

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

**РАЗВИТИЕ ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИХ ОСНОВ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ШЛАКОВЫМ РЕЖИМОМ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА
ОСНОВЕ ОПИСАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ
РАСПЛАВОВ В ГОРНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Целью работы является выявление закономерностей и критериев термодинамического согласования расплавов в горне для выработки управляющих решений в автоматизированной системе контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки. Установлено, что формирование расплавов в горне доменной печи осуществляется согласованно, о чем свидетельствует тесная связь между интегральными физико–химическими характеристиками чугуна и шлака. Получены аналитические зависимости для описания условия согласования расплавов в горне доменной печи с учетом температурных условий плавки.

доменная плавка, чугун, шлак, термодинамическое состояние, интегральные физико–химические параметры

Состояние проблемы. Совершенствование методов аналитического описания результатов взаимодействия в системе «металл–шлак» является одним из перспективных направлений развития автоматизированных систем управления, предназначенных для решения задач оптимизации свойств расплавов и повышения качества чугуна в современных нестабильных шихтовых и технологических условиях доменного производства. Неоднозначность и противоречивость установленных к настоящему времени закономерностей и соотношений между компонентами системы «чугун–шлак» затрудняет их использование для прогнозирования состава и свойств продуктов плавки в реальных условиях.

В отсутствии единой методологической основы в вопросах моделирования реальных металлургических систем в Институте черной металлургии НАН Украины на протяжении ряда лет ведутся работы по созданию инструментальных средств научных исследований в виде автоматизированных систем, физико–химические основы которых базируются на методике физико–химического моделирования состава и свойств металлургических расплавов с использованием параметров межатомного взаимодействия в расплавах [1–2].

Для контроля и оптимизации качества чугуна в промышленных условиях разработана автоматизированная система контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки «Шлак» [3]. В системе реализован нетрадиционный подход к решению задач управления качеством чугуна, основанный на прогнозировании состава и свойств продуктов плавки и стабилизации свойств конечного шлака в пределах, обеспечивающих получение чугуна требуемого состава. Опыт функционирования системы «Шлак» в условиях доменных печей заводов Украины [3] показал необхо-

димось развития методики расчета коэффициентов распределения элементов, на основе которой осуществляется расчет состава и свойств продуктов плавки в зависимости от параметров загружаемой шихты и дутьевого режима. Поскольку окончательное формирование состава чугуна и шлака происходит в нижних зонах доменной печи в результате ионообменного взаимодействия в системе «металл–шлак», то прогнозирование составов продуктов плавки необходимо осуществлять с учетом закономерностей взаимодействия расплавов в горне доменной печи.

Изложение материалов исследования. Анализ существующих подходов к вопросам взаимодействия расплавов в системе «чугун–шлак» показал [4], что большинство отечественных и зарубежных исследований посвящено описанию процессов в равновесных условиях. Представленные в ряде работ расчетные уравнения для реальных процессов выведены для определенных условий ведения плавки и использовать их при управлении шлаковым режимом доменной плавки в иных условиях без определенных доработок не представляется возможным.

Использование методики физико–химического моделирования состава и свойств металлургических расплавов для описания результатов формирования и взаимодействия металлической и шлаковой фаз при выплавке чугуна позволяет с единых теоретических позиций обобщать достижения различных исследований и описывать взаимосвязи между составом, электронной структурой и свойствами соединений с помощью интегральных и парциальных параметров, которые характеризуют химическое и структурное состояние этих веществ [1].

Основу информационного обеспечения исследований составляет база фундаментальных экспериментальных и технологических данных о распределении элементов в ходе реальных металлургических процессов «Металл–Шлак–Газ» [5]. В результате выполненных ранее работ [2,5] сформулированы основные принципы рассмотрения вопросов взаимодействия между металлом и шлаком с позиций кооперативного ионообменного процесса, на основе которого были получены первые результаты в описании условий согласования расплавов при достижении ими равновесия, а именно, коэффициентов межфазного распределения элементов в окислительных условиях с использованием интегральных параметров состава чугуна (Z^Y) и шлака (Δe и ρ).

С целью выявления критериев и закономерностей, описывающих условия согласования расплавов в восстановительных условиях доменной плавки, были проанализированы немногочисленные опубликованные экспериментальные данные о поведении расплавов при проведении исследований достижения системой «металл–шлак» равновесия по сере [6], а также фактические данные выпусков работы ДП Украины и России.

