

Д.Н.Тогобицкая, А.И.Белькова, Н.А.Гладков, А.Ю.Гринько

**ВЫЯВЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ  
КОМПОНЕНТОВ В СИСТЕМЕ «МЕТАЛЛ–ШЛАК»  
С ЦЕЛЬЮ НАПРАВЛЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ  
СОСТАВА РАСПЛАВОВ В ГОРНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Целью работы является выявление достоверных соотношений компонентов системы «металл–шлак» на основе анализа существующих подходов к изучению процессов взаимодействия металлического и шлакового расплавы при выплавке чугуна. Показана неоднозначная трактовка термодинамических соотношений компонентов чугуна и шлака в горне доменной печи. Предложены критерии и методика оценки результатов взаимодействия с позиций кооперативного ионообменного процесса.

**металлический и шлаковый расплавы, термодинамическое состояние, сера, кремний, коэффициенты распределения**

**Современное состояние вопроса.**

Необходимость оценки термодинамического состояния системы «металл–шлак» в горне доменной печи с целью повышения эффективности процесса выплавки высококачественного чугуна предопределяет поиск новых подходов в установлении достоверных взаимосвязей элементов продуктов плавки с последующим доведением результатов до практического использования.

Состав продуктов доменной плавки формируется в результате многочисленных агрегатных превращений шихтовых материалов в печи и зависит от состава и свойств поступающих в горн первичных расплавы, а также от процессов взаимодействия между чугуном и шлаком. К настоящему времени в результате многочисленных исследований, опирающихся на идеи электрохимической теории взаимодействия жидких металла и шлака, накоплен значительный экспериментальный материал и установлены зависимости, связывающие доли серы и кремния с рядом термодинамических и технологических факторов доменного процесса. Полученные при этом термодинамические характеристики в большинстве случаев применимы для равновесных условий и используются с целью оценки предельных значений показателей. Опубликованные данные о связи технологических параметров плавки с коэффициентом распределения серы между чугуном и шлаком не носят универсальный характер, что ограничивает их применение в изменяющихся условиях доменной плавки.

Кроме того, современная тенденция массовой выплавки чугуна с низким содержанием серы и кремния наталкивается на ряд трудностей, в том числе, термодинамических, связанных с резко противоположными усло-

виями образования низкосернистого чугуна при невысоком количестве в нем кремния.

**Целью настоящей работы** является выявление достоверных соотношений компонентов системы «металл–шлак» на основе анализа существующих подходов к изучению процессов взаимодействия металлического и шлакового расплавов в горне доменной печи с последующим использованием результатов для управления шлаковым режимом доменной плавки в системах АСУТП.

#### **Изложение основных материалов исследования.**

Химическое взаимодействие металла и шлака сводится к ряду протекающих на границе раздела фаз процессов окисления и восстановления. В горне доменной печи завершается процесс восстановления железа, чугун насыщается углеродом, формируется содержание кремния, марганца и фосфора, происходит переход серы из чугуна в шлак. Успешному протеканию указанных процессов способствует высокая температура, восстановительная атмосфера в горне, достаточный приход тепла, при этом не последнюю роль играют физико–химические свойства шлака, его активность и серопоглотительная способность.

В современных условиях содержание кремния в чугуне наряду с содержанием серы является одним из основных показателей качества чугуна. Кремний восстанавливается в основном из летучего оксида  $\text{SiO}$  при газификации золы кокса в фурменной зоне и частично из жидкого шлака ниже распара в заплечиках. Он активно поглощается восстановленным железом и переходит в чугун. У фурм он окисляется и его содержание в чугуне снижается до уровня выпускаемого металла из печи.

Многочисленными исследованиями обосновано и в производственных условиях подтверждено положение, что повышение основности шлаков при прочих неизменных условиях резко снижает количество кремния в конечном чугуне.

