

Д. Н. Тогобицкая, А. И. Белькова, Д. А. Степаненко, Н. А. Цюпа,
Ю. М. Лихачев

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ УКРАИНЫ

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Целью работы является развитие моделей прогнозирования свойств конечных доменных шлаков при использовании различных добавок для оперативной оценки шлакового режима и выработки обоснованных управляющих рекомендаций в современных условиях работы доменных печей Украины. Предложен двухэтапный подход к расчету свойств доменного шлака: по модели «гомогенного» расплава и с учетом его гетерогенности. Развита прогнозная модель для расчета вязкости «гомогенного» шлака путем включения в структуру модели интегрального показателя шлакового расплава параметра $\Delta\epsilon$, учитывающего в комплексе индивидуальный характер влияния на вязкость каждого компонента состава шлака. На текущих производственных данных химического состава конечного шлака показано влияние содержания магнезии, щелочных соединений, основности, отношения Al_2O_3/MgO и др. на рассчитанную вязкость шлаков в различных условиях работы доменных печей Украины. В результате аналитической оценки рассчитанных свойств шлака для различных условий работы доменных печей показано, что учет углеродсодержащих включений в шлаке, образующихся вследствие неполного сгорания кокса и пылеугольного топлива, повышает вязкость шлаков в 1,5-2 раза и температуры плавления на 30-50⁰С. Сравнительный анализ рассчитанных свойств шлака для различных условий работы 3-х печей Украины подтверждает целесообразность применения комплекса прогнозных моделей для оперативной оценки технологических свойств шлака, что позволяет осуществить выбор рационального шлакового режима в современных условиях доменной плавки

Ключевые слова: доменные печи, конечные шлаки, прогнозирование свойств, прогнозная модель, шлаковый режим

Введение. Современные условия выплавки чугуна в Украине характеризуются низким качеством отечественного сырья, дефицитом энергоресурсов, переходом на использование пылеугольного топлива и промышленных отходов, содержащих вредные примеси и щелочные соединения, что приводит к нарушению хода печи и снижению технико-экономических показателей плавки. Так, щелочные металлы, играя негативную роль в комплексе явлений доменного процесса, влияют в определенной степени на металлургические свойства кокса. Накопление щелочных соединений в порах кокса является одной из причин его разрушения в доменной печи. Недостаточно высокие прочностные свойства кокса обуславливают образование повышенного количества мелких фракций в виде макрогетерогенных включений, неблагоприятно влияющих на свойства шлаков и, как следствие, на качество выплавляемого чугуна. Аналогичным образом ухудшают вязкость и

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

плавкость доменных шлаков гетерогенные включения, образующиеся вследствие неполного сжигания пылеугольного топлива в печи.

Анализ шлакового режима плавки в настоящее время для различных условий работы доменных печей показывает его изменение, характеризуемое снижением основности шлака, повышением содержания щелочных оксидов и оксида магния, что существенно влияет на его свойства. Снижение основности шлака является одним из способов удаления щелочных соединений из печи [1], а также считается необходимым мероприятием, компенсирующим негативное влияние ПУТ на технологию [2] и улучшающим подвижность шлаковых расплавов в коксовой насадке, содержащих несгоревшие частицы ПУТ. Такой вариант изменения основности шлака приемлем при использовании высококачественного кокса и ПУТ по содержанию золы, серы и показателю прочности кокса M_{10} либо при последующей внедоменной десульфурации чугуна. Указанные обстоятельства определяют актуальность и необходимость развития прогнозных моделей свойств изменившегося состава конечного шлака, а также гетерогенных включений на вязкость и плавкость расплавов.

Целью работы является проверка адекватности и развитие моделей для прогнозирования свойств конечных доменных шлаков при использовании различных добавок с целью оперативной оценки шлакового режима и выработки обоснованных управляющих рекомендаций в современных условиях работы доменных печей Украины.

Состояние вопроса. Прогнозирование свойств шлаков в оперативном режиме работы доменных печей является одним из важнейших инструментов эффективного управления плавкой. Ввиду отсутствия и до настоящего времени адекватной математической модели описания свойств многокомпонентных систем, исследователями чаще всего рассматриваются трех- или четырехкомпонентные системы CaO , SiO_2 , Al_2O_3 и MgO , для которых на практике используют диаграммы вязкости и температур кристаллизации, позволяющие приблизительно характеризовать изменение свойств шлака в зависимости от его состава [3, 4]. Недостатком таких диаграмм является то, что они построены для синтетических шлаков с фиксированным количеством компонентов, содержание которых в реальных шлаках является переменным. Так, авторы работы [5] для оценки шлакового режима плавки при вдувании пылеугольного топлива используют классические трехосные диаграммы вязкости шлаков $CaO-SiO_2-Al_2O_3$, при этом влияние других компонент шлака и гетерогенных включений не учитывается. Выполненный в работе [5] аналитический обзор современных публикаций, посвященных изучению влияния глинозема и магнезии на вязкость и температуры плавления шлаков, показал отсутствие единого мнения о роли магнезии в формировании свойств доменных шлаков, что вызвано существенными различиями

свойств проплаваемого сырья и широким диапазонам колеблемости глинозема и магнезии в шлаках. При этом, в основном рассмотрены были шлаки с повышенным содержанием в них глинозема от 15 до 21%, при соответствующем диапазоне изменения отношения $Al_2O_3/MgO = 1.9 - 2.8$, не характерном для условий работы доменных печей Украины.

На основании результатов фундаментальных экспериментальных исследований В.Е. Васильева, Н.В. Руллы, И.П. Семика, И.С. Куликова, Г.А. Воловика, Н.Л. Жило, В.Г. Воскобойникова, Р. Мак-Кефери, Д. Мэчина и др., посвященных изучению влияния состава шлака на его вязкость и плавкость, следует, что магнезия до определенного предела является разжижающим компонентом. Предел, при котором магнезия повышает вязкость шлаков, зависит от основности, содержания глинозема и других компонентов. Из исследований Н.Л. Жило [6] вытекает, что увеличение содержания MgO до определенного предела, зависящего от отношения CaO/SiO_2 , содержания Al_2O_3 и других компонентов, способствует понижению вязкости расплавов; увеличение содержания магнезии, сопровождающееся увеличением суммарной основности шлака, часто приводит к существенному ухудшению его физико-химических свойств. По данным работы Н.М. Якубцинера и В.Г. Манчинского [7] при увеличении концентрации MgO в шлаках с 3 до 9-11% основность следует понижать до 1,0-1,05, в результате чего увеличивается жидкоподвижность шлаков.