В частности, проанализированы фактические данные показателей доменных печей НЛМК объемом 3200 м^3 (табл.1,2) [7], содержащих информацию о формировании расплавов по ходу выпуска чугуна, т.е. для иссле-

двух выпусков было отобрано несколько проб чугуна и шлака через равные промежутки времени.

Таблица 1. Химический состав чугуна по сечению горна ДП НЛМК (L – расстояние от среза фурмы и на выпуске (ВП)) по данным работы [7]

№	L , мм	Химический состав чугуна, %					Химический эквивалент состава Z^Y
		Si	Mn	S	P	C	
1	500	1,06	0,23	0,131	0,04	2,74	1,347
2	1500	1,66	0,92	0,074	0,09	3,87	1,419
3	2500	1,97	0,78	0,053	0,1	4,28	1,437
4	3000	1,31	0,55	0,086	0,08	4,55	1,424
5	ВП	0,76	0,86	0,024	0,1	4,55	1,414
6	500	0,99	0,31	0,101	0,06	2,44	1,332
7	1500	1,72	0,61	0,104	0,07	3,42	1,400
8	2500	1,2	0,41	0,083	0,06	2,42	1,340
9	3000	2,15	0,44	0,095	0,1	3,66	1,418
10	ВП	0,55	0,52	0,019	0,1	4,81	1,410

Графическая интерпретация изменения показателей чугуна и шлака в процессе выпуска свидетельствует о том, что по мере формирования продуктов плавки химический эквивалент чугуна Z^Y и шлака Δe согласованно возрастают (рис. 1). Дополнительный учет показателя стехиометрии шлака ρ существенно повышает точность описания согласованного изменения химических эквивалентов составов металла и шлака:

$$Z^Y = 0,66 - 0,11 \cdot \Delta e + 1,44 \cdot \rho \quad R = 0,75 \quad (1)$$

Аналогичная зависимость получена для условий работы доменной печи объемом 1386 м^3 комбината «Азовсталь» [8]. На печи на протяжении пяти выпусков продуктов плавки в каждом выпуске через равные промежутки времени были отобраны по семь проб чугуна и шлака. Условие согласования составов чугуна и шлака определяется соотношением:

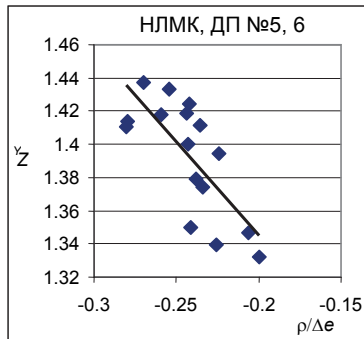
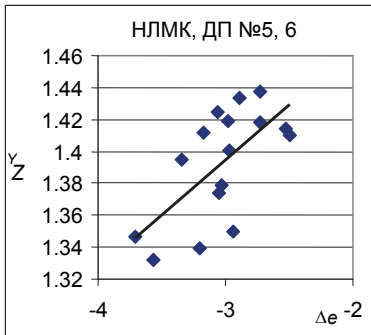
$$Z^Y = 0,47 + 0,72 \cdot \Delta e + 1,066 \cdot \rho \quad R = 0,76 \quad (2)$$

Анализ подобных закономерностей подтверждает обоснованность представлений о кооперативном характере ионообменных процессов в системе «металл–шлак» и предопределяет взаимосвязь составов металлического и шлакового расплавов в восстановительных условиях доменной плавки. В результате обобщения фактических данных о работе 25 металлургических предприятий мира, опубликованных в работе немецких исследователей процессов десульфурации чугуна Г.Энде и Г.Винцера [9], получено аналогичное уравнение взаимосвязи параметров чугуна и шлака:

$$Z^Y = 1,255 - 0,02 \cdot \Delta e + 0,17 \cdot \rho \quad R = 0,78 \quad (3)$$

Таблица 2. Состав и модельные параметры шлака, соответствующие составу чугуна таблицы 1