По мнению А.Д.Готлиба [1] предельное содержание кремния в чугуне при данном составе шлака определяется температурой шлака, связанной, как показано В.Г.Воскобойниковым, с количеством кремния в металле [2]. Кроме того, данные [1] свидетельствуют о том, что с повышением температуры кристаллизации шлака повышается содержание кремния в чугуне. Павлов М.А. показал [3], что температура плавления шлака определяет температуру, которую шлак будет иметь на уровне фурм. Легкоплавкие шлаки, не успевая нагреться, мало приносят тепла в горн. Тугоплавкие шлаки, лучше прогреваясь в нижних слоях, обеспечивают более высокую температуру. Более поздние исследования свидетельствуют, что независимо от температуры кристаллизации шлака, кремния в чугуне тем больше, чем больше тепла в горне, чему соответствует более высокая температура шлака.

Установленные в работе [2] зависимости между содержанием кремния в чугуне и температурой шлака для четырех групп шлаков, различающих-

ся составом, позволяют количественно оценить температуру в горне по температуре шлака. Так, например, для шлаков с содержанием  $Al_2O_3$  – 8–22%,  $MnO < 3\%$  и отношением  $((CaO)+(MgO)+(MnO))/(SiO_2) > 1,25$  температура шлака определяется из уравнения:

$$T_{\text{шл}} = 80[Si] - 10 [Si]^2 + 1375. \quad (1)$$

Таким образом, на долю кремния влияют как состав шлака, так и температурно–тепловой режим печи, и этим определяется протекание важнейшего процесса в горне доменной печи – десульфурации чугуна. Окончательное содержание серы в шлаке устанавливается в горне при взаимодействии чугуна и шлака.

Для успешного развития процесса десульфурации необходимы восстановительные условия – малое содержание (FeO), присутствие в металле элементов–восстановителей с большим сродством к кислороду (углерода, кремния, марганца). Содержание (FeO) негативно влияет на десульфурацию в самых небольших количествах. По данным [1] если оно больше 0,5–0,6%, то сера переходит в чугун. По мнению Попеля С.И. [4] имеющиеся в литературе экспериментальные данные о величинах равновесного коэффициента распределения серы  $L_s'$  без указания содержания (FeO) в значительной степени обесценены, т.к. сами по себе величины  $L_s'$  не характеризуют равновесие реакций десульфурации. Такой характеристикой может служить произведение  $L_s'' = L_s'(FeO)$ , являющееся равновесным соотношением для реакции десульфурации.

Присутствие марганца, кремния, а также углерода заметно влияет на коэффициент активности серы в металле  $f_{[S]}$ . Восстанавливая железо из шлаков и понижая содержание кислорода в металле, они способствуют увеличению  $L_s'$ . Наличие кремния и углерода в металле увеличивает  $f_{[S]}$ , что приводит к глубокой десульфурации чугуна. Добавление марганца заметно уменьшает  $f_{[S]}$ . Известно, что сера и марганец в металле связаны эмпирическими уравнениями типа  $[S][Mn]=const$ ;  $[S]=a/[Mn]+b$ . Присутствие в металле элементов с меньшим химическим сродством к кислороду, чем у железа (Cu, Co, Ni W) и одновременно слабо влияющих на  $f_{[S]}$  практически не изменяют полноту десульфурации.

Опубликованные данные о влиянии температуры на полноту процесса десульфурации металла противоречивы – имеются сведения как о росте, так и понижении  $L_s'$  при повышении температуры. Установление точных связей затруднено [4]. А.Д Готлиб утверждал, что температуру шлака нельзя отрывать от основности. Как повышение температуры шлака недостаточно для успешного обессеривания, так и повышение основности, если ему не соответствует рост температуры, не может обеспечить необходимого количества серы в металле [1].

Значение фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком ( $L_s$ ) определяется многими факторами, в частности температурой и вязкостью шлака, активностью CaO в шлаке и др.

В рамках настоящего исследования рассмотрено ряд зависимостей, определяющих факторы влияния на обессеривание чугуна.