Применительно к шихтовым условиям Украины в работах [8, 9] изучалось влияние MgO и Al_2O_3 в виде отношения MgO/Al_2O_3 на серопоглотительную способность шлаков в зависимости от изменения основности CaO/SiO_2 и было рекомендовано для разного уровня основности поддерживать соответствующие значения MgO/Al_2O_3 . Однако, изменение шихтовых условий требует постоянной корректировки этих соотношений. Кроме того, присутствие в производственных шлаках закисей железа и марганца, окисей хрома, титана, бария, щелочных металлов, серы и других, специфических для каждого месторождения руд, окислов, вызывает различия в поведении шлаков одинакового (по основным четырем компонентам) состава.

Ранее для прогнозирования свойств шлаков заводов Украины нами были использованы сведения о свойствах натуральных конечных доменных шлаков металлургических предприятий стран СНГ или близких по составу к шлакам отечественных заводов, опубликованных в работах Нестеренко С.В., Хоменко В.М., Бачинина А.А., Жило Н.Л., Сафиной Л.А., Чернова Н.И. и др. В результате с использованием интегральных параметров шлакового расплава Δe и ρ [10], позволяющих при моделировании свойств расплава учесть влияние полного состава шлака в комплексе на свойства, а не отдельных его составляющих, разработаны модели для прогнозирования свойств доменных шлаков заводов Украины

[10], которые используются для контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки в составе АСУТП доменных печей ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» и ОАО «Запорожсталь» [11-13]. При этом шлак рассматривался как условно «гомогенный», обладающий микрогетерогенностью, связанной с химической неоднородностью его структуры. В системе реализован комплекс моделей для расчета наиболее важных технологических свойств доменного шлака: серопогложительной способности (C_s); щелочной емкости, вязкости (η , Па·с) и и поверхностного натяжения (σ , мН/м) для температур 1450, 1500, 1550⁰С (η , Па·с); энтальпии (ΔH , кДж/кг), температур начала (ликвидус, T_l , ⁰С) и конца (солидус, T_c , ⁰С) кристаллизации; температуры гетерогенизации $T_{г.}$, и степени достижения системы металл-шлак равновесия по сере (ϵ , %), которые рассчитываются с использованием параметров шлака Δe (химический эквивалент состава) и ρ (показатель стехиометрии): Свойство = $f(\Delta e, \rho, T)$.

Так, например, для расчета вязкости шлаков, температур ликвидус T_l и солидус T_c в зависимости от показателя стехиометрии шлака ρ были предложены уравнения:

$$\lg \eta = 191,6149 - 562,4018 \cdot \rho + 401,948 \cdot \rho^2 + 6,74924 \cdot \frac{1000}{T} \quad (1)$$

$$T_l = 18738,5 - 50343,11 \cdot \rho + 36523,16 \cdot \rho^2 \quad (2)$$

$$T_c = 18800 - 52418,7 \cdot \rho + 39086,17 \cdot \rho^2 \quad (3)$$

Как уже отмечено выше, использование в доменной плавке кокса с низкими прочностными характеристиками, неполное сгорание природного газа, вдувание в печь пылеугольного топлива провоцирует образование в шлаках макрогетерогенных включений, которые повышают вязкость и плавкость шлаков, в результате чего затрудняется переход серы из металла в шлак, ухудшается дренажная способность продуктов плавки в горне доменной печи, нарушается ровность хода и снижается производительность печи. В результате выполненного аналитического исследования публикаций о влиянии углеродсодержащих макродобавок: коксовой пыли, графита, угольной пыли, сажи на свойства конечных доменных шлаков [14, 15] (вязкость, $T_{ликвидус}$, $T_{солидус}$) для оценки влияния различных добавок на свойства шлаков предложен критерий – градиент, показывающий относительное изменение величины свойства в процентах на каждый процент добавки и получены модели для прогнозирования величины градиентов от параметров структуры шлаков Δe и ρ [14]:

$$\Delta \eta, \Delta T_c, \Delta T_l = f(\Delta e, \rho) \quad (4)$$

Характеристики прогнозных моделей градиента вязкости для некоторых видов углеродсодержащих макродобавок приведен в табл.1. Аналогичные уравнения получены для градиентов температур кристаллизации.

Наибольшее влияние макродобавок углеродсодержащих компонентов сказывается на вязкости шлаков. Так, по данным работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (табл.2) один процент коксовой пыли с размерами частиц до 100 мк увеличивает вязкость шлаков на 76,4 – 101,6 %, пылеугольное топливо с таким же размером частиц – на 158,2 %, а мелкодисперсная сажа (0,02 – 0,3 мк) – на 218,4 %. Влияние этих же добавок на увеличение тугоплавкости шлаков в 15 – 20 раз ниже, чем на вязкость, но тем не менее также существенно [14].

Таблица 1. Модели для прогнозирования влияния углеродсодержащих добавок на $\Delta\eta$ конечных доменных шлаков

Добавка	Коэффициенты уравнения $\Delta\eta = A_0 + A_1 \cdot \Delta e + A_2 \cdot \rho$			Коеф-т корреля- ции R	№ урав- нения
	A_0	A_1	A_2		
Кокс Мариупольского КХЗ	-454,57	-1,13	710,57	0,76	(5)
Кокс Авдеевского КХЗ	-654,72	25,18	1097,74	0,71	(6)
Кокс Алчевского КХЗ	1131,73	107,36	-1125,88	0,81	(7)
Пылеугольное топливо	-1296,3	108,32	2371,74	0,73	(8)
Зола кокса	-611,42	-39,61	683,02	0,76	(9)

Таблица 2. Сравнение средних величин градиентов вязкости $\Delta\eta$ и плавкости (ΔT_c и ΔT_l) конечных доменных шлаков с углеродсодержащими макродобавками

Добавка	$\Delta\eta$, %/%	ΔT_l , %/%	ΔT_c , %/%
Кокс Авдеевского КХЗ	76,4	5,28	5,34
Кокс Ясиновского КХЗ	101,6	5,28	6,04
Пылеугольное топливо	158,2	7,51	8,01
Сажа	218,4	8,81	9,59

После расчета величины градиентов по химическому составу шлаков по уравнению (4) и определения свойств гомогенных шлаков по уравнениям (1)-(3) рассчитываются свойства шлаков с углеродсодержащими добавками с целью оценки жидкоподвижности реальных шлаков в горне доменной печи за счет повышения степени их гетерогенности:

$$\eta_{доб}, T_{с,доб}, T_{л,доб} = \eta_o, T_{с,o}, T_{л,o} \cdot \left[1 + \frac{\Delta\eta, \Delta T_c, \Delta T_l \cdot D_{доб}}{100} \right], \quad (10)$$

где $\Delta\eta$, ΔT_c , ΔT_l – соответственно градиенты вязкости, температуры солидус и ликвидус добавками, %/%; η_o , $T_{с,o}$, $T_{л,o}$, – соответственно вязкость, Па·с, температуры солидус и ликвидус, °С, гомогенного шлака

без добавок; $\eta_{\text{доб}}$, $T_{\text{сдоб}}$, $T_{\text{лдоб}}$ – те же свойства с добавками; $D_{\text{доб}}$ – количество добавок в % к массе шлака.

