

УДК 669.162.275.2

В.И. Большаков, Н.А. Гладков, А.С. Нестеров**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБОГАЩЕННОГО ШЛАКА РАЗНОГО СОСТАВА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ***Институт черной металлургии им.З.И.Некрасова НАН Украины*

Проведенный в ИЧМ комплекс исследований свидетельствует о заметном влиянии шлака обогащенного на эффективность проплавки его в доменных печах. Приведены данные об особенностях поведения обогащенного в процессах плавки шлака. Расчетно–аналитическим путем определена роль и влияние составляющих шлака на технологические параметры доменной печи.

В шихте ДП №9 в заметном количестве содержится шлак обогащенный, особенностью которого является наличие в его составе большого количества металлического железа (12,2–22,4%), оксида марганца (3,2–4,8%) и монооксида фосфора (0,80–0,94%). Шлак обладает повышенной основностью (до 1,65 ед.) при содержании FeO в среднем 18,0%. Состав шлака обогащенного и разовые петрографические исследования свидетельствуют, что оксидный состав его формировался в условиях глубокого расплавления, обусловившего высокую плотность, низкую порозность и восстановимость материала. Следовательно, можно предполагать, что в условиях доменной печи технологичная эффективность шлака проявляется в процессах размягчения, отделения металлического железа и формирования жидких фаз.

По данным исследований [1] шлак обогащенный является весьма неоднородным по свойствам. По составу можно четко выделить четыре разновидности, заметно отличающихся по поведению при нагреве на коксовой насадке. При этом низкоосновные виды с высоким содержанием FeO активно расплавляются и дренируют на коксовой насадке, высокоосновные же – подобно конвертерному шлаку – в условиях эксперимента практически не протекают через слой кокса. Возможный расход шлака обогащенного в шихте доменных печей ограничивается предельным содержанием фосфора в чугуне и, в определенной мере, условиями распределения. Последними обусловлен рациональный характер распределения шлака обогащенного по сечению печи. Полный состав разновидностей шлака обогащенного приведен в табл. 1.

Проведенный в ИЧМ комплекс исследований свидетельствует о заметном влиянии шлака обогащенного на эффективность проплавки его в доменных печах комбината «Криворожсталь» [1]. Для осмысления особенностей поведения влияния шлака обогащенного в процессах плавки расчетно–аналитическим путем определили роль и влияние его составляющих на технологические параметры. При этом для выявления влияния на технологический режим одного шлака выполнены

исследования при ограниченном составе шихты, в частности, за счет исключения из нее окатышей. В этой связи оказалось целесообразным выполнять исследование технологии плавки для условий работы доменной печи № 5 при использовании отдельно каждого из четырех вариантов (I–IV) составов обогащенного шлака, наиболее часто имеющих место в поставках. При расчете проектных плавок принимали его усредненный состав.

Таблица 1 – Состав шлака обогащенного

Варианты	Содержание компонентов, %											CaO/SiO ₂	
	Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe _{мет}	MnO	P ₂ O ₅	R ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO		Летуч.
I	32,871	9,53	18,00	12,20	4,83	0,86	0,11	18,81	1,56	28,54	5,56	–	1,517
II	38,553	11,25	11,80	21,50	3,38	0,94	0,11	17,56	1,87	27,23	4,36	–	1,551
III	36,366	20,19	14,70	10,80	3,34	0,88	0,11	14,70	1,57	27,30	6,41	–	1,857
IV	45,936	3,06	27,50	22,40	3,20	0,80	0,10	13,80	1,54	22,80	4,80	–	1,652
Средн	38,427	11,01	18,00	16,72	3,69	0,87	0,11	16,22	1,63	26,47	5,28	–	1,632

Исходные параметры технологии принимались во всех случаях одинаковыми в соответствии с данными табл.2. При этом долю каждого вида шлака в шихте, по имеющемуся опыту, изменяли от 26,0 до порядка 100 кг/т чугуна, т.е. от 1,60 до 5,80 %.

Таблица 2 – Исходные показатели работы доменной печи № 5

№	Показатели	Размерность	Количество
1	Производство	т/сут.	3108
2	Расходы		
	Кокса (доля польского кокса 5,2 %)	кг/т.чуг.	467
	Агломерата (НКГОК–1–44,6 %)	кг/т.чуг.	1702
	Окатышей (ПГОК – 15,5 % СЦТ)	кг/т.чуг.	–
	шлака обогащенного	кг/т.чуг.	27
	антрацита	кг/т.чуг.	58
	коксика	кг/т.чуг.	–
	сырого флюса	кг/т.чуг.	35
	скрапа	кг/т.чуг.	43
3	Природный газ	Нм ³ /т.ч.	61
4	Дутье		
	расход	Нм ³ /т.ч.	1457
	кислород	%	26,3
	влага	г/Нм ³	13,3
	температура	°С	902
	теоретическая температура у фурм	°С	2147

5	Колошниковый газ		
	температура	°С	280
	давление	ати	0,97
	содержание CO	%	23,0
	содержание CO ₂	%	14,0
	содержание H ₂	%	8,6
	содержание N ₂	%	54,4
	степень использования η_{CO}	%	37,8
	Верхний перепад давления	ати	0,28
	Нижний перепад давления	ати	1,05
6	Состав чугуна		
	C	%	4,48
	Si	%	0,68
	Mn	%	0,33
	S	%	0,027
	P	%	0,085
	температура	°С	1460
	выход	кг/т. чугуна	451
7	Состав шлака		
	CaO	%	46,8
	SiO ₂	%	38,6
	MgO	%	6,6
	Al ₂ O ₃	%	8,8
	S	%	1,1
	FeO	%	0,37
	MnO	%	0,32
	R ₂ O	%	–
	температура	°С	–
8	Технические особенности		
	диаметр фурм	мм	165
	высоты фурм	мм	450
	количество работающих фурм	шт	23
	Средняя масса одного выпуска чугуна	тонн	270,26
	Время одного выпуска чугуна	мин	60
	Время пребывания материала в печи	час	8

Установленные наиболее важные показатели и параметры плавки при переменном расходе каждого из четырех видов шлака обогащенного в оговоренных выше условиях приведены в табл.3-5. Из табл.3 следует, что содержание фосфора в чугуне не лимитируется расходами шлака в исследованных пределах (26–100 кг/т чугуна). При этом фосфора в чугуне меньше в случае проплавки обогащенных шлаков с высоким содержанием металлического железа.