Уравнение Г.Шенка для десульфурации чугуна [4]:

$$\lg \frac{(S)}{a_{[S]}} = -0,65 + (19X^2_{MgO} + 1,06)^2 \left( \frac{X_{CaO}}{X_{SiO_2}} \right)^2, \quad (2)$$

$$\text{где } a_S = [S] \cdot f_{[S]}; f_{[S]} = 0,085 \cdot [Si] + 0,74 \quad (3)$$

В.Г. Воскобойников предложил [2] формулу для расчета на практике фактического коэффициента распределения серы  $L_{S, \text{фак}}$ , учитывающего состав и температуру шлака, которая обусловлена по формуле (1) содержанием кремния в чугуне:

$$L_{S, \text{фак}} = \eta L_{S, 1450}, \text{ где} \quad (4)$$

$$L_{S, 1450} = 98x^2 - 160x + 72 - [0,6(Al_2O_3) - 0,012(Al_2O_3)^2 - 4,032]x^4, \quad (5)$$

$$x = (CaO + MgO + MnO) / SiO_2,$$

$\eta$  – температурный коэффициент, определяемый из выражения:

$$\eta = 2,7 \cdot (T_{\text{шл}}/100) - 0,067 \cdot (T_{\text{шл}}/100)^2 - 24,063, \quad (6)$$

$T_{\text{шл}}$  – температура шлака,  $^{\circ}C$ .

Н.Л. Гольдштейн [5] рекомендовал пользоваться формулами, учитывающими влияние на  $L_S$  основности шлака и содержания кремния в чугуне (отражающего температуру шлака). Для чугунов с содержанием кремния менее 0,5 % и при его содержании 0,5–1,1 % предложены формулы соответственно:

$$L_S = 78,5B[Si] - 12,1B - 62,7[Si] + 16,1 \quad (7) - (8)$$

$$L_S = 10,9B[Si] + 21,7B + 1,8[Si] - 16,2$$

где  $B$  – основность шлака  $CaO/SiO_2$ .

Эти формулы выведены для условий Магнитогорского завода, поэтому они отражают местную специфику: низкое содержание серы в шихте,  $(Al_2O_3) - 15-19\%$ ,  $[Mn] < 1,8\%$ .

Подход к оценке обессеривающей способности шлаков, развитый И.С. Куликовым [6], базируется на использовании предложенного показателя серопоглотительной способности, определяемого уравнением

$$C^s = \frac{L_S \cdot P_{CO}}{f_{[S]}}$$

температурой и концентрацией кремния в чугуне:

$$\lg f_{[S]} = -\frac{1300}{T} + 1,473 + 0,047[\%Si] + 0,0024[Si]^2 \quad (9)$$

В. Венцель [7] в условиях взаимодействия чугуна и синтетического шлака из  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$ , установил следующую зависимость:

$$\lg L_S = 2 \lg [Si] - 0,04 \quad (10)$$

По исследованиям Б.В. и Л.В. Юрьевых [8] коэффициент распределения серы (при соответствующей корректировке оксидного состава шлака)

выражается уравнением  $L_s = \frac{5S}{[S] \cdot f_{[S]}}$ . При этом  $f_{[S]}$  изменяется от концен-

трации кремния в чугуна по зависимости

$$f_{[S]} = 3,4 + 1,5[Si] + 0,1[Si]^2 \quad (11)$$

По данным авторов [9] влияние компонентов чугуна на коэффициент активности серы в расплаве железа определяется выражениями:

$$\lg f_{[S]}^{Si} = 0,065[Si] + 0,0028[Si]^2 \quad (12)-(13)$$

$$\lg f_{[S]}^C = 0,1[C] + 0,06[C]^2$$

Причем в случае совместного присутствия компонентов в расплаве их влияние на коэффициент активности серы определяют путем первоначального расчета эквивалентных содержаний углерода и кремния:

$$[C]_{\text{эkv}} = [C] + 0,63[Si] + 0,4[P] - 0,27[S] - 0,23[Mn] \quad (14)$$

$$[S]_{\text{эkv}} = 1,7[C] + [Si] + 0,66[P] - 0,46[S] - 0,39[Mn] \quad (15)$$

В работе [10] экспериментально определен уровень парциального давления кислорода в чугуна и шлаке текущего состава. По результатам исследований определена активность перехода серы  $[S] \rightarrow (S)$ . При этом коэффициент активности серы выражен уравнением:

$$\lg f_{[S]} = 0,1[C] - 0,026[Mn] + 0,063[Si] \quad (16)$$

Югов П.И., рассматривая научные аспекты десульфурации металла в работе [11] отметил, что в доменном процессе изменение содержания кремния в чугуна заметно отражается на содержании в нем серы: с уменьшением  $[Si]$  на 0,1% содержание серы увеличивается на 0,003%, что следует из уравнения:

$$[S] = 0,058 - 0,033 [Si] \quad (17)$$

Для расчета фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком в работе [12] предложена формула, выведенная В.Г.Воскобойниковым и А.Г.Михалевичем, адаптированная для условий работы доменных печей завода им.Петровского.

$$L_s = -37,5 + 73,16 B + 46,93[Si] - 36,77B^2 - 60,38[Si]^2 + 56,88B[Si], \quad (18)$$

где  $B$  – основность шлака,  $[Si]$  – содержание кремния в чугуна, %

Следует отметить, что в ряде работ рассмотрены и другие факторы, влияющие на десульфурацию чугуна и восстановление кремния, в частности, качественные характеристики кокса, наличие в шлаках щелочных элементов, содержание фосфора в чугуна и т.д. Однако, многочисленные соотношения для определения содержания серы и кремния в чугуна (и их коэффициентов распределения) в зависимости от технологических параметров плавки не носят универсального характера и выведены для определенных условий плавки.

Выполненный в рамках данного исследования сравнительный анализ рассчитанных коэффициентов распределения и активности серы в чугуна по формулам разных авторов для условий работы ДП №5 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (рис.1–2) свидетельствуют о разногласии расчет-

ных величин, что ограничивает применение известных разработок для достоверного прогнозирования состава чугуна и шлака в конкретных технологических условиях. Отсутствие единой теоретической основы для описания процессов взаимодействия в системе «чугун–шлак» определяет необходимость развития существующих и разработки новых подходов с доведением результатов до стадии промышленного использования при управлении качеством металлопродукции.

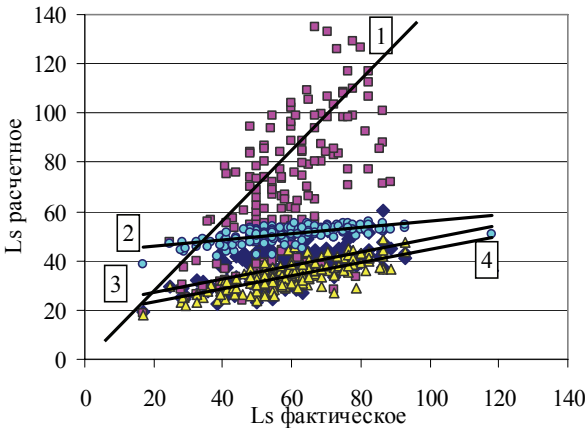


Рис.1. Сравнительный анализ фактического коэффициента распределения серы в условиях ДП №5 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с расчетными значениями по данным разных авторов: 1 – уравнение (2), 2 – уравнение (18), 3 – уравнение (7), 4 – уравнение (4).