С целью оценки влияния коксовой мелочи на свойства доменных шлаков были выполнены исследования истираемости кокса и проведена оценка количества образующейся при этом коксовой пыли [15]. В результате предложена формула для расчета количества пылевидной фракции коксовой мелочи, образующейся в горне доменной печи:

$$M_K = K \cdot \frac{PK_{\text{уд}} \cdot M_{10}}{Шл}, \quad (11)$$

где K – коэффициент, определяющий долю пылевидной фракции (табл. 3) в общем количестве коксовой мелочи <10 мм (M_{10}), безразмерный; $PK_{\text{уд}}$ – удельный расход кокса, т/т чугуна; M_{10} – значение показателя механической прочности кокса на истирание, %; $Шл$ – выход шлака, т/т.

Таблица 3. Величины коэффициента (K) и количества коксовой мелочи M_K соответственно крупности пылевидной фракции кокса

Размер частиц коксовой пыли, мм	< 1	<0,5	<0,1
K	0,65-0,80	0,35-0,56	0,20-0,25
M_K , % от массы шлака	5,69-7	3,06-4,9	1,75-2,19

Анализ рассчитанного количества пылевидной фракции кокса, образующейся в горне доменной печи (табл.5, [15]), для условий ДП№9 свидетельствует, что количество пылевидной фракции кокса, которая может попасть в шлаковый расплав, уменьшается с уменьшением крупности частиц: для самых мелких частиц <0,1 мм величина M_K составляет около 2% к массе шлака. Для значения градиента вязкости для Авдеевского кокса 76,4% на каждый % добавки (табл.2) вязкость гетерогенного шлака составит:

$$\eta_{\text{доб}} = \eta_o \left(1 + \frac{\Delta\eta \cdot D_{\text{доб}}}{100}\right) = \eta_o \left(1 + \frac{76,4 \cdot 2}{100}\right) = 2,5 \cdot \eta_o,$$

то есть увеличится в 2,5 раза, что может существенно ухудшить жидкоподвижность шлакового расплава. В реальных условиях такого увеличения вязкости шлакового расплава может не наблюдаться, поскольку, ее снижению способствует зола кокса [15].

Анализ литературных данных и результаты выполненных ранее в Институте исследований по влиянию ПУТ на ход доменной плавки указывают на то, что содержание углерода в частично сгоревшем топливе может оставаться на уровне до 15% и, что в зависимости от характеристик и степени сжигания пылеугольного топлива вязкость шлаковых расплавов увеличивается на 0,2-1,8 Пуаз.

Основной материал исследования. В ходе настоящих исследований разработанные ранее модели были опробованы для оценки шлакового режима работы 3-х печей с различными шихтовыми и технологическими условиями заводов Украины ПАО «ДМК» и МК «Азовсталь. Средний

химический состав и показатели продуктов плавки представлены в таблицах 4, 5. Как видно из приведенных данных, шлаковый режим доменных печей ДП-А и ДП-С, работающих с вдуванием пылеугольного топлива (табл. 6), отличался от режима ДП-В пониженной основностью шлака CaO/SiO_2 , равной 1,09 против 1.21 для ДП-В. Кроме основности шлака CaO/SiO_2 существенное отличие шлакового режима указанных печей связано с повышенным содержанием магнезии в шлаке до 9,5% для ДП-С при значении 4,4% и 5,7% для ДП-А и ДП-В соответственно, и, как следствие, пониженным отношением $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$. Также имеются существенные различия по содержанию других компонент в шлаке, в частности, по содержанию щелочных оксидов, оксидам титана и железа. В связи с этим следует отметить, что и свойства шлаков для указанных условий будут отличаться.

Таблица 4. Показатели продуктов доменной плавки в различных условиях работы доменных печей Украины

ДП		Химический состав чугуна и шлака, %									
		Si	S	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	S	TiO ₂
А	min	0.18	0.010	39.8	38.2	3.0	4.8	0.10	0.00	0.11	0.00
	sred	0.75	0.030	45.7	42.1	4.4	6.0	0.14	0.54	0.87	0.20
	max	1.88	0.098	51.0	46.5	8.1	7.9	0.37	2.10	1.22	1.23
В	min	0.27	0.008	45.2	37.7	4.4	6.5	0.08	0.25	0.71	0.35
	sred	0.63	0.022	47.4	39.3	5.7	7.2	0.20	0.42	0.89	0.71
	max	1.21	0.085	49.7	41.0	7.1	7.8	0.37	0.86	1.10	1.19
С	min	0.42	0.008	38.9	38.0	6.9	7.1	0.04	0.08	0.70	0.29
	sred	0.71	0.020	42.5	39.1	9.5	8.1	0.13	0.27	0.90	0.37
	max	1.07	0.043	46.0	40.7	11.5	9.5	0.25	0.95	1.09	0.62

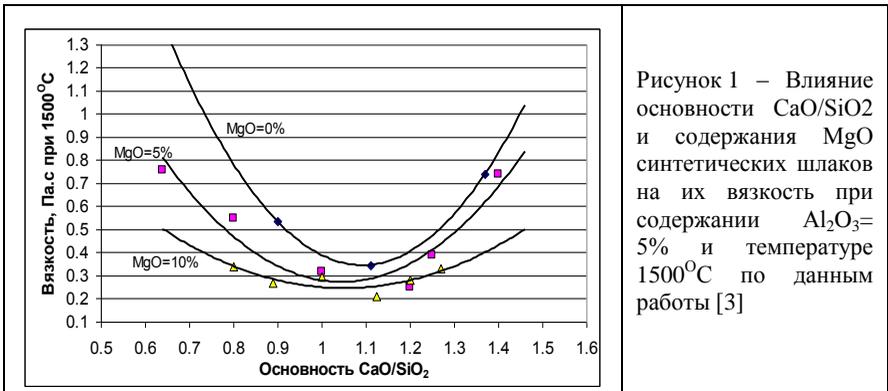
Таблица 5. Показатели продуктов доменной плавки (продолжение табл.4)

ДП		Химический состав шлака, %		CaO/ SiO ₂	(CaO+MgO) SiO ₂	Al ₂ O ₃ / MgO	Химич. эквив-т состава Δe	Показатель стехиометрии шлака ρ
		K ₂ O	Na ₂ O					
А	min	0.12	0.23	0.87	0.97	0.69	-2.790	0.685
	sred	0.36	0.48	1.09	1.19	1.38	-2.488	0.705
	max	0.89	0.95	1.31	1.41	2.03	-2.214	0.721
В	min	0.13		1.12	1.27	1.05	-2.534	0.710
	sred	0.30		1.21	1.35	1.26	-2.354	0.716
	max	0.60		1.28	1.43	1.70	-2.240	0.722
С	min	0.23	0.33	0.97	1.21	0.67	-2.738	0.711
	sred	0.41	0.54	1.09	1.33	0.86	-2.603	0.720
	max	0.69	0.80	1.20	1.42	1.20	-2.421	0.727

