0,953	0,15	0,791	0,004	0,861	1,92759	31,3834
8	2,624	-0,953	0,15	0,819	0,005	0,898	2,14826	25,80061
9	2,66	-1,075	0,151	0,792	0,006	0,797	1,7802	15,81867
10	3,007	-2,155	0,152	0,754	0,024	0,096	0,33611	60,28371
11	2,572	-0,884	0,149	0,798	0,005	0,897	2,10289	126,7331
12	3,058	-2,141	0,154	0,712	0,019	0,075	-0,06268	0,865605
13	2,752	-1,442	0,146	0,787	0,015	0,537	1,45406	2,168253
14	2,819	-1,547	0,153	0,781	0,01	0,526	1,10466	28,44854
15	2,58	-0,79	0,149	0,761	0,002	0,908	1,90061	12,72506
16	2,53	-0,728	0,148	0,817	0,003	1,007	2,44684	84,6428
17	2,792	-1,729	0,148	0,771	0,019	0,348	1,00768	79,54447
18	2,771	-1,537	0,147	0,766	0,017	0,453	1,18472	140,689
19	2,723	-1,374	0,148	0,787	0,014	0,581	1,51654	279,795

Таблица 3 – Химический состав шлака промышленных плавок электростали ПАО «ДСС» после обработки на УКП

Номер по порядку	Марка стали	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	CaO	CaF ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	65Г	14,5	15,9	11,8	0,48	0,42	0,01	52	4,74
3	65Г	15,1	10,6	8,2	0,5	0,2	0,1	54	11,3
4	45	15,6	22,7	8,7	0,36	0,2	0,02	40,3	11,98
5	45	11,6	27,2	11,6	0,19	0,17	0,07	40,9	8,19
6	45	10,8	20	13,4	0,29	0,24	0,01	46,7	8,32
7	45	10,7	13,3	7,3	1,09	0,16	0,09	51	16,3
8	45	10,1	10,6	8,65	0,35	0,11	0,09	57,7	12,2
9	9Г2Ф	10,8	16,1	11,1	1,9	0,89	0,09	42	17,2
10	9Г2Ф	15,7	15,1	16,5	0,25	0,36	0,09	34,5	16,9
11	40ХН2МА	7,8	21	6,2	0,11	0,13	0,09	60	4,56
12	40ХН2МА	14,8	15,2	17,9	0,12	0,27	0,09	28	23,2
13	Х12МФ	12,6	13	6	0,42	0,07	0,16	54,5	12,7
14	40Х	10,7	17,6	12,4	0,32	0,17	0,12	43,5	15
15	ШХ15	10	16,2	7,7	0,48	0,06	0,09	46,3	19,1
16	45/У/У1	10,7	12,3	6,1	0,53	0,14	0,09	60	9,8
17	20	18,5	14,6	11,1	0,32	0,13	0,01	50,2	4,9
18	38ХС	19,6	9,1	8,3	0,3	0,1	0,1	48,2	13,6
19	60С2А	16,9	8,9	7,6	0,2	0,1	0,1	49,5	16,5

Таблица 4 – Интегральные параметры рафинировочного шлака ПАО «ДСС» после обработки на УКП

Номер по порядку	d	de	tgα	ρ	DZM	Z(k-a)	lgCs	Cs
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	2,761	-1,602	0,151	0,801	0,015	0,491	1,29366	19,66346
3	2,702	-1,345	0,148	0,781	0,013	0,594	1,48904	30,83472
4	2,713	-1,505	0,149	0,739	0,012	0,451	0,96021	9,124519
5	2,728	-1,518	0,153	0,767	0,008	0,522	1,03449	10,82655
6	2,771	-1,539	0,154	0,793	0,009	0,552	1,19084	15,51815
7	2,657	-1,097	0,15	0,772	0,006	0,751	1,61928	41,61788
8	2,643	-1,057	0,151	0,806	0,006	0,827	1,90754	80,82394
9	2,839	-1,588	0,151	0,761	0,01	0,463	0,9412	8,733735
10	2,95	-1,986	0,153	0,743	0,018	0,201	0,37242	2,357328
11	2,475	-0,734	0,151	0,823	0,002	1,04	2,39683	249,3618
12	3,004	-2,032	0,154	0,721	0,016	0,159	0,1034	1,26882
13	2,605	-1,038	0,148	0,778	0,007	0,777	1,78451	60,88496
14	2,785	-1,482	0,153	0,769	0,008	0,551	1,07362	11,84732
15	2,644	-1,05	0,151	0,755	0,004	0,767	1,50296	31,83904
16	2,562	-0,899	0,149	0,807	0,005	0,903	2,14795	140,5886
17	2,766	-1,704	0,148	0,781	0,019	0,378	1,10753	12,80944
18	2,761	-1,584	0,145	0,748	0,019	0,382	1,05294	11,2964
19	2,72	-1,372	0,146	0,75	0,014	0,525	1,25341	17,92297

На рис.1 приведены зависимости серопоглотительной способности шлаков стали марочного сортамента СПЦ-3 от интегральных параметров межатомного взаимодействия до и после обработки на УКП.