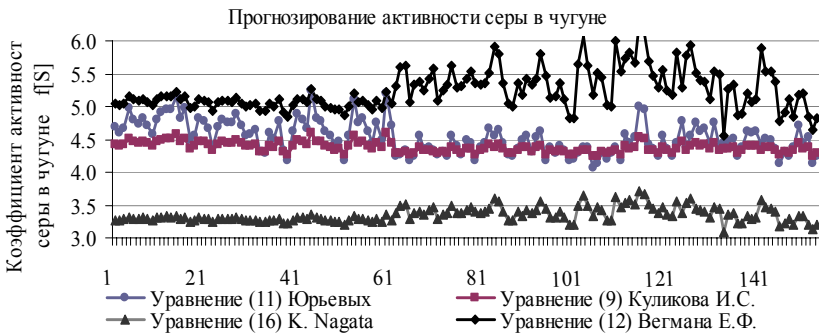


Рис.2. Прогнозирование активности серы в чугуне

**Моделирование взаимодействия в системе «металл–шлак» как кооперативного ионообменного процесса.** В Институте черной металлургии взаимодействие в системе «металл–шлак» рассматривается с позиций кооперативного ионообменного процесса, учитывающего роль и влияние межатомного взаимодействия на формирование состава и свойств расплавов [13]. Определенные наработки в этом направлении реализованы в автоматизированной системе «Шлак» [14], предназначенной для контроля качества чугуна и оптимизации шлакового режима по расчи-

таннным свойствам шлака. Прогнозирование состава и свойств продуктов плавки в системе осуществляется на основе расчета коэффициентов распределения элементов в зависимости от показателей состава загружаемой шихты и дутьевого режима.

Опыт внедрения системы «Шлак» в АСУТП доменных печей Украины показал необходимость уточнения прогнозных моделей коэффициентов межфазного распределения элементов с учетом закономерностей формирования и согласованного изменения составов металлического и шлакового расплавов в горне доменной печи.

На предыдущих этапах исследований реальных металлургических систем [13] было установлено, что распределение компонентов между металлом и шлаком определяется двумя группами факторов: свойствами среды, выраженными через интегральные параметры ( $Z^Y$  для металла,  $\Delta e$  и  $\rho$  для шлака), и локальным окружением каждого из компонентов  $\Xi$ , которое определяется средневзвешенным значением его эффективного заряда ( $Z\Xi$ ). Изменение состояния каждого из компонентов при переходе из одной фазы в другую может быть определено как «перезарядка» ионов диффундирующего элемента  $\Delta Z\Xi$ , равного разности зарядов элемента в металле [ $Z^p_M$ ] и шлаке ( $Z^p_{ш}$ ):  $\Delta Z\Xi = [Z^p_M] - (Z^p_{ш})$ .

Анализ производственных данных показателей выплавки фосфористого и малофосфористого чугунов 25 металлургических предприятий мира [15] (табл.1) позволил установить влияние интегральных характеристик расплавов на показатели качества доменной плавки – содержание серы и кремния в чугуне, а также на коэффициенты распределения этих элементов между чугуном и шлаком. Так, например, на рис.3 показана вполне удовлетворительная связь содержания серы в чугуне с интегральным показателем стехиометрии  $\rho$ , который вычисляется на основе полного состава шлака и учитывает влияние всех компонент шлака (табл.2). В то время как с традиционно используемым показателем основности  $CaO/SiO_2$  связи не наблюдается на всем массиве и даже в пределах одного завода.

Таблица 1. Химический состав чугуна и шлака доменных печей мира по данным работы [15]

№	Состав чугуна, вес.%					Состав шлака, вес.%							CaO/ SiO <sub>2</sub>
	C	Si	Mn	P	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	FeO	S	
1	3,8	0,39	1,07	1,92	0,053	34,6	11,5	41,7	6,7	1,69	0,54	1,23	1,20
2	3,7	0,38	1,12	1,97	0,047	33,7	12,3	41,3	6,1	1,56	0,57	1,47	1,22
3	3,7	0,4	1,13	1,97	0,049	33,1	13,3	40,9	6,5	1,78	0,48	1,69	1,24
4	3,3	0,32	0,54	2,07	0,067	32,4	14,8	45,8	3,9	0,45	0,45	1,17	1,41
5	3,2	0,4	0,52	1,97	0,065	32,5	15,5	43,8	3,9	0,57	0,63	1	1,35
6	4,5	0,73	0,89	0,15	0,028	38,4	7,9	40,3	10,1	0,99	0,49	0,84	1,05

7	4,6	0,75	0,84	0,15	0,031	38,7	8	40,3	9,4	0,90	0,57	0,87	1,04
8	4,4	0,65	1,24	0,15	0,039	36,4	11,2	38,7	9,3	1,30	0,51	1,34	1,06

Таблица 2. Модельные параметры чугуна и шлака, соответствующие составам таблицы 1

№	Параметры чугуна				Параметры шлака					Параметры перезарядки	
	$d, 10^{-1}$ нм	$Z^y$	$Z_{[Si]}$	$Z_{[S]}$	$d, 10^{-1}$ нм	$\Delta e, e$	$\rho$	$Z_{(Si)}$	$Z_{(S)}$	$\Delta Z_{Si}$	$\Delta Z_S$
1	2,39	1,429	-1,19	0,07	2,85	-2,386	0,719	-2,45	1,18	-1,26	1,11
2	2,40	1,427	-1,20	0,05	2,84	-2,339	0,718	-2,43	1,20	-1,23	1,14
3	2,40	1,428	-1,20	0,06	2,85	-2,342	0,721	-2,45	1,18	-1,25	1,12
4	2,42	1,403	-1,25	0,01	2,73	-2,008	0,721	-2,28	1,31	-1,02	1,29
5	2,43	1,398	-1,27	0,00	2,74	-2,065	0,717	-2,30	1,30	-1,03	1,30
6	2,34	1,414	-1,10	0,15	2,90	-2,589	0,715	-2,52	1,12	-1,42	0,97
7	2,34	1,416	-1,09	0,16	2,89	-2,578	0,712	-2,51	1,14	-1,42	0,97
8	2,35	1,416	-1,11	0,14	2,89	-2,538	0,714	-2,51	1,12	-1,40	0,98

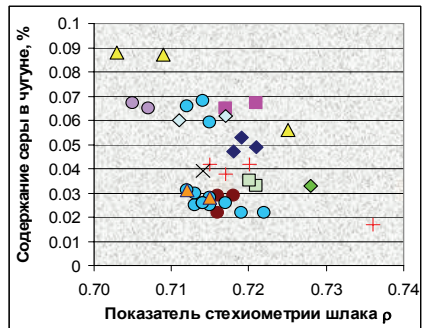
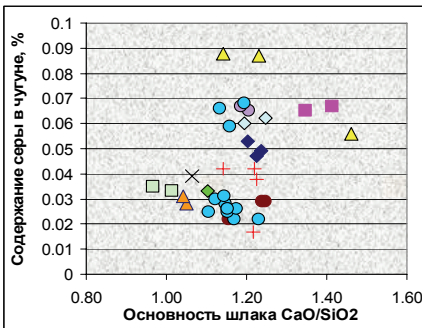


Рис.3. Влияние основности  $CaO/SiO_2$  и показателя стехиометрии шлака  $\rho$  на содержание серы в чугуне по данным 25 металлургических предприятий мира

Полученные уравнения для расчета серы и кремния, а также коэффициентов их распределения между чугуном и шлаком в условиях работы 25 заводов мира, учитывают влияние всех компонент расплавов путем сочетания интегральных параметров  $Z^y$ ,  $\Delta e$  и  $\rho$  и парциального параметра «перезарядки»  $\Delta Z_s$ , использование которого существенно повышает точность расчета, оцениваемую по коэффициенту корреляции  $R$  (табл. 3). Например, для расчета содержания серы в чугуне уравнение имеет вид (коэффициент корреляции  $R=0,83$ ):

$$[S] = -0,35 - 0,08 \Delta e - 0,06 \rho + 0,22 \Delta Z_s \quad (19)$$



Влияние параметра  $\Delta Z_{\text{э}}$  тем выше, чем больше система отклонена от равновесия. В данном случае по кремнию система находится дальше от равновесия, чем по сере. Таким образом, параметр  $\Delta Z_{\text{э}}$  можно использовать в качестве индикатора отклонения системы от равновесия.