Таблица 6. Показатели работы доменных печей для определения коксовой мелочи M_k

ДП	Расход кокса, т/т	Показатель прочности кокса M_{10} , %	Выход шлака, т/т	Расход ПУТ, кг/т	M_k , %
А	0.44	7.60	0.420	152	1.59
В	0.51	7.00	0.440		1.62
С	0.358	7.45	0.389	138	1.37

Опыт использования моделей (1)-(3) при оценке шлакового режима указанных печей показал необходимость их развития. Была выявлена для данных условий недостаточная информативность показателя стехиометрии ρ как интегрального параметра, учитывающего качественное влияние компонент на вязкость шлаков. В частности, учет в шлаке щелочных соединений и повышение содержания оксида магния для ДП-С приводит к повышению показателя ρ и, как следствие, к повышению значений вязкости шлака, рассчитываемой в зависимости от этого показателя по уравнению (1). В тоже время, как было указано выше, магния до определенного предела является разжижающим компонентом. Так, например, для шлакового режима указанных печей с изменением основности шлака от 0,9 до 1,2 повышение магнезии в шлаке до 10% снижает вязкость, например, для $CaO/SiO_2=1.1$ со значения 0.3 Па.с при $MgO=5\%$ до 0.23 Па.с при $MgO=10\%$ (рис.1).



В ходе настоящих исследований прогнозная модель для расчета вязкости (1) была усовершенствована путем привлечения параметра Δe , учитывающего влияние каждого компонента шлака на вязкость (рис.2, 3). В частности, как показано на графике рис.2 (в) между содержанием магнезии в шлаке и химическим эквивалентом состава Δe существует обратная связь, зафиксированная на данных объединенного массива о свойствах натуральных конечных доменных шлаков заводов СНГ и

близких по составу к шлакам отечественных заводов, опубликованных в работах Нестеренко С.В, Хоменко В.М., Бачинина А.А., Жило Н.Л., Сафиной Л.А., Жмойдина Г.И. и др. Аналогичная зависимость наблюдается по данным текущих выпусков работы конкретной доменной печи (рис.3(а)). В соответствии с зависимостью вязкости шлака от параметра Δe увеличение магнезии в шлаке будет способствовать снижению вязкости до определенного предела (рис.2(а),(в)). Аналогичные выводы можно сделать и по содержанию щелочных оксидов в шлаке: с увеличением их количества в шлаке уменьшается значение параметра Δe (рис.3(б)) и, как следствие, будет снижаться их вязкость.

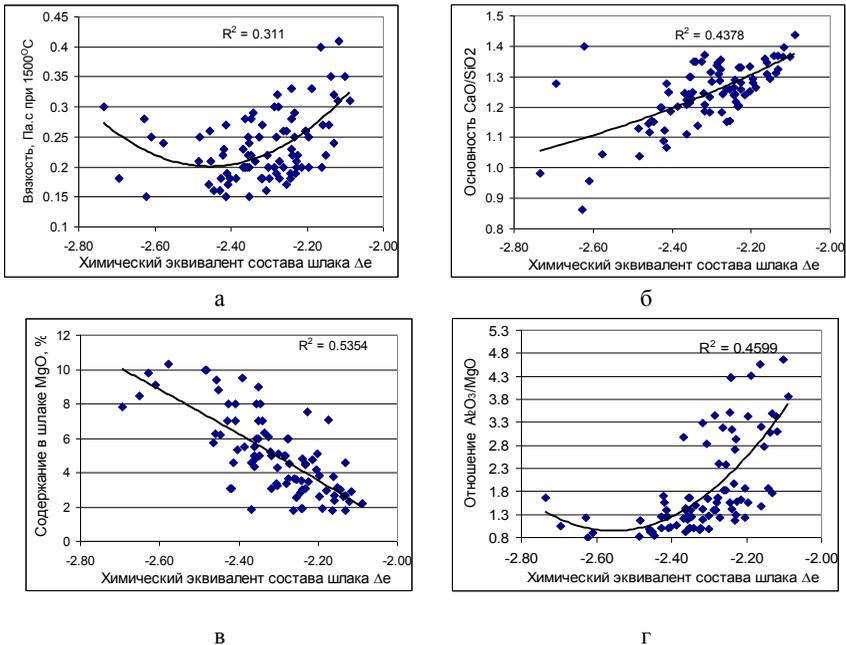


Рисунок 2 – Связь интегрального параметра шлака Δe с вязкостью и показателями химического состава шлака (по экспериментальным данным Жило Н.Л и др.)

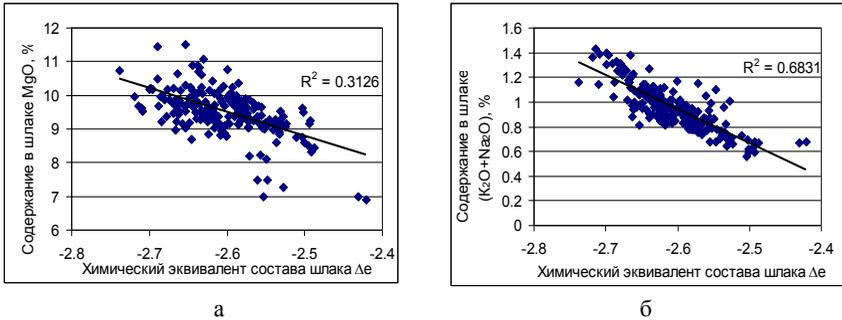


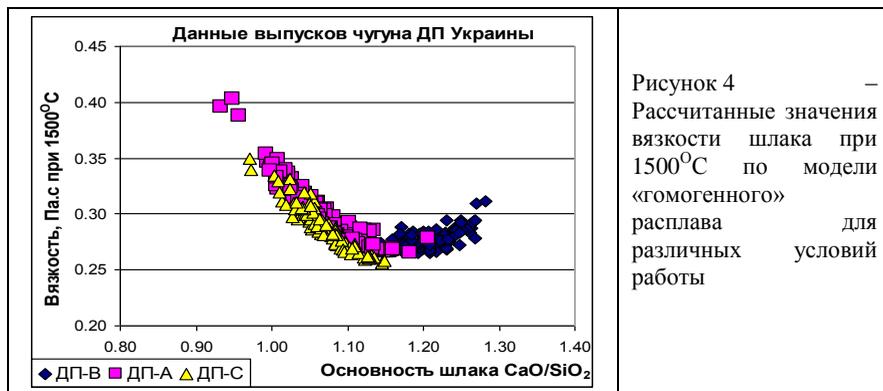
Рисунок 3 – Связь интегрального параметра шлака Δe с показателями химического состава шлака (по текущим данным выпусков работы ДП-С.)