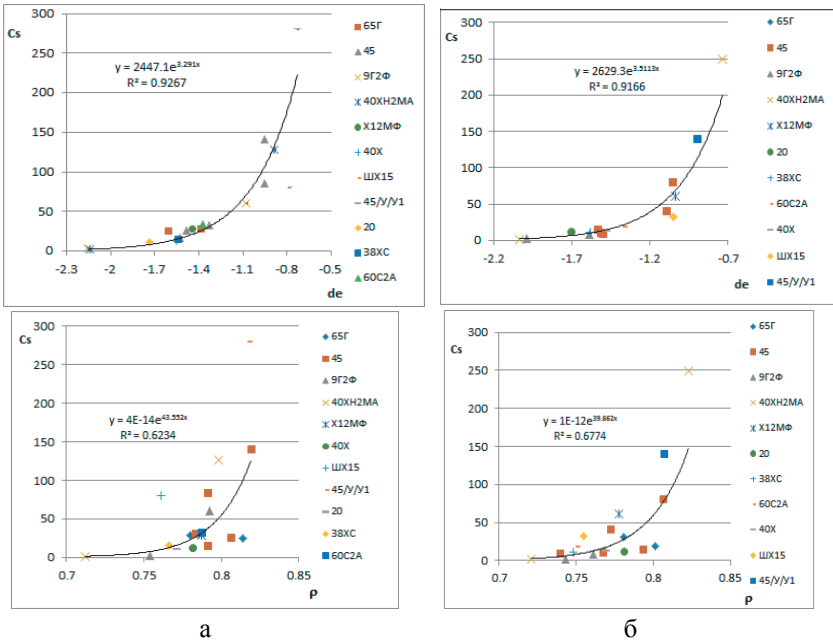


Рисунок 1 – Зависимости серопоглотительной способности рафинировочных шлаков от параметров межатомного взаимодействия до обработки на УКП (а) и после обработки на УКП (б) ПАО «ДСС» СПЦ-3

Из полученных зависимостей следует, что наиболее значимое влияние на серопоглотительную способность сталеплавильных шлаков оказывает как сила межатомного взаимодействия в направлении связи катион-анион, характеризующаяся параметром de , так и показателем стехиометрии p .

Следует отметить, что шлаковые режимы производства стали марок 38ХС, 60С2А, 40ХН2МА отличаются высокой серопоглотительной способностью ($Cs \geq 100$).

Наличие тесной взаимосвязи серопоглотительной способности шлаков исследуемых марок электростали с параметрами межатомного взаимодействия позволили на основе вычислительного эксперимента выявить лимитирующие соотношения компонентного состава для научно обоснованного выбора оптимального шлакового режима. Так, высокая корреляция соотношений $CaO/(SiO_2 + Al_2O_3)$ и $CaF_2 + MgO$ с интегральными параметрами de и p (рис.2) позволяет осуществить обоснованный выбор указанных соотношений в качестве координатных осей при построении картограмм для принятия конкретных технологических решений по

шлаковым режимам (рис.3). Так, следуя топографии поверхности серы в стали для обеспечения ее содержания $S \leq 0,011\%$ после обработки на УКП соотношения $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ и CaF_2+MgO следует выдерживать в пределах заштрихованной области.

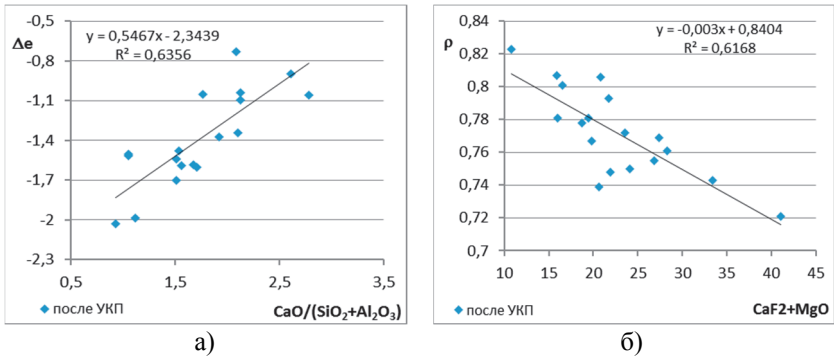


Рисунок 2 – Зависимости интегральных параметров Δe (а) и ρ (б) от соотношений $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ и CaF_2+MgO в рафинировочном шлаке

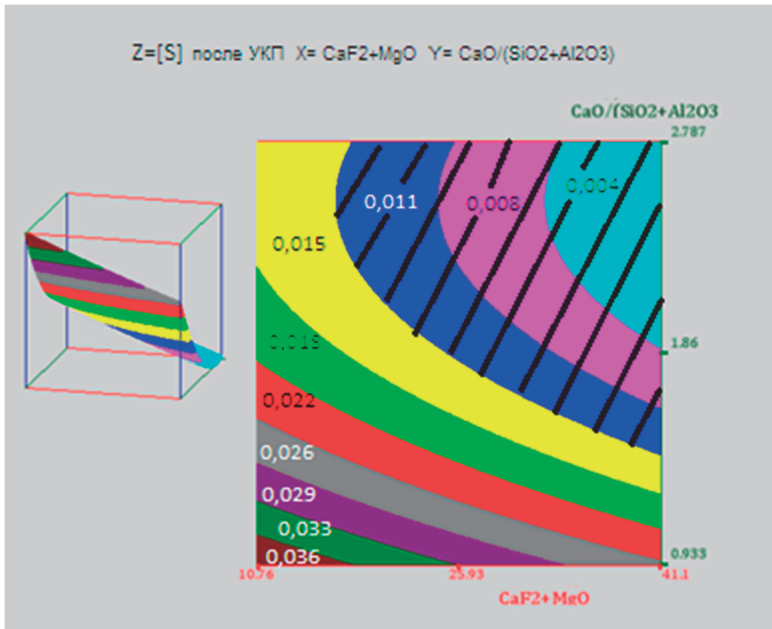


Рисунок 3 – Картограмма зависимости содержания серы в стали после обработки на УКП от соотношений $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ и CaF_2+MgO в рафинировочном шлаке

В настоящее время ведутся работы по наполнению базы технологических данных процесса десульфурации на УКП электростали

конструкционного, подшипникового и инструментального марочного сортамента СПЦ-3 ПАО «ДСС», что позволит сделать более обоснованный выбор рационального шлакового режима для каждой марки стали.

Выводы. С использованием физико-химической модели шлаковых расплавов рассчитаны значения интегральных физико-химических параметров и спрогнозированы свойства рафинировочных шлаковых систем электросталеплавильного передела применительно к производству стали подшипникового, инструментального и конструкционного марочного сортамента в условиях ПАО «ДСС».

Виявлені інформативні співвідношення компонентного складу шлаку, визначають його десульфурисувальну здатність. Побудовані картограми для вибору раціональних співвідношень, забезпечують необхідний рівень вмісту сірки в металі.

1. *Фізико-хімічні* властивості рафинировочных шлаков сталеплавильного передела / В.П.Пиптюк, А.Ф.Петров, А.Ф.Хамхотько и др.// Сб.науч. тр. ИЧМ НАНУ «Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии». – 2009. – Вып. 20. -С. 114-124
2. *Аналитическая* оценка серопоглотительной способности шлаков сталеплавильного передела /Д.Н.Тогобицкая, В.П.Пиптюк, С.В.Греков, Н.Е.Ходотова // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. -2011. –Вып. 21. –С 136-144.
3. *К вопросу* оптимального состава шлака десульфуратора трубных марок стали /Д.Н.Тогобицкая, В.П.Пиптюк, В.А.Кондрашкин и др.// Сб. науч. тр. ИЧМ НАНУ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2014. – Вып.28. -С.170-178.

*Статья поступила в редакцию сборника 15.03.2017
и прошла внутреннее и внешнее рецензирование*

***Д.М.Тогобицкая, В.П.Пиптюк, І.М.Логозінський, Б.А.Левін,
С.В.Греков, А.О.Аносова, Н.Е.Ходотова***

Експериментальна та теоретична оцінка сіркопоглинаючої здатності шлаків виробництва електросталі

Мета цієї роботи полягала в систематизації даних про склад рафінувальних шлаків виробництва електросталі з урахуванням умов ПАТ «Дніпросталь». Розраховано інтегральні фізико-хімічні параметри шлаку, спрогнозовано сіркопоглинаючу здатність шлаку, підготовлено вихідні дані для розробки рекомендацій щодо раціонального шлакового режиму процесів рафінання при виробництві підшипникової, конструкційної та інструментальної марок сталі.

Ключові слова: склад шлаку, інтегральні параметри, сіркопоглинаюча здатність

D.N.Togobitskaia, V.P.Piptiuk, I.N.Logozinskiyi, B.A.Levin, S.V.Grekov, A.A.Anosova, N.E.khodotova

Experimental and theoretical evaluation of sulfur absorption capacity of slags in production of steel with electric methods

The aim of this study is to systematize the data on the refining slag compositions in the electric methods of steel production with respect to the conditions of PJSC «DSS». We have calculated the designed integral physical and chemical parameters of slags, have predicted the sulfur absorbing ability of slags, and have prepared baseline data to develop recommendations for the rational mode of slag refining in the production of bearings, structural and tool steels.

Keywords: slag composition, the integral parameters, the absorbing sulfur ability