Таблица 3. Влияние параметра перезарядки на распределение элементов в системе «металл–шлак»

Показатель расчета	Значение коэффициента корреляции $R$ прогнозного уравнения:	
	Показатель = $f(Z^Y, \Delta e, \rho)$	Показатель = $f(Z^Y, \Delta e, \rho, \Delta Z_{\text{э}})$
Содержание серы в чугуна, % [S]	0,66	0,83
Содержание кремния в чугуна, % [Si]	0,44	0,79
Коэффициент распределения серы $L_s$	0,81	0,9
Коэффициент распределения кремния $L_{Si}$	0,5	0,84

Данные о коэффициентах активности серы и кремния, приведенные А.Клитцером в работе [15] для 25 металлургических заводов были использованы нами при разработке методики определения активностей компонентов многокомпонентных металлических и шлаковых расплавов в зависимости от интегральных параметров состава чугуна и шлака [16]. Так, для расчета коэффициента активности компонента  $X$  в чугуна предложено уравнение:

$$\lg f_{[X]} = 1,21 \cdot (\rho_{[X]} + Z^Y \cdot Z_{0,[X]}^Y) - 5,64 \quad (20)$$

где  $\rho_{[X]}$ ,  $Z_{0,[X]}^Y$  – соответственно зарядовая плотность и зарядовое состояние компонента  $X$  до вступления в реакцию компонента,  $Z^Y$  – химический эквивалент, суммирующий данные об эффективных зарядах всех компонентов металлического расплава.

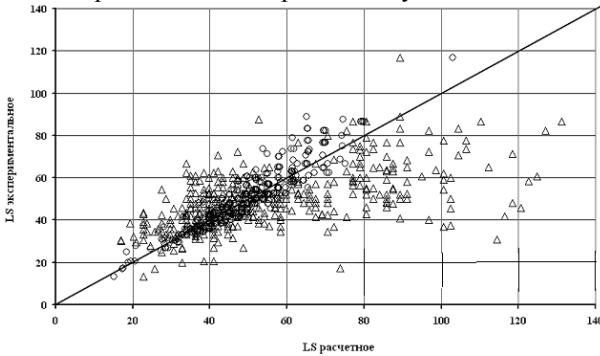
В результате обобщения данных о работе ДП№9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» было получено уравнение для расчета коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком в зависимости от активности серы в чугуна:

$$L_s = 4.32 \cdot a_{[S]}^{-1.13}, \quad (21)$$

Сопоставление рассчитанного значения  $L_s$  по модели (21) и по формуле В.Венцеля (10) (рис. 4) показывает преимущество использования разработанной методики при моделировании процессов распределения элементов в системе «чугун–шлак» и перспективы использования результатов в производственных условиях в системах АСУТП при решении задач управления качеством чугуна.

**Выводы.** Таким образом, создание эффективных способов управления и оптимизации качества чугуна в настоящее время связано с поиском

новых подходов и обобщением на новом уровне достигнутых ранее результатов многочисленных исследований процессов взаимодействия компонентов комплексной системы «металл–шлак». Неоднозначность и противоречивость установленных зависимостей для определения содержания серы и кремния в чугунах (и их коэффициентов распределения) для реальных процессов разработаны для различных условий и диапазонов, что ограничивает их применение в современных условиях.