Согласно исследованиям работы [16] установлено, что K_2O снижает вязкость и температуру кристаллизации как кислых, так и основных безглиноземистых шлаков, причем более сильное влияние оказывают первые 3% K_2O . Увеличение содержания K_2O в шлаках с 5-10% Al_2O_3 , что соответствует шлакам заводов Украины, снижает вязкость и температуру кристаллизации при добавлении 3% K_2O ; дальнейшее увеличение K_2O повышает вязкость основных глиноземистых шлаков. Поскольку между интегральными параметрами шлака Δe и ρ связь практически отсутствует, то при построении прогнозной модели для оценки вязкости шлаковых расплавов вполне корректно их совместное использование. В результате аналитических исследований получено следующее уравнение для определения вязкости «гомогенного» шлака при температуре $1500^{\circ}C$ в зависимости от интегральных показателей Δe и ρ :

$$\eta_{1500} = 0.233 + (12.397 \cdot \rho - 8.912)^2 + (1.052 \cdot \Delta e + 2.575)^2 \quad (12)$$

Полученное уравнение (12) было опробовано для различных условий работы доменных печей. Как следует из анализа данных рис.4 переход доменной плавки с использования природного газа (ДП-В) на вдувание пылеугольного топлива со снижением основности шлака CaO/SiO_2 с 1.21 (ДП-В) до значения 1.09 (ДП-С, ДП-А) существенно изменяет тенденцию (качественный характер) влияния основности конечного шлака на вязкость. Т.е. при выборе рационального шлакового режима с вдуванием ПУТ с переходом на шлаки с пониженной основностью для обеспечения их жидкоподвижности следует учитывать, что, начиная со значения основности $\approx 1,1$ при ее дальнейшем уменьшении вязкость шлака начинает увеличиваться. Необходимо отметить, что вязкость шлаков ДП-А, работающей как и ДП-С с пониженной основностью шлака и при сопоставимом содержании щелочей в шлаке, немного выше $\eta_{1500}=0.314$,

чем для условий ДП-С $\eta_{1500}=0.284$, что обусловлено повышенным содержанием магнезии в шлаке ДП-С по сравнению с ДП-А.



Рассчитанная по уравнению (12) вязкость отражает свойство шлака без учета макрогетерогенных включений, обусловленных использованием в доменной плавке коксов с низкими прочностными свойствами и пылеугольного топлива. В этой связи, на эксплуатационных данных выпусков чугуна и шлака для указанных ДП была опробована разработанная методика для оценки негативного влияния углеродсодержащих макродобавок: коксовой пыли, пылеугольного топлива на вязкость и температуры плавления $T_{л}$, $T_{с}$. По формуле (11) выполнен ориентировочный расчет количества пылевидной фракции коксовой мелочи M_k для реальных условий доменной плавки ДП-А, В, С (табл.6).

На ДП-В ДП-С поставлялся кокс с Мариупольского ($\approx 70\%$) и Авдеевского КХЗ (27%), на ДП-А подавляющее количество кокса поступало с Алчевского меткомбината. Поэтому при расчете градиентов вязкости $\Delta\eta$ для конкретной углеродсодержащей добавки, включая ПУТ и золу кокса, использованы соответствующие уравнения таблицы 1 и аналогичные уравнения для расчета градиентов температур плавления $\Delta T_{л}$ и $\Delta T_{с}$ [14]. С использованием рассчитанных градиентов для коксовой мелочи, ПУТ и золы кокса рассчитываются вязкость и температуры плавления гетерогенного шлака с добавкой $D_{доб}$ по формуле (10), принимая при этом для кокса значения $D_{доб} = M_k$ (табл.6), для ПУТ $D_{доб}=0.5\%$ (рис.5). Определение более точного значения $D_{доб}$ для различных добавок требует специальных экспериментальных исследований и может быть уточнено в соответствии с изложенным выше алгоритмом.

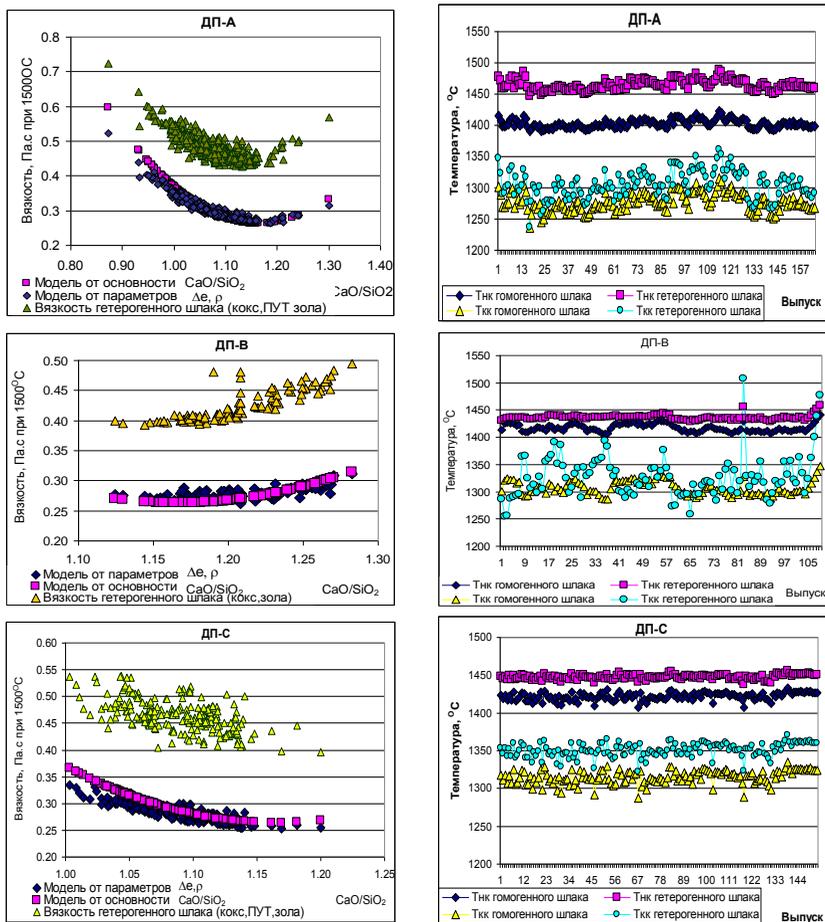


Рисунок 5 – Сравнение вязкости и температур плавления конечного шлака по моделям гомогенного расплава и с учетом гетерогенных включений для различных условий работы ДП Украины

В таблицах 7,8 представлен уровень расчетных показателей конечного шлака для условий работы ДП-С. Средние значения рассчитанных свойств конечного шлака для условий работы ДП -А, В, С представлены в таблице 9.

Таблица 7. Химический состав продуктов доменной плавки, расчетные показатели шлака для условий работы ДП-С

№ вы-пуска	Химический состав чугуна и шлака, %															Al ₂ O ₃ /MgO	CaO/SiO ₂	(CaO+MgO)/SiO ₂	Хим. экв. Δε	Пок.. стех. ρ	
	Si	S	Mn	C	P	Ti	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO	S	TiO ₂	K ₂ O						Na ₂ O
1	0.73	0.016	0.144	3.90	0.070	0.020	42.3	39.4	7.35	9.27	0.15	0.15	0.77	0.36	0.56	0.57	0.79	1.08	1.31	-2.635	0.719
2	0.75	0.013	0.140	3.96	0.070	0.020	42.7	38.8	7.62	9.25	0.11	0.15	0.84	0.33	0.36	0.45	0.82	1.10	1.34	-2.574	0.719
3	0.61	0.020	0.143	3.86	0.071	0.017	42.3	39.7	7.52	9.23	0.18	0.31	0.75	0.39	0.42	0.44	0.81	1.06	1.30	-2.616	0.716

Таблица 8. Рассчитанные свойства конечного шлака выпусков ДП-С

№ вы-пуска	η ₁₅₀₀ гомог.	Градиент вязкости Δη ₁₅₀₀					η ₁₅₀₀ гетер.	Т _{нк} гомог	Т _{кк} гомог	Градиент Тликвид. ΔТ _{нк}					Градиент Т солид. ΔТ _{кк}					Т _{нк} гетер.	Т _{кк} гетер.	σ ₁₅₀₀	ΔH	Cs	ε		
		Кокс Мар.	Кокс Авд.	ПУТ	Зола кок.	Зола кок.				Кокс Мар.	Кокс Авд.	ПУТ	Зола кок.	Кокс Мар.	Кокс Авд.	ПУТ	Зола кок.	Кокс Мар.	Кокс Авд.							ПУТ	Зола кок.
1	0.292	59.4	68.4	124.1	-15.8	0.48	1423	1318	5.4	3.3	5.4	-3.7	9.4	10.2	11.8	3.3	1449	1353	385	1988	21	75					
2	0.271	59.4	70.0	130.7	-18.2	0.44	1423	1318	4.9	3.6	5.8	-3.7	8.2	9.0	10.7	1.7	1447	1353	393	1948	20	93					
3	0.285	57.4	65.7	119.2	-18.5	0.45	1417	1307	5.0	3.4	5.7	-3.4	8.9	9.6	11.3	2.7	1444	1342	388	1976	19	77					

Таблица 9. Рассчитанные средние значения показателей свойств конечных шлаков для различных условий работы доменных печей

ДП	Вязкость, Па·с		Температура ликвидус, °С		Температура солидус, °С		σ ₁₅₀₀	ΔH	Cs	ε
	η _о гомог.	η _{доб} гетерог.	Т _{нкО} гомог.	Т _{нкдоб} гетерог.	Т _{ккО} гомог.	Т _{ккдоб} гетерог.				
А	0.314	0.483	1401	1462	1273	1300	400.4	1917	12.9	73.0
В	0.278	0.425	1417	1436	1307	1326	421.7	1829	18.8	63.1
С	0.284	0.464	1425	1449	1320	1356	388.7	1968	21.4	66.6

Расчетные показатели в табл.7-8 включают: расчетное значение вязкости «гомогенного» расплава при температуре 1500°C по модели (12) и с учетом гетерогенных включений по модели (10); температур начала и конца кристаллизации по моделям (2)-(3) гомогенного и гетерогенного шлака, серопоглотительной способности C_s , энтальпии ΔH , кДж/кг, поверхностного натяжения при температуре 1500°C σ_{1500} , мН/м, степени достижения равновесия системы «чугун-шлак» по сере ε , %.

В частности, наименьшее значение вязкости для ДП-В $\eta_0=0.0,278$ Па.с получено по модели «гомогенного» расплава и (табл.9) и по модели гетерогенного расплава $\eta_{\text{доб}}=0.425$ Па.с. Следует учитывать, что ДП-В работала без вдувания пылеугольного топлива, т.е. повышение вязкости при этом связано только с учетом влияния на нее коксовой мелочи, образующейся в горне доменной печи в результате разрушения кусков кокса под воздействием термических, физико-механических и физико-химических условий. Учет в прогнозной модели вязкости углеродистых добавок при вдувании пылеугольного топлива (несгоревшие или не полностью сгоревшие частицы угольной пыли) увеличивают ее значения для условий ДП-А $\eta_{\text{доб}}=0.483$ Па.с и ДП-С $\eta_{\text{доб}}=0.464$ Па.с. Для температур плавления наименьшее значение температуры ликвидус с учетом гетерогенных добавок также для ДП-В.

Анализ прогнозных значений комплекса свойств конечных шлаков (табл.9) показывает следующее: поверхностное натяжение шлаков при температуре 1500°C наименьшее для ДП-С, что способствует повышению их серопоглотительной способности. Данное обстоятельство наблюдается для условий ДП-В и ДП-С: для ДП-С $\sigma_{1500}=389$ мН/м при $C_s=21.4$, для ДП-В $\sigma_{1500}=422$ мН/м при $C_s=18,8$. С точки зрения вносимого в горн доменной печи тепла, то шлаки ДП-С являются более предпочтительными, они более тугоплавки за счет повышенного содержания в них магнезии. В целом анализ шлакового режима и выработку рекомендаций по выбору рационального шлакового режима следует производить при наличии более полной информации о показателях загружаемой шихты и технологического режима.

Выводы.

1. На основе экспериментальных данных о свойствах натуральных конечных доменных шлаков, близких по составу к шлакам отечественных заводов, усовершенствована прогнозная модель для расчета вязкости «гомогенного» конечного шлака при температуре 1500°C путем включения в структуру модели интегрального показателя шлакового расплава параметра Δe , учитывающего в комплексе индивидуальный характер влияния на вязкость каждого компонента состава шлака. На текущих производственных данных химического состава конечного шлака показано влияние содержания магнезии, щелочных соединений,

основности, отношения Al_2O_3/MgO и др. на рассчитанную вязкость шлаков в различных условиях работы доменных печей Украины.

2. Для более точной оценки вязкости и плавкости реальных доменных шлаков показана необходимость учета влияния на свойства макронеоднородных включений шлака, образующихся при использовании кокса с низкими показателями прочности, а также неполном сгорании газа и ПУТ. На основе разработанного ранее градиента–критерия, учитывающего относительное увеличение свойства шлакового расплава в процентах на каждый процент добавки для условий работы 3-х доменных печей, выполнен расчет вязкости и плавкости конечных шлаков, содержащих коксовую мелочь и угольную пыль. Показано, что учет макронеоднородных включений повышает вязкость шлаков в 1,5-2 раза, температуры плавления на 30-50⁰С, что обуславливает целесообразность использования предложенного двухэтапного подхода к расчету свойств шлака, заключающегося в расчете свойства гомогенного шлака и дальнейшем учете его гетерогенности, что повышает информативную мощность и адекватность прогнозных моделей при оценке шлакового режима плавки в современных условиях работы доменных печей Украины.