Таблица 3. Показатели плавки при изменении расхода шлака обогащенного состава (FeO/Fe₂O₃ – 1,889%, Fe_{общ} – 20,671%, Fe_{мет} – 12,2%, CaO/SiO₂ – 1,517)

Доля шлака в рудной смеси	%	1,57	2,70	3,50	4,90	5,80	
	кг/т	26,634	45,980	59,766	84,074	99,824	
Доля шлака в рудной смеси кокс	кг/т	467,181	466,674	466,312	465,674	465,261	
	агломерат	кг/т	1703,21	1690,12	1680,795	1664,352	1653,698
Расходы	флюс	кг/т	19,099	16,998	15,501	12,861	11,151
	[Fe]	%	94,540	94,475	94,429	94,348	94,295
	[Mn]	%	0,224	0,282	0,323	0,395	0,442
	[P]	%	0,049	0,056	0,061	0,070	0,076
Выход шлака основностью 1,21	кг/т	460,035	465,479	469,359	476,199	480,631	
	(MgO)	%	4,51	4,43	4,37	4,26	4,20
	(Al ₂ O ₃)	%	5,78	5,74	5,72	5,68	5,65
	(R ₂ O)	%	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78
	(S)	%	1,34	1,32	1,32	1,30	1,28
Содержание в шлаке	P	ед.	0,7158	0,7156	0,7154	0,7151	0,7203
	-Δe	ед.	2,339	2,339	2,337	2,337	2,448
	σ	мН/м	443,6042	443,6884	443,8765	443,9950	429,1102
	ΔH	кДж/кг	1830,195	1830,272	1830,446	1830,556	1821,868
	η _{1,400}	Па·с	0,654227	0,649967	0,645863	0,640337	0,762898
Выход коллоидного газа	Нм ³ /т	1711,9	1712,0	1712,4	1712,7	1713,0	
	C _ф	т/т	0,3135	0,3138	0,3140	0,3144	0,3146
	C _d	т/т	0,0788	0,0781	0,0776	0,0767	0,0761
	CO _i	т/т	0,3448	0,3445	0,3442	0,3438	0,3436
Параметры плавки	R _d	%	0,2669	0,2654	0,2642	0,2623	0,2610
	QBRF	ккал/кг	2086,935	2085,098	2083,789	2081,789	2079,985
	QBT	ккал/кг	2436,89	2435,07	2433,78	2431,50	2430,02
	КИПО		0,6436	0,6442	0,6446	0,6452	0,6457

Таблица 4 – Показатели плавки при изменении расхода шлака обогащенного состава IV (FeO/Fe₂O₃ – 8,987%; Fe₂O₃ – 23,530%; Fe_{смет} – 22,40%; CaO/SiO₂ – 1,652)

Доля шлака в рудной смеси	%	1,57	2,70	3,50	4,90	5,80
Доля шлака в рудной смеси кокс	кг/т	26,542	45,706	59,305	83,166	98,547
Расходы	агломерат	467,314	465,532	464,267	462,049	460,618
	флюс	1697,297	1680,064	1667,836	1646,381	1632,559
Содержание в чугуне	[Fe]	19,003	16,693	15,054	12,178	10,324
	[Mn]	94,568	94,524	94,493	94,438	94,403
	[P]	0,197	0,234	0,261	0,308	0,338
Выход шлака основностью 1,21	[P]	0,048	0,055	0,059	0,067	0,072
	(MgO)	455,645	457,701	459,160	461,719	463,369
	(Al ₂ O ₃)	4,54	4,48	4,43	4,35	4,30
Содержание в шлаке	(R ₂ O)	5,82	5,81	5,81	5,80	5,79
	(S)	0,83	0,82	0,81	0,80	0,80
	P	1,36	1,34	1,34	1,32	1,32
Свойства шлака	-Δε	0,7160	0,7158	0,7156	0,7153	0,7152
	σ	2,340	2,339	2,337	2,336	2,336
	ΔH	443,5239	443,6660	443,9361	444,0675	444,1062
Выход коллошикового газа	η ₁₄₀₀	1830,121	1830,251	1830,502	1830,624	1830,661
	Пас	0,656938	0,653410	0,649577	0,644015	0,642146
	Нм/г	1711,5	1706,9	1703,7	1698,1	1694,5
Параметры плавки	C _ф	0,3132	0,3126	0,3122	0,3115	0,3110
	C _d	0,0792	0,0783	0,0777	0,0766	0,0759
	CO ₁	0,3425	0,3413	0,3404	0,3388	0,3378
КИПО	Rd	0,2692	0,2677	0,2667	0,2648	0,2635
	QBRF	2079,274	2071,868	2066,612	2057,392	2051,448
	QBT	2428,98	2420,63	2414,70	2404,30	2397,59
	ккал/кг	0,6427	0,6415	0,6406	0,6391	0,6381

Таблица 5 – Пределы CO_i и QBT в сопоставлении с показателями состояния железа

Состав шлака	CO_i	QBT	$Fