

УДК 669.187.24.669.14.018.24

М.И. Гасик, А.И. Панченко, А.С. Сальников, А.В. Жаданос

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ МАРКИ ШХ15СГ-В ПО ХОДУ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЕЕ НА УСТАНОВКЕ ЭЛЕКТРОПЕЧЬ-КОВШ ОКСИДНО-ФТОРИДНЫМИ ШЛАКАМИ

Аннотация. Изложены основные положения разработанной авторами инновационной технологии производства подшипниковой электростали ШХ15СГ-В, и результаты вычисления активности компонентов оксидно-фторидных шлаковых расплавов по теории А.Г. Пономаренко при обработке металла в электропечи-ковше с двухкратной наводкой рафинирующих шлаков из извести и плавикового шпата.

Ключевые слова. Подшипниковая электросталь, электропечь-ковш, инновационная технология, неметаллические включения, оксидно-фторидные шлаки, активность компонентов шлаков, единая теория А.Г. Пономаренко, единая квантово-механическая система коллективизированных электронов, равновесное содержание растворенного кислорода.

Анотация. Викладені основні положення розробленої авторами інноваційної технології виробництва підшипникової электросталі ШХ15СГ-В, и результати обчислення активності компонентів оксидно-фторидних шлакових розчинів за теорією О.Г. Пономаренко при обробці металу в електропечи-ківші з двукратною наводкою шлаків, що рафінують, з вапна і плавикового шпату.

Ключові слова. Підшипникова электросталь, електропеч-ківш, іноваційна технологія, неметалеві включення, оксидно-фторидні шлаки, активність компонентів шлаків, єдина теорія О.Г. Пономаренко, єдина квантово-механічна система колективизованих електронів, рівноважний вміст розчиненого кисню.

Summary. The basic provisions of the authors developed an innovative technology of the bearing of electric ШХ15СГ-В, and the results of calculating the activity of the components of the oxide-fluoride slag melts on the theory of AG Ponomarenko when processing the metal in the ladle furnaces with double fire refining slag of lime and fluorspar.

Key words. Bearing electric steel, ladle-furnace, innovative technology, nonmetallic inclusions, oxide-fluoride slag, the activity of the components of slag, a unified theory of AG Ponomarenko, a single quantum mechanical system of itinerant electrons, the equilibrium in the content of dissolved oxygen.

Постановка задачи

Подшипниковая сталь группы марок ШХ15СГ, ШХ15 и др. на ОАО «Днепроспецсталь» выплавляется в значительных объемах и поставляется по крупнотоннажным заказам зарубежных фирм, а последние годы в значительном количестве Харьковскому подшипниковому заводу (АО «ХАРП»), занявшему одну из лидирующих позиций в сегменте отечественного и международных рынков подшипников [1]. Приведенное

выше подтверждает высокое качество и экономическую эффективность производства подшипниковой электростали на данном этапе. И, вместе с тем, с учетом возрастающих требований к качеству подшипников обуславливает необходимость продолжения научно-исследовательских поисков дальнейшего повышения качества подшипниковой стали ШХ15СГ-В при снижении расхода применяемых материалов, прежде всего плавикового шпата, и удельного расхода электроэнергии.

Основные положения разработанной новой технологии выплавки электростали ШХ15СГ с использованием ферросиликомарганца

Электросталь марок ШХ15СГ-В и ШХ15 (табл. 1) на ОАО «Днепроспецсталь» выплавляется по разработанной и внедренной в производство технологии с использованием ферросиликомарганца взамен ферросилиция с нерегламентированным стандартом содержания кальция и углеродистого ферромарганца, что обеспечивает высокий выход годных партий сортового проката при оценке его качества по неметаллическим включениям по ГОСТ 801-78, ASTM E-45 (метод А) и нормам зарубежных фирм-заказчиков.

Таблица 1.
Химический состав сталей ШХ15 и ШХ15СГ-В (% мас) в соответствии с ГОСТ 801-78, ТУ ДСС 002

Марка стали	С	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu	Ni+Cu
					не более				
ШХ15	0,95-1,05	0,17-0,37	0,2-0,4	1,30-1,65	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50
ШХ15СГ-В	0,95-1,05	0,40-0,65	0,9-1,2	1,30-1,65	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50

Производство подшипниковой стали ведется по сквозной технологической схеме: «дуговая сталеплавильная печь (ДСП) (получение металла-полупродукта), электропечь-ковш (УПК) (десульфурация, раскисление, легирование) и вакуумная установка (раскисление, дегазация, корректирующее легирование)» (рис. 1) [2].

Металл-полупродукт в дуговой печи ДСП-60 раскисляется и легируется ферросиликомарганцем, а затем высокоуглеродистым феррохромом. Обработка металла на УПК производится оксидно-фторидными шлаками, формирующихся в ковше из смеси твердых шлакообразующих материалов - извести и плавикового шпата. Печной шлак при сливе металла-полупродукта отсекается, хотя частично он может поступить с металлом в электропечь-ковш. При обработке стали в электропечи-ковше производится дважды обновление оксидно-фторидного шлака с раскислением металла и шлака алюминием, а также корректировка содержания марганца (ферромарганцем) и кремния

(ферросилицием) [3]. Широкое внедрение разработанной инновационной сквозной технологической схемы и процессов на каждой стадии выплавки, внепечной обработки и разлива стали позволило существенно снизить количество выпадов партий сортового проката по всем видам неметаллических включений, что подтверждается данными оценки качества металла по ГОСТ 801-78 (табл. 2).

Таблица 2.
Динамика выпадов по неметаллическим включениям
стали ШХ15СГ-В по ГОСТ 801-78

Годы	Баллы по неметаллическим включениям, %			
	оксиды	глобули	сульфиды	O+S+ГЛ
2007	9,7	4,3	0,8	14,8
2008	3,9	3,1	0,0	7,0
2009	1,1	1,3	0,0	2,4
2010	0,3	0,0	0,1	0,9

Достигнуто также снижение брака партий сортового проката стали марок ШХ15 и ШХ15СГ-В при оценке загрязненности металла как по ГОСТ 801-78, так и ASTM E-45 (метод А) (табл. 3).

Таблица 3.
Снижение брака стали марок ШХ15СГ-В и ШХ15 по неметаллическим
включениям при оценке по ГОСТ 801-78 и ASTM E-45 (метод А)

Годы	Марки стали	Количество брака стали, %	
		по ГОСТ 801-78	ASTM E-45 (метод А)
2009	ШХ15СГ-В	0,55	0,97
	ШХ15	-	0,52
2010	ШХ15СГ-В	0,03	0,01
	ШХ15	0,004	0,001

Управление процессами внепечного рафинирования подшипниковой стали на стадии обработки на УПК и вакуумирования с продувкой аргоном в значительной мере основано на данных динамически изменяющегося в определенных пределах марочного химсостава и, что следует особенно отметить, нерегламентированных стандартом примесных элементов и прежде всего кальция.

Как отмечено в наших работах [1, 3] кальций в металле может поступать с ферросилицием ФС65 (ФС75), содержащим от 0,3 до 0,6% (стандартом не регламентировано), так и при обработке металла на электропечи-ковше оксидно-фторидными шлаками в результате восстановления оксида кальция кремнием и алюминием.

Учитывая ограниченные данные о термодинамических свойствах многокомпонентных оксидно-фторидных шлаков, применяемых в электросталеплавильной технологии, в настоящей работе обобщены данные исследования термодинамических свойств шлаковых расплавов, результаты

которых могут быть полезными для дальнейшего усовершенствования режимов раскисления, легирования и внепечной обработки подшипниковой стали и поиска путей снижения удельного расхода твердых шлакообразующих материалов и электроэнергии.

При обработке металла-полупродукта на УПК применяют известь и плавиковый шпат. Вместе с тем, при выпуске металла из дуговой печи, несмотря на отсечение печного шлака, он частично поступает с металлом в электропечь-ковш. Поэтому на первой стадии обработки металла шлак, сформированный на основе извести и плавикового шпата, содержит также оксиды, поступившие с печного шлака (табл. 4). Поэтому химсостав первого ковшевого шлака изменяется в определенных пределах от плавки к плавке.

Таблица 4.
Химический состав печных шлаков перед выпуском
металла-полупродукта из дуговой печи ДСП-60

Марка стали	Содержание оксидов, % мас							%CaO + %MnO + %SiO ₂
	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	S	
ШХ15СГ	34,6	28,9	21,7	3,0	8,1	3,3	0,087	2,96
ШХ15	34,7	18,1	17,8	2,6	22,7	3,5	0,070	2,92

В работе выполнено исследование микроструктуры печного шлака, определены минерально-фазовый состав и распределение элементов между фазами с применением электронной микроскопии РСМА. На рис. 1 представлена микроструктура шлака, распределение элементов между фазами в режиме картирования и непрерывного и непрерывного измерения содержания элементов O, Mg, Al, Si, P, S, Ca, Ti, Cr, Mn и Fe при линейном сканировании.

По данным сканирования трех участков аншлифа получен средний химсостав печного шлака одной из плавки стали ШХ15 (% мас):

CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO
42,30	8,87	17,52	2,15	3,96	4,12

По действующей технологии внепечной обработки стали в электропечи-ковше производится с применением смеси ТШМ, состоящей из извести и плавикового шпата. При выпуске металла-полупродукта в ковш присаживается ТШМ, а после расплавления, рафинирования металла под этим шлаком, его скачивают и присадками навески ТШМ формируют новый шлак. Химические составы шлаков, отобранных по ходу обработки металла-полупродукта (стали) приведены в табл. 5

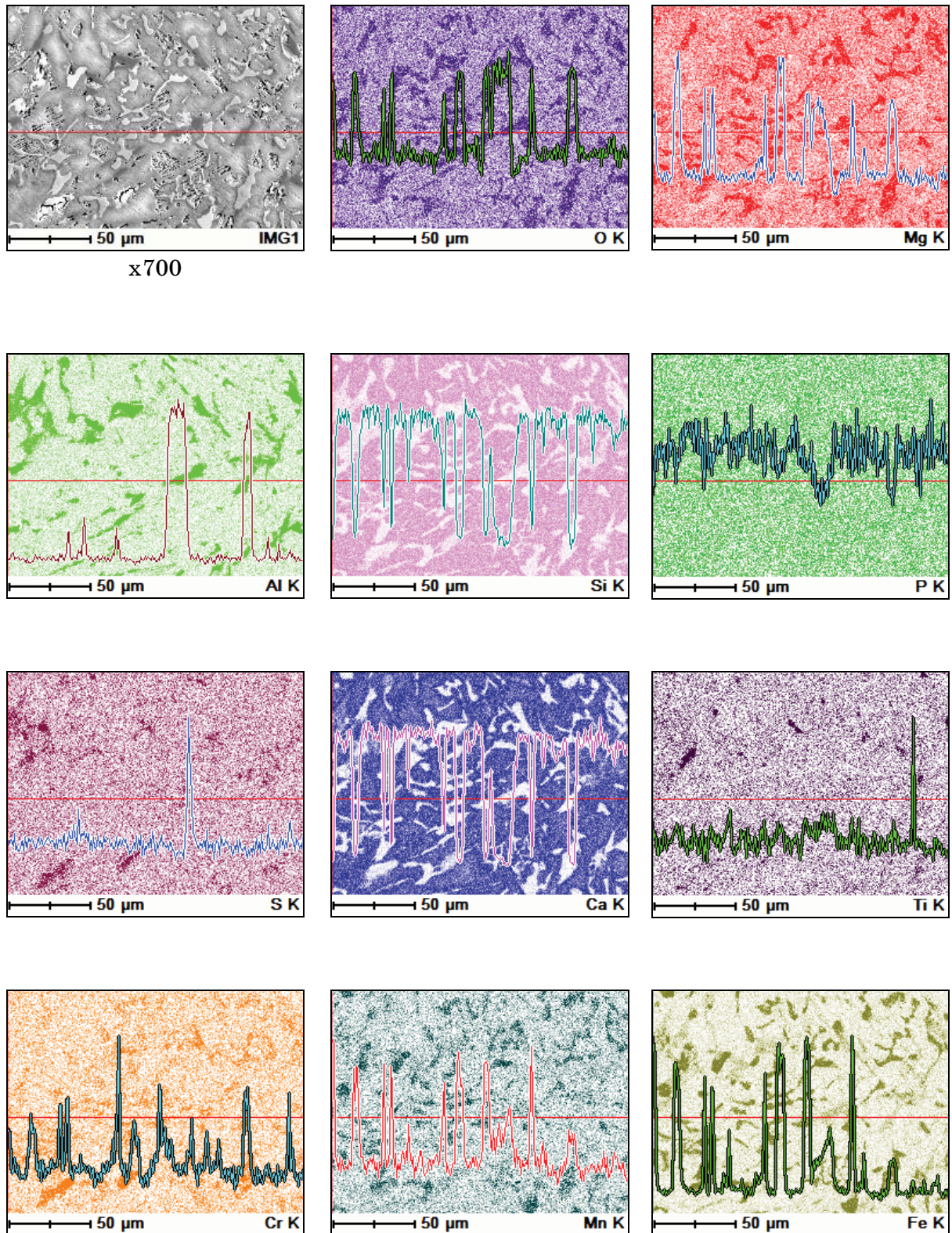


Рис. 1. Результаты РСМА представленной структуры печного шлака в режиме картирования с наложением спектрограмм участка стали ШХ15СГ-В

Таблица 5.

Химические составы оксидно-фторидных шлаков на каждой стадии обработки стали ШХ15СГ-В на УПК

Номер плавки	Номер шлака	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	CaF ₂	CaS
B21960	1	54,64	3,49	6,68	9,23	1,25	23,48	1,24
	2	48,27	7,19	13,50	11,32	0,42	15,82	3,46
	3	54,14	4,59	11,03	10,07	0,27	18,28	1,63
B21928	1	50,85	6,00	9,02	8,60	2,38	21,77	1,38
	2	49,88	7,10	11,42	11,26	1,13	17,88	1,32
	3	47,77	5,59	17,93	10,13	0,23	16,05	2,30
B21445	1	60,47	3,40	8,14	7,27	1,80	17,99	0,94
	2	42,60	7,80	16,57	11,01	0,65	16,57	4,80
	3	44,93	5,06	12,28	5,88	0,23	29,86	1,76
	4	51,90	3,84	18,39	8,57	0,24	14,86	2,20

Примечание: 1 – после обработки металла-полупродукта первым оксидно-фторидным шлаком в электропечи-ковше, 2 – на установке электропечь-ковш после обновления шлака, 3 – в конце обработки на установке ковш-печь, 4 – после вакуумирования.

Из таблицы следует, что состав компонентов шлака по ходу обработки меняется в достаточно широких пределах: CaO = 42,6%-60,47%, MgO = 3,49-7,8%, Al₂O₃ = 6,68%-18,39%, SiO₂ = 5,88-11,32%, FeO = 2,38%-0,23%, CaF₂ = 14,86% - 29,86%, CaS = 0,94% - 4,8%

Определение активности компонентов оксидно-фторидных шлаков и содержания кислорода в подшипниковой стали

В соответствии с теорией, развитой А.Г. Пономаренко [4] металлургические шлаковые расплавы представляют коллективную электронную структуру, а компонентами шлаковой фазы как и металла являются химические элементы. Электроны всех атомов, образующих расплавленный шлак, составляют единую квантово-механическую систему, которую термодинамически можно характеризовать химическим потенциалом электронов [4]. Выражение для химического потенциала элемента i в шлаке имеет вид:

$$\mu_i = \mu_{(i)}^0 + RT \ln x_{(i)} \psi_i + \mu \nu_i, \quad (1)$$

где x_i – концентрация элемента i в шлаке в атомных долях, μ – химический потенциал электронов в шлаковой фазе, μ_i – химический потенциал i -го элемента, $\mu_{(i)}^0$ – стандартный химический потенциал i -го элемента, ν_i – валентность (степень окисления) элемента i в шлаке. Коэффициент активности ψ_i – является частью “обычного” коэффициента активности γ_i :

$$\gamma_i = \psi_i \cdot \exp\left(\frac{\mu v_i}{RT}\right) \quad (2)$$

Коэффициент активности ψ_i вычисляется по формуле

$$\psi_i = \left[\sum_{j=1}^k x_j \exp\left(\frac{-\xi_{ij}}{RT}\right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где ξ_{ij} – энергия обмена местами атомов i и j , которая оценивается по формуле

$$\xi_{ij} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\chi_i} - \sqrt{\chi_j} \right)^2, \quad (4)$$

где χ_i, χ_j – энергетические параметры элементов i и j , значения которых для ряда химических элементов представлены ниже [5].

Элемент	Ca	Mg	Al	Si	Fe	O	F	S
χ , кДж	104,6	146,4	125	171,5	334,7	1255	1542	791

Моделирование расчетов активности компонентов и их анализ

Основными стадиями расчетов активности компонентов по теории шлаковых расплавов А.Г. Пономаренко являются:

1. определение числа молей каждого компонента;
2. вычисление сумму чисел молей всех компонентов и атомных долей компонентов каждого шлака.

Результаты расчетов для шлаков (табл. 5) приведены в табл. 6.

Таблица 6.

Число молей каждого соединения шлака

Номер плавки	Номер шлака	n_{CaO}	n_{MgO}	$n_{Al_2O_3}$	n_{SiO_2}	n_{FeO}	n_{CaF_2}	n_{CaS}
B21960	1	0,971	0,087	0,066	0,153	0,017	0,299	0,017
	2	0,868	0,181	0,136	0,190	0,006	0,204	0,048
	3	0,964	0,114	0,110	0,167	0,004	0,234	0,023
B21928	1	0,908	0,150	0,090	0,143	0,033	0,279	0,019
	2	0,891	0,178	0,114	0,188	0,016	0,229	0,018
	3	0,853	0,140	0,179	0,169	0,003	0,206	0,032
B21445	1	1,080	0,085	0,081	0,121	0,025	0,231	0,013
	2	0,761	0,195	0,166	0,184	0,009	0,212	0,067
	3	0,802	0,126	0,123	0,098	0,003	0,383	0,024
	4	0,927	0,096	0,184	0,143	0,003	0,190	0,031

Численные значения числа молей каждого компонента шлаков (табл. 7) рассчитаны исходя из значений числа молей оксидов, сульфидов CaS и фторида CaF₂:

$$n_{Ca} = n_{CaO} + n_{CaF_2} + n_{CaS}; \quad n_{Mg} = n_{MgO}; \quad n_{Al} = 2n_{Al_2O_3}; \quad n_{Si} = n_{SiO_2}; \quad n_{Fe} = n_{FeO};$$

$$n_F = 2n_{CaF_2}; \quad n_S = n_{CaS}; \quad n_O = n_{CaO} + n_{MgO} + 3n_{Al_2O_3} + 2n_{SiO_2} + n_{FeO}.$$

Таблица 7.
Число молей компонентов в 100 г шлака

Номер плавки	Номер шлака	n _{Ca}	n _{Mg}	n _{Al}	n _{Si}	n _{Fe}	n _O	n _F	n _S
B21960	1	1,287	0,087	0,133	0,153	0,017	1,580	0,599	0,017
	2	1,121	0,181	0,272	0,190	0,006	1,844	0,409	0,048
	3	1,220	0,114	0,220	0,167	0,004	1,746	0,467	0,023
B21928	1	1,206	0,150	0,180	0,143	0,033	1,648	0,558	0,019
	2	1,138	0,178	0,228	0,188	0,016	1,802	0,459	0,018
	3	1,091	0,140	0,359	0,169	0,003	1,872	0,412	0,032
B21445	1	1,324	0,085	0,163	0,121	0,025	1,676	0,461	0,013
	2	1,040	0,195	0,331	0,184	0,009	1,829	0,425	0,067
	3	1,210	0,126	0,246	0,098	0,003	1,497	0,766	0,024
	4	1,148	0,096	0,368	0,143	0,003	1,864	0,381	0,031

Вычисленные значения мольных долей компонентов приведены в табл. 8. В соответствии с методикой определения активности компонентов, вычисленные значения энергии обмена местами атомов компонентов шлака приведены в табл. 9, а значения экспоненциального множителя $A_{ij} = \exp(-\xi_{ij}/(RT))$ – в табл. 10.

Таблица 8.
Мольные доли компонентов (элементов) в шлаках

Номер плавки	Номер замера	x _{Ca}	x _{Mg}	x _{Al}	x _{Si}	x _{Fe}	x _O	x _F	x _S
B21960	1	0,332	0,022	0,034	0,039	0,004	0,408	0,155	0,004
	2	0,275	0,044	0,067	0,047	0,001	0,453	0,100	0,012
	3	0,308	0,029	0,055	0,042	0,001	0,441	0,118	0,006
B21928	1	0,306	0,038	0,046	0,036	0,008	0,419	0,142	0,005
	2	0,283	0,044	0,057	0,047	0,004	0,448	0,114	0,005
	3	0,268	0,034	0,088	0,041	0,001	0,459	0,101	0,008
B21445	1	0,342	0,022	0,042	0,031	0,006	0,433	0,119	0,003
	2	0,255	0,048	0,081	0,045	0,002	0,448	0,104	0,016
	3	0,305	0,032	0,062	0,025	0,001	0,377	0,193	0,006
	4	0,285	0,024	0,091	0,035	0,001	0,462	0,094	0,008

Таблица 9.
Энергия обмена ξ_{ij} местами атомов компонентов шлака

	Ca	Mg	Al	Si	Fe	O	F	S
Ca	0	1,753	0,454	4,114	32,541	317,484	421,687	160,157
Mg	1,753	0	0,423	0,496	19,190	272,060	369,070	128,402
Al	0,454	0,423	0	1,834	25,308	293,926	394,467	143,556
Si	4,114	0,496	1,834	0	13,515	249,318	342,500	112,934
Fe	32,541	19,190	25,308	13,515	0	146,739	219,944	48,314
O	317,484	272,060	293,926	249,318	146,739	0	7,382	26,654
F	421,687	369,070	394,467	342,500	219,944	7,382	0	62,090
S	160,157	128,402	143,556	112,934	48,314	26,654	62,090	0

Таблица 10.

Вычисленные значения экспоненциального множителя $\exp(-\xi_{ij}/(RT))$

	Ca	Mg	Al	Si	Fe	O	F	S
Ca	1	0,894	0,971	0,768	0,124	$1,38 \cdot 10^{-9}$	$1,71 \cdot 10^{-12}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
Mg	0,894	1	0,973	0,969	0,291	$2,56 \cdot 10^{-8}$	$5,03 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Al	0,971	0,973	1	0,889	0,197	$6,29 \cdot 10^{-9}$	$9,85 \cdot 10^{-12}$	$9,87 \cdot 10^{-5}$
Si	0,768	0,969	0,889	1	0,420	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$2,78 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Fe	0,124	0,291	0,197	0,420	1	$8,05 \cdot 10^{-5}$	$7,29 \cdot 10^{-7}$	0,045
O	$1,38 \cdot 10^{-9}$	$2,56 \cdot 10^{-8}$	$6,29 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$8,05 \cdot 10^{-5}$	1	0,622	0,180
F	$1,71 \cdot 10^{-12}$	$5,03 \cdot 10^{-11}$	$9,85 \cdot 10^{-12}$	$2,78 \cdot 10^{-10}$	$7,29 \cdot 10^{-7}$	0,622	1	0,019
S	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$9,87 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	0,045	0,180	0,019	1

С учетом того, что $A_{ij} = \exp(-\xi_{ij}/(RT))$, формула (3) для расчета коэффициента компонентов шлакового расплава принимает вид

$$\psi_i = \left[\sum_{j=1}^k x_j \cdot A_{ij} \right]^{-1}, \quad (5)$$

Вычисленные по выражению (5) коэффициенты активности компонентов шлаков опытных плавов приведены в табл. 11.

Таблица 11.

Значения коэффициентов активности ψ_i компонентов шлака

Номер плавки	Номер замера	ψ_{Ca}	ψ_{Mg}	ψ_{Al}	ψ_{Si}	ψ_{Fe}	ψ_O	ψ_F	ψ_S
B21960	1	2,401	2,549	2,410	2,868	13,224	1,980	2,447	12,326
	2	2,403	2,492	2,385	2,768	12,230	1,932	2,615	10,462
	3	2,380	2,505	2,378	2,806	13,097	1,941	2,548	11,427
B21928	1	2,417	2,538	2,414	2,836	12,212	1,970	2,486	11,987
	2	2,419	2,511	2,401	2,790	12,099	1,926	2,548	11,411
	3	2,406	2,504	2,391	2,789	12,670	1,911	2,585	10,796
B21445	1	2,339	2,494	2,353	2,814	13,028	1,968	2,571	11,891
	2	2,431	2,507	2,405	2,777	12,006	1,937	2,608	10,069
	3	2,425	2,574	2,433	2,900	14,166	2,007	2,339	12,849
	4	2,371	2,491	2,367	2,790	13,137	1,915	2,617	10,778

Активности компонентов шлакового покрова находится из выражения (6) (табл. 12)

$$a_{(i)} = \psi_i \cdot x_i \quad (6)$$

Таблица 12.

Вычисление значения активности компонентов шлаков

Номер плавки	Номер замера	a_{Ca}	a_{Mg}	a_{Al}	a_{Si}	a_{Fe}	a_O	a_F	a_S
B21960	1	0,798	0,057	0,083	0,113	0,059	0,808	0,378	0,054
	2	0,662	0,111	0,159	0,129	0,018	0,875	0,263	0,124
	3	0,733	0,072	0,132	0,119	0,012	0,856	0,301	0,065
B21928	1	0,740	0,097	0,111	0,103	0,103	0,825	0,352	0,058
	2	0,684	0,111	0,136	0,130	0,047	0,862	0,290	0,052
	3	0,644	0,086	0,210	0,116	0,010	0,877	0,261	0,085
B21445	1	0,800	0,055	0,099	0,088	0,084	0,853	0,307	0,040
	2	0,620	0,120	0,195	0,125	0,027	0,869	0,272	0,164
	3	0,739	0,082	0,151	0,072	0,011	0,757	0,451	0,079
	4	0,675	0,059	0,216	0,099	0,011	0,885	0,247	0,082

Вычисленные по формуле (7) значения содержания кислорода в металле опытных плавок обобщены в табл. 13.

$$[O] = \frac{a_{(O)} \cdot a_{(Fe)}}{K_o}, \quad (7)$$

где K_o - константа равновесия реакции $[Fe] + [O] = (Fe) + (O)$. По данным [4], при температуре 1873 К, $K_o = 4,349$.