3. Выполненный сравнительный анализ рассчитанных свойств шлака для различных условий работы 3-х печей Украины подтверждает целесообразность применения комплекса прогнозных моделей для оперативной оценки технологических свойств шлака с целью выбора рационального шлакового режима в современных условиях доменной плавки.

Библиографический список

1. *Гладков Н.А.* Влияние щелочей на процесс доменной плавки / Н.А. Гладков, С.А. Николаев, Л.Г. Будник //Металлургическая и горнорудная промышленность. -2004. -№2. –С.12-14.
2. *Климанчук В.В.* Технология и эффективность замены природного газа и части кокса пылеугольным топливом в ПАО «ММК им. Ильича» / В.В.Климанчук, С.Л. Ярошевский //Черная металлургия. – 2014. №8. – С. 17-25.
3. *Воскобойников В.Г.* Свойства жидких доменных шлаков. / В.Г. Воскобойников, Н.Е. Дунаев, А. Г. Михалевич [и др.] –М.:Металлургия. – 1975. –184с.
4. Атлас шлаков. Справ.издание. Пер.с нем. Г.И.Жмойдина под ред. И.С. Куликова. –М.:Металлургия. –1985. –208с.
5. *Кузнецов М.С.* Исследование влияния свойств доменного шлака на нагрев чугуна при вдувании пылеугольного топлива / М.С. Кузнецов, Г.Ю. Крячко, В. П. Полетаев, Н.Н. Валуева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2018. - №1. – С. 63-70.
6. *Жило Н.Л.* Формирование и свойства доменных шлаков. - М.: Металлургия, 1974. -120с.

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

7. *Якубцинер Н.М.* Вязкость и обессеривающая способность доменных шлаков / Н.М. Якубцинер, В.Г. Манчинский, Л.А. Панюшин // *Сталь*. - 1968. - №3. - С.385-391.
8. *Шатоха В.И.* Проблемы выбора шлакового режима доменной плавки для металлургических предприятий Украины в современных условиях // *Теория и практика металлургии*. -1997. -№1. -с.18-24.
9. Пат. 62589 А Україна, МКІ 7 С21В5/00. Спосіб ведення доменної плавки: Пат. 62589 Україна, МКІ 7 С21В5/00 / А.В.Сокурєнко, В.О.Шерємет, А.В.Кєкух, Г.І. Орєл, Г.П. Костєнко, П.І. Оторвін, Е.В. Приходько, Д.М. Тогобицька, А.Ф. Хамхотько, М.М. Можарєнко, А.І. Бєлькова (Україна) – №2003043309; Заявлено 14.04.2003; Опубл. 15.12.2003, Бюл. №12.–6с.
10. *Приходько Э.В.* Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем / Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, Д.А. Степаненко. – Днепропетровск: Пороги. – 2013. – 339 с.
11. *Оторвин П.И.* Совершенствование шлакового режима доменной плавки в сырьевых условиях КГГМК «Криворожсталь» / П.И. Оторвин, Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова и др. // *Сталь*. –2004. –№6. –С.24–28.
12. Пат. 11142 Україна, МПК С21В5/00. Спосіб ведення доменної плавки: Пат. 11142 Україна, МПК С21В5/00. А.В.Сокурєнко, В.О.Шерємет, А.В.Кєкух, Г.І. Орєл, Г.П. Костєнко, В.С. Листопадов, П.І. Оторвін, С.В. Нинь, Д.М. Тогобицька, Е.В. Приходько, А.Ф. Хамхотько, А.І. Бєлькова, М.М. Можарєнко (Україна) – № u200504989; Заявл. 26.05.2005; Опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.– 10 с.
13. *Тогобицкая Д.Н.* Алгоритмические и программные средства системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки / Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, А.Ю. Гринько, Д.А. Степаненко // *Системные технологии. Региональный сборник научных трудов.*– Днепропетровск. – 2013. – Вып. 3 (86). – С. 9-14.
14. *Тогобицкая Д.Н.* Влияние микро– и макрогетерогенности на свойства доменных шлаков / Д.Н.Тогобицкая, А.Ф.Хамхотько, Д.А.Степаненко и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №5, 2009. – С.12–15.
15. *Степаненко Д.А.* Оценка влияния коксовой мелочи на технологические свойства доменных шлаков / Д.А.Степаненко, А.Ф.Хамхотько, А.Д.Джигота // *Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. - Выпуск №23, 2011. – С.106–112.
16. *Жило Н.Л.* К исследованию вязкости первичных шлаков / Н.Л. Жило, А.В. Руднева, Г.А. Соколов, Л.М. Цылев // *Известия АН СССР. ОТН*. -1957. -№2. - С.27-35.

Reference

1. *Gladkov N.A.* Vliyaniye shchelochey na protsess domennoy plavki / N.A. Gladkov, S.A. Nikolayev, L.G. Budnik // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. -2004. -№2. -S.12-14.
2. *Klimanchuk V.V.* Tekhnologiya i effektivnost' zameny prirodnoho gaza i chasti koksa pyleugol'nym toplivom v PAO «ММК im. Il'icha» / V.V.Klimanchuk, S.L. Yaroshevskiy // *Chernaya metallurgiya*. – 2014. №8. – S. 17-25.