№	Химический состав шлака, %								Интегральные показатели шлака	
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaS	Δe	ρ
1	19,17	16,87	5,36	8,18	24,34	0,68	7,46	0,2	-3,704	0,736
2	33,19	33,27	7,19	2,19	10,17	0,91	8,64	0,53	-2,98	0,727
3	32,26	35,13	10,08	0	15,43	0,51	7,12	0,57	-2,917	0,736
4	33,18	34,41	8,02	0	18,62	0,34	7,76	0,55	-3,057	0,739
5	39,19	40,36	10,28	0	0,43	1,02	8,69	0,68	-2,528	0,740
6	32,06	23,64	8,13	9,22	20,77	1,54	4,47	0,17	-3,565	0,711
7	33,89	35,66	8,51	2,1	13,34	1,8	4,24	0,36	-2,974	0,722
8	34,9	36,36	8,71	0	13,38	1,44	4,57	0,63	-3,087	0,722
9	38,62	38,54	8,99	0	6,59	1,58	5,02	0,66	-2,727	0,733
10	40,6	41,43	8,81	0	0,58	0,98	6,11	0,58	-2,493	0,728



(а)

(б)

Рис. 1. Динамика изменения модельных параметров чугуна (Z^Y) и шлака (Δe , ρ) при выплавке чугуна в условиях работы НЛМК

Установленные зависимости (1)–(3) между химическим эквивалентом состава чугуна и параметрами шлакового расплава в виде $Z^Y = f(\Delta e, \rho)$ можно характеризовать как условие согласованного формирования составов продуктов плавки при выплавке чугуна. Причем, уравнения (1)–(2) относятся к процессу, когда оцениваются данные нескольких проб одного и того же выпуска, отбираемые через определенные временные интервалы и отражающие неравномерность состава продуктов плавки по ходу его формирования до момента окончательного выпуска. Уравнение (3) отражает условие согласования между продуктами доменной плавки различ-

ных выпусков, выплавленных в отличных сырьевых и технологических условиях 25 заводов мира. Однако, для практического использования установленной зависимости с целью оперативного контроля и дальнейшего управления процессом с помощью АСУ необходимо общие положения и закономерности уточнять и адаптировать в конкретных условиях доменной печи.

Анализ экспериментальных данных, полученных И.С.Куликовым при проведении серии лабораторных опытов по достижению системой «чугун–шлак» равновесия по сере [6] (табл.3,4), подтвердил выявленную закономерность согласованного формирования составов металлического и шлакового расплавов при выплавке чугуна в равновесных условиях (рис.2). При этом связь между параметрами чугуна и шлака в уравнении $Z^Y = f(\rho/\Delta e)$ характеризуется довольно высоким значением коэффициента корреляции $R = 0,84$, а с учетом температуры проведенных исследований коэффициент корреляции повышается до уровня 0,93:

$$Z^Y = 1,16 - 0,84 \cdot \frac{\rho}{\Delta e} \quad R = 0,8 \quad (4)$$

$$Z^Y = 0,529 - 0,427 \cdot \frac{\rho}{\Delta e} + 0,0003T \quad R = 0,93 \quad (5)$$

Таблица 3. Химический состав чугуна и шлака после достижения системой «чугун–шлак» равновесия по сере по данным работы [6]

№	Химический состав чугуна и шлака, %										
	Si	Mn	S	C	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	S
1	1,25	0,15	0,0083	4,62	40,2	15,3	34,8	8,93	0,04	0,15	1,68
2	1,85	0,15	0,0049	4,44	42,1	13,5	34,0	8,22	0,00	0,10	2,00
3	1,45	0,19	0,0227	4,19	41,8	11,5	36,5	9,73	0,00	0,10	2,34
4	3,08	0,14	0,0049	4,02	39,3	14,1	35,6	9,30	0,00	0,14	1,78
5	1,19	2,56	0,018	4,29	48,3	2,0	38,6	8,54	1,33	0,23	1,31
6	1,06	2,55	0,012	4,70	49,9	2,4	38,0	7,28	1,24	0,13	1,28
7	1,55	2,88	0,009	4,48	49,9	2,1	37,8	8,53	1,03	0,05	1,33
8	1,37	2,9	0,019	4,13	48,9	1,9	37,7	8,48	1,59	0,13	1,38
9	1,27	2,08	0,015	4,31	48,8	1,5	39,7	9,00	0,66	0,18	1,44
10	1,02	2,26	0,022	4,46	50,1	1,5	37,6	8,44	1,36	0,15	1,70

Следует отметить, что при определении параметров Δe и ρ оксидный расплав трактуется как полностью упорядоченная система [1]. Ранее нами было показано, что для оксидных систем, склонных к гетерогенности, целесообразно использовать модель полностью разупорядоченной структуры, которая характеризуется модельным параметром Z^Y , аналогично металлической системы [10].