Таблица 13.

Содержание кислорода в стали ШХ15СГ-В по ходу обработки экспериментальных плавок на УПК

Номер шлака	Массовая доля кислорода в стали (% масс)		
	Номер плавки		
	B21960	B21928	B21445
1	0,011	0,020	0,017
2	0,004	0,009	0,005
3	0,002	0,002	0,002
4	-	-	0,002

Рассчитанные значения содержания кислорода в подшипниковой стали ШХ15 по ходу обработки металла-полупродукта на УПК по данным активности FeO в конкретном шлаке каждой из трех стадий следует интерпретировать как соответствующим остаточным концентрациям в металле активных элементов – алюминия и кальция [6].

Таким образом, содержание кислорода в металле по ходу внепечной обработки меняется в диапазоне от 0,011-0,02% до 0,002%.

Выводы

1. Изложены основные положения разработанной инновационной технологии выплавки в дуговой электропечи металла-полупродукта подшипниковых сталей ШХ15, ШХ15СГ-В, раскисления и легирования их феррохромом и ферросиликомарганцем в печи с последующим

рафинированием (десульфурацией и раскислением) в электропечи ковше и вакуумированием в ковшевом вакууматоре.

2. Приведены статистические данные 2007-2010 гг. о снижении загрязненности подшипниковой электростали ШХ15СГ-В оксидами, глобулярными и сульфидными включениями и повышения выхода годного сортового проката при отбраковке его по неметаллическим включениям.

3. Исследованы химический и минеральный составы шлака, сформировавшегося в дуговой печи перед выпуском металла-полупродукта, установлено наличие в микроструктуре шлака различных по химическому составу фазово-минеральных образований.

4. Кратко изложены основные положения метода определения активности компонентов шлаков по теории А.Г. Пономаренко и отмечены особенности вычисления при наличии трех видов анионов (O^{2-} , F^{1-} , S^{2-}) оксидно-фторидных содержащих фаз рафинировочных шлаков. Для стали ШХ15СГ-В выполнен расчет активности компонентов динамически изменяющегося шлака по ходу внепечной обработки.

5. Расчитано содержание кислорода в металле по ходу обработки экспериментальных плавок на УКП, что позволит в дальнейшем прогнозировать динамику серы в расплаве.

6. Проведенные расчеты позволят оценить эффективность технологии рафинирования стали ШХ15СГ-В и разработать рекомендации по ее усовершенствованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панченко А.И. Разработка инновационной технологии выплавки подшипниковой электростали ШХ15СГ-В, соответствующей по неметаллическим включениям стандарту ASTM E-45 / А.И. Панченко, А.С. Сальников, М.И. Гасик // Современная электрометаллургия. – 2010. - №.4 – С. 30-36.
2. Панченко А.И. Математическая модель управления корректировкой химического состава подшипниковой электростали на УКП / А.И. Панченко, А.В. Жаданос, М.И. Гасик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. - № 6. – С.48-54.
3. Теоретические предпосылки процессов формирования оксидных и глобулярных включений при различных остаточных содержаниях кальция и алюминия / М.И. Гасик, А.П. Горобец, А.И. Панченко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. - № 1. – С.48-54.
4. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов / В.А. Григорян, А.Я. Стомахин, Ю.И. Уточкин, А.Г. Пономаренко [и др.] // М.: МИСиС, 2007. – 318 с.
5. Григорян В.А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов / В.А. Григорян, Л.Н. Белянчиков, А.Я. Стомахин // М.: Металлургия, 1987. – 270 с.
6. Неметаллические включения в сортовом прокате электростали ШХ15СГ-В / М.И. Гасик, К.В. Григорович, А.И. Панченко, А.С. Сальников, С.С. Шибаев, А.К. Гербер, А.Ю. Долматов // Электрометаллургия. – 2010. - №.5 – С. 2-14.