о – расчет по модели (21),  $\Delta$  – расчет по формуле (10) В. Венцеля  
Рис.4. Соответствие экспериментальных и расчетных значений коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком

Моделирование взаимодействия в расплавах как кооперативного ионообменного процесса позволит с единых позиций описать условия формирования расплавов в горне доменной печи и использовать полученные зависимости и критерии в различных сырьевых и технологических условиях доменной плавки в системах АСУТП.

1. Готлиб А.Д. Доменный процесс / Готлиб А.Д. – М.: Metallurgiya, 1966. – 504с.
2. Свойства жидких доменных шлаков / [Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалеви́ч А.Г. и др.] – М.: Metallurgiya, 1975. – 182 с.
3. Павлов М.А., Metallurgiya чугуна. Ч.2. Доменный процесс / Павлов М.А. – Metallurgizdat, 1949.
4. Попель С.И., Теория металлургических процессов / Попель С.И., Сотников А.И., Бороненков В.А. – М.: Metallurgiya, 1986. – 463 с.
5. Гольдштейн Н.Л. Обессеривающая способность доменных шлаков / Гольдштейн Н.Л. // Сталь. – 1953. – № 7.
6. Куликов И.С. Десульфурация чугуна / Куликов И.С. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 306с.
7. Thyssenforschung. –1969. – 1. – № 3. – р. 81–91
8. Юрьев Б.Н. Методы расчета доменной плавки / Юрьев Б.Н., Юрьева Л.В. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 304 с.
9. Вегман Е.Ф. Metallurgiya чугуна / Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С. – М.: Metallurgiya, 1978.

10. *K. Nagata*. Oxygen Potentials in Liquid Pig Iron and Slag and Analysis of Reactions in Blast Furnace by Means of Affinities in Reaction / K. Nagata and all / [S] jap. – 1982. – p. 207–214.
11. *Югов П.И.* Научные аспекты десульфурации металла / П.И. Югов // *Металлург*. – 1996. – № 11. – С. 26–29.
12. *Ковшов В.Н.* Оптимизация шлакового режима доменной плавки в условиях ОАО ДМЗ им. Петровского / Ковшов В.Н., Дышлевич И.И., Каракай С.Н. [и др.] // *Теория и практика металлургии*. – 2001. – № 1 (21). – Стр. 6–8.
13. *Тогобицкая Д.Н.* Система «металл–шлак» как объект моделирования / Д.Н. Тогобицкая, Э.В. Приходько // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – Киев: Наукова Думка, 1998. – С. 98–104.
14. *Тогобицкая Д.Н.* Опыт создания и внедрения системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки в шихтовых и технологических условиях заводов Украины / Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, А.Ф. Хамхотько, Д.А. Степаненко // *Сб. научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. – Днепропетровск. – 2009. – Вып. 19. – С. 100–112.
15. *фон Клитцер А.* Поведение кремния в доменной печи / фон А.Клитцер, // *Черные металлы*. – 1966. – № 16. – Стр. 67–75.
16. *Гринько А.Ю.* Прогнозирование термодинамических свойств расплавов при выплавке чугуна / Гринько А.Ю., Тогобицкая Д.Н. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. Науч. Тр. – Днепропетровск. – 2005. – Вып. 11. – С. 185–193.

*Статья рекомендована к печати:  
докт.техн.наук., проф. Э.В. Приходько*

*Д.М. Тогобицька, А.І. Белькова, М.А. Гладков, А.Ю. Грінько*

**Виявлення термодинамічних співвідношень компонентів у системі «метал–шлак» з метою спрямованого формування складу розплавів у горні доменної печі**

Метою роботи є виявлення достовірних співвідношень компонентів системи «метал–шлак» на основі аналізу існуючих підходів до вивчення процесів взаємодії металевого та шлакового розплавів при виплавці чавуну. Показано неоднозначне трактування термодинамічних співвідношень компонентів чавуну й шлаків у горні доменної печі, Запропоновано критерії та методику оцінки результатів взаємодії з позицій кооперативного іонообмінного процесу хімічно єдиних систем.