В частности, на фактических данных работы ДП№9 ОАО «Арселор-Миттал Кривой Рог» было установлено, что отношение химических эквивалентов чугуна ($Z^Y_{\text{ч}}$) и шлака ($Z^Y_{\text{ш}}$) в комплексной системе «металл–шлак» $Z^Y_{\text{ч}}/Z^Y_{\text{ш}}$ находится в зависимости от отношения $\rho/\Delta e$ с коэффициентом корреляции $R=0,76$, в то время как в связи $Z^Y=f(\rho/\Delta e)$ $R=0,66$ (табл. 5), что свидетельствует о значимости параметра $Z^Y_{\text{ш}}$ при оценке степени разупорядочения атомов в структуре перегретого шлака.

Таблица 4. Показатели системы «чугун–шлак» при достижении равновесия по сере в соответствии с данными табл. 3

№	Коэф–т актив–ности f_s	$T, ^\circ\text{C}$	Основ–ть шлака CaO/SiO_2	Равнов. коэф–т L_s^0	Интегральные параметры чугуна и шлака		
					Z^Y	Δe	ρ
1	5,8	1500	1,15	202	1,415	-2,555	0,738
2	7,75	1500	1,24	408	1,425	-2,465	0,740
3	5,8	1460	1,14	103	1,408	-2,442	0,726
4	7,1	1500	1,10	363	1,444	-2,552	0,730
5	4,45	1450	1,25	73	1,444	-2,173	0,708
6	4,8	1450	1,31	107	1,452	-2,141	0,715
7	4,8	1450	1,32	145	1,463	-2,091	0,713
8	4	1450	1,30	73	1,450	-2,149	0,712
9	4,55	1400	1,23	95	1,439	-2,112	0,704
10	4,45	1430	1,33	77	1,439	-2,087	0,714

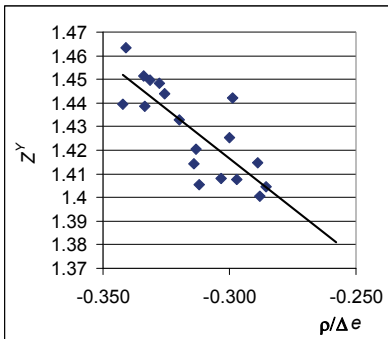


Рис.2. Зависимость между интегральными показателями чугуна и шлака в равновесных условиях по данным И.С.Куликова [6]

Аналогичные уравнения $Z^Y = f(\rho/\Delta e)$ и $Z^Y_{\text{ч}}/Z^Y_{\text{ш}} = f(\rho/\Delta e)$ были получены на представительных массивах выпусков для условий работы доменных печей ОАО «Запорожсталь», «Северсталь» и «ЗСМК» (табл. 5). При этом, учет параметра $Z^Y_{\text{ш}}$ суще-

ственно повышает описательную способность условия согласования расплавов в системе «чугун–шлак».

Химический состав чугуна и шлака во многом предопределен химическим составом проплавляемой шихты и получаемых из них первичных расплавов, однако, особенности технологического режима могут существенно повлиять на концентрацию отдельных компонент продуктов плав-

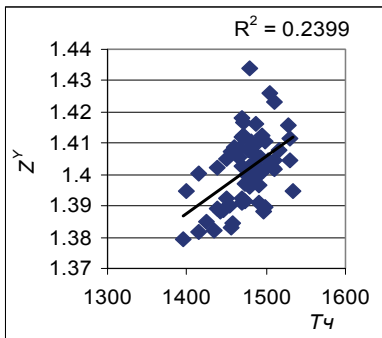
ки. Поэтому, при анализе производственных данных с целью описания условий согласования расплавов в системе металл–шлак следует учитывать влияние температурно–теплового потенциала в горне доменной печи.