3. *Voskoboynikov V.G.* Svoystva zhidkikh domennykh shlakov. / V.G. Voskoboynikov, N.Ye. Dunayev, A. G. Mikhalevich [i dr.] –M.:Metallurgiya. –1975. –184s.
4. *Atlas shlakov.* Sprav.izdaniye. Per.s nem. G.I.Zhmoydina pod red. I.S. Kulikova. – M.:Metallurgiya. –1985. –208s.
5. *Kuznetsov M.S.* Issledovaniye vliyaniya svoystv domennogo shlaka na nagrev chuguna pri vduvaniy pyleugol'nogo topliva / M.S. Kuznetsov, G.YU. Kryachko, V. P. Poletayev, N.N. Valuyeva // Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2018. - №1. – S. 63-70.
6. *Zhilo N.L.* Formirovaniye i svoystva domennykh shlakov. - M.: Metallurgiya, 1974. - 120s.
7. *Yakubtsiner N.M.* Vyazkost' i obesserivayushchaya sposobnost' domennykh shlakov / N.M. Yakubtsiner, V.G. Manchinskiy, L.A. Panyushin // Stal'. - 1968. - №3. - S.385-391.
8. *Shatokha V.I.* Problemy vybora shlakovogo rezhima domennoy plavki dlya metallurgicheskikh predpriyatiy Ukrainy v sovremennykh usloviyakh // Teoriya i praktika metallurgii. –1997. –№1. –s.18-24.
9. *Pat. 62589 A Ukraïna*, МКÍ 7 S21V5/00. Sposib vedennya domennoï plavki: Pat. 62589 Ukraïna, МКÍ 7 S21V5/00 / A.V.Sokurenko, V.O.Sheremet, A.V.Kekukh, G.Í. Orel, G.P. Kostenko, P.Í. Otorvín, Ye.V. Prikhod'ko, D.M. Togobits'ka, A.F. Khamkhot'ko, M.M. Mozharenko, A.Í. Bêl'kova (Ukraïna) – №2003043309; Zayavleno 14.04.2003; Opubl. 15.12.2003, Byul. №12.–6s.
10. *Prikhod'ko E.V.* Prognozirovaniye fiziko-khimicheskikh svoystv oksidnykh sistem / E.V. Prikhod'ko, D.N. Togobitskaya, A.F. Khamkhot'ko, D.A. Stepanenko. – Dnepropetrovsk: Porogi. – 2013. – 339 s.
11. *Otorvín P.I.* Sovershenstvovaniye shlakovogo rezhima domennoy plavki v syr'yevykh usloviyakh KGGMK «Krivorozhstal'» / P.I. Otorvin, D.N. Togobitskaya, A.I. Bel'kova i dr. // Stal'. –2004. –№6. –S.24–28.
12. *Pat. 11142 Ukraïna*, MPK S21V5/00. Sposib vedennya domennoï plavki: Pat. 11142 Ukraïna, MPK S21V5/00. A.V.Sokurenko, V.O.Sheremet, A.V.Kekukh, G.Í. Orel, G.P. Kostenko, V.S. Listopadov, P.Í. Otorvín, S.V. Nin', D.M. Togobits'ka, Ye.V. Prikhod'ko, A.F. Khamkhot'ko, A.Í. Bêl'kova, M.M. Mozharenko (Ukraïna) – № u200504989; Zayavl. 26.05.2005; Opubl. 15.12.2005, Byul. № 12.– 10 s.
13. *Togobitskaya D.N.* Algoritmicheskiye i programmnyye sredstva sistemy kontrolya i upravleniya shlakovym rezhimom domennoy plavki / D.N. Togobitskaya, A.I. Bel'kova, A.YU. Grin'ko, D.A. Stepanenko // Sistemnyye tekhnologii. Regional'nyy sbornik nauchnykh trudov.– Dnepropetrovsk. – 2013. – Vyp. 3 (86). – S. 9-14.
14. *Togobitskaya D.N.* Vliyaniye mikro– i makrogeterogennosti na svoystva domennykh shlakov / D.N.Togobitskaya, A.F.Khamkhot'ko, D.A.Stepanenko i dr. // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost', №5, 2009. – S.12–15.
15. *Stepanenko D.A.* Otsenka vliyaniya koksovoy melochi na tekhnologicheskkiye svoystva domennykh shlakov / D.A.Stepanenko, A.F.Khamkhot'ko, A.D.Dzhigota // Sb. Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. - Vypusk №23, 2011. – S.106–112.
16. *Zhilo N.L.* K issledovaniyu vyazkosti pervichnykh shlakov / N.L. Zhilo, A.V. Rudneva, G.A. Sokolov, L.M. Tsylev //Izvestiya ANSSSR. OTN. -1957. -№2. - S.27-35.

Д. М. Тогобицька, А. І. Белькова, Д. О. Степаненко, Н. О. Цюпа, Ю. М. Ліхачов

Прогнозування властивостей доменних шлаків в сучасних умовах роботи доменних печей України

Метою роботи є розвиток моделей прогнозування властивостей кінцевих доменних шлаків для оперативної оцінки шлакового режиму і вироблення обґрунтованих керуючих рекомендацій при використанні різних добавок в сучасних умовах роботи доменних печей України. Запропоновано двоетапний підхід до розрахунку властивостей доменного шлаку: за моделлю «гомогенного» розплаву і з урахуванням його гетерогенності. Розвинуто прогнозну модель для розрахунку в'язкості «гомогенного» шлаку шляхом включення в структуру моделі інтегрального показника шлакового розплаву параметра $\Delta\epsilon$, що враховує в комплексі індивідуальний характер впливу на в'язкість кожного компонента складу шлаку. На поточних виробничих даних хімічного складу кінцевого шлаку показано вплив змісту магnezії, лужних з'єднань, основності, відносини Al_2O_3 / MgO тощо. На розраховану в'язкість шлаків в різних умовах роботи доменних печей України. За результатами аналітичної оцінки розрахованих властивостей шлаку для різних умов роботи доменних печей показано, що внаслідок неповного згоряння коксу і пиловугільного палива в'язкість шлаків підвищується у 1,5-2 рази, а температура їхнього плавлення – на 30-50⁰С. Це призводить до необхідності оперативного оцінювання шлакового режиму доменної плавки у змінних умовах. Порівняльний аналіз розрахованих властивостей шлаку для різних умов роботи 3-х печей України підтверджує доцільність застосування комплексу прогнозних моделей для оперативної оцінки технологічних властивостей шлаку, що дозволяє здійснити вибір раціонального шлакового режиму в сучасних умовах доменної плавки

Ключові слова: доменні печі, кінцеві шлаки, прогнозування властивостей, прогнозна модель, шлаковий режим

Д. N. Togobitskaya, A. I. Belkova, D. A. Stepanenko, N. A. Tsyupa, Yu. M. Likhachev

Prediction of the properties of blast furnace slag in modern conditions of blast furnaces of Ukraine

The aim of the work is the development of models for predicting the properties of final blast-furnace slags for the rapid assessment of the slag regime and the development of sound management recommendations when using various additives in the operating conditions of blast furnaces in Ukraine. A two-stage approach to calculating the properties of blast-furnace slag is proposed: according to the model of a "homogeneous" melt and taking into account its heterogeneity. A predictive model has been developed for calculating the viscosity of a «homogeneous» slag by including the integral parameter of the slag melt parameter $\Delta\epsilon$ in the model structure, which takes into account the individual effect on the viscosity of each component of the slag composition. The current production data of the chemical composition of the final slag shows the effect of the magnesia content, alkaline compounds, basicity, Al_2O_3/MgO ratio on the calculated viscosity of the slags. For various operating conditions of blast furnaces, it has been shown that, due to incomplete combustion of coke and pulverized coal, the viscosity of slags increases by 1.5–2 times and their melting temperatures by 30–50⁰С. Comparative

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

analysis of the calculated properties of slag for different operating conditions of 3 furnaces in Ukraine confirms the appropriateness of using a complex of predictive models for the rapid assessment of the technological properties of slag, which makes it possible to choose a rational slag mode in modern conditions of blast smelting.

Keywords: blast furnaces, final slags, property prediction, predictive model, slag mode

*Статья поступила в редакцию сборника 31.10.2018 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)
Рецензенты: д.т.н., проф.Л.В.Камкинв; д.т.н. И.Г.Муравьева*