Таблица 5. Условие согласования расплавов в системе «чугун–шлак»

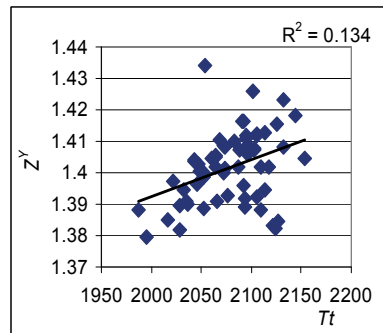
Доменная печь	Уравнение $Z^Y = f\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)$	Уравнение $\frac{Z_q^Y}{Z_{ш}^Y} = f\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)$
ДП №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»	$Z^Y = 1,17 - 0,73 \cdot \frac{\rho}{\Delta e}$ R=0,66	$\frac{Z_q^Y}{Z_{ш}^Y} = 1,02 - 0,31 \cdot \frac{\rho}{\Delta e}$ R=0,76
ДП №2 ОАО «Запорожсталь»	$Z^Y = 1,31 - 0,26 \cdot \frac{\rho}{\Delta e}$ R=0,6	$\frac{Z_q^Y}{Z_{ш}^Y} = 1,02 - 0,31 \cdot \frac{\rho}{\Delta e}$ R=0,72
ДП №5 ОАО «Северсталь»	$Z^Y = 1,31 - 0,31 \cdot \frac{\rho}{\Delta e}$ R=0,59	$\frac{Z_q^Y}{Z_{ш}^Y} = 1,01 - 0,45 \cdot \frac{\rho}{\Delta e}$ R=0,71
ДП №1 ОАО «ЗСМК»	$Z^Y = 1,36 - 0,21 \cdot \frac{\rho}{\Delta e}$ R=0,52	$\frac{Z_q^Y}{Z_{ш}^Y} = 0,98 - 0,7 \cdot \frac{\rho}{\Delta e}$ R=0,68

К сожалению, до настоящего времени из-за отсутствия достаточно надежных средств систематического замера температур чугуна и шлака, температуры фурменной зоны эти показатели пока не удается использовать в системах автоматического регулирования. В этих условиях чаще всего ориентируются на химический состав чугуна и шлака, который в значительной мере предопределен тепловым состоянием горна.

Известно, что температура продуктов плавки связана с температурой фурменной зоны $T_{фз}$, которая является одной из важнейших характеристик теплового состояния горна и связана, в свою очередь, с показателями дутьевого режима. Поскольку данные о такой температуре отсутствуют в средствах автоматического контроля АСУТП ДП, то в работе были рассмотрены связи химического состава чугуна Z^Y с его температурой T_q и теоретической температурой горения T_t (рис.3).



(a)



(б)

Рис.3. Взаимосвязь химического эквивалента состава чугуна Z^Y с температурой чугуна и теоретической температурой горения в условиях ДП№9 ОАО «Арселор-Миттал Кривой Рог»

Известно, что средние значения температуры $T_{\text{фз}}$ находятся в диапазоне 1700–1900⁰С, т.е. по значению температура фурменной зоны находится между величинами температуры чугуна $T_{\text{ч}}$ и теоретической температуры горения $T_{\text{т}}$. Среднее значение этих двух температур $T_{\text{фз}} = \frac{(T_{\text{ч}} + T_{\text{т}})}{2}$

было использовано в качестве косвенной оценки действительной температуры нижней части печи, влияние которой на Z^Y значительно выше, чем каждой из температур (рис. 4 (а)). Учет показателя $\tilde{T}_{\text{фз}}$ повышает точность описания условия согласования расплавов в системе «металл–шлак»:

$$Z^Y = 0,89 - 0,53 \frac{\rho}{\Delta e} + 0,0002 \tilde{T}_{\text{фз}} \quad R = 0,77 \quad (6)$$

$$\frac{Z_{\text{ч}}^Y}{Z_{\text{ш}}^Y} = 0,68 - 0,516 \frac{\rho}{\Delta e} + 0,00016 \tilde{T}_{\text{фз}} \quad R = 0,86 \quad (7)$$

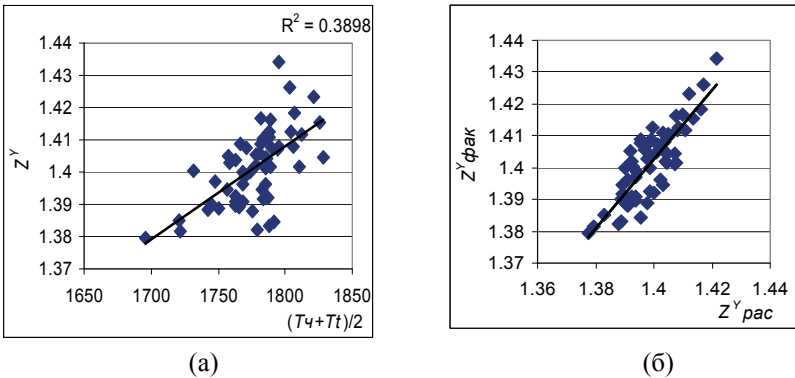


Рис.4. Сопоставление фактического и расчетного по модели (7) химического эквивалента чугуна Z^Y с учетом температурных условий доменной плавки ДП№9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

Выводы. Таким образом, в результате расчетно–аналитических исследований выявлены закономерности и критерии для описания условия согласования расплавов в горне доменной печи с использованием параметров межатомного взаимодействия. Установлено, что формирование химических составов металлического и шлакового расплавов в горне доменной печи при нормальном режиме работы осуществляется согласованно, о чем свидетельствует тесная связь между характеристиками чугуна и шлака, которые в интегральном виде учитывают влияние каждого компонента комплексной системы «металл–шлак» на процессы взаимодействия между ними. Получены аналитические зависимости вида $Z^Y = f(\rho, \Delta e, Z_{\text{ш}}^Y)$ для описания условия согласования химических составов

продуктов плавки с учетом температурно–теплового потенциала нижней части печи, которые могут быть использованы для оценки эффективности работы горна доменной печи.

1. *Приходько Э.В.* Металлохимия многокомпонентных систем / Э.В.Приходько. – М.: Металлургия, 1995. – 320с.
2. *Тогобицкая Д.Н.* Моделирование межфазного распределения элементов в системе «металл–шлак» при выплавке чугуна / Д.Н.Т. тогобицкая // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1999. – № 1. – С.115–119.
3. *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.
4. *Тогобицкая Д.Н.* Выявление термодинамических соотношений компонентов в системе «металл–шлак» с целью направленного формирования состава расплавов в горне доменной печи / Д.Н.Тогобицкая, А.И.Белькова, Н.А.Гладков, А.Ю.Гринько // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии».* – Днепропетровск – 2010. – Вып.21. – С.97–107.
5. *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.
6. *Куликов И.С.* Десульфурация чугуна / И.С.Куликов. – М. : Металлургиздат, 1962. – 306с.
7. *Шепетовский Э.А.* Технологическая целесообразность увеличения глубины горна и значение критерия насыщенности чугуна углеродом / Э.А.Шепетовский // *Сталь.* – 1998. – № 11. – С.13–15.
8. *Новохатский А.М.* Влияние гидродинамических условий работы горна на химический состав чугуна / А.М.Новохатский // *Металл и литье Украины.* – 2008. – № 7–8. – С.4–26.
9. *ФонЭнде.Г* К вопросу десульфурации чугуна / Г. фон Энде, Г.Винцер // *Черные металлы.* – 1966. – № 13. – С.19–26.
10. *Приходько Э.В.* Физико–химические критерии для компьютерного моделирования фазовых равновесий в системе оксидный расплав – продукты кристаллизации / Э.В.Приходько, А.И.Белькова // *Неорганические материалы.* – Москва. – 1999. – № 9. – С.1084–1089.

*Статья рекомендована к печати:
докт.техн.наук И.Г.Муравьевой*

Д.М.Тогобицка, А.І.Белькова, А.Ю. Гринько

Розвиток фізико–хімічних основ системи керування шлаковим режимом доменної плавки на основі опису термодинамічного узгодження розплавів у горні доменної печі.

Метою роботи є виявлення закономірностей і критеріїв термодинамічного узгодження розплавів у горні для вироблення рішень управління в автоматизованій системі контролю і керування шлаковим режимом доменної плавки. Встановлено, що формування розплавів у горні доменної печі здійснюється узгоджено, про що свідчить тісний зв'язок між інтегральними фізико–хімічними характеристиками чавуну та шлаку. Отримано аналітичні залежності для опису умови узгодження розплавів у горні доменної печі з урахуванням температурних умов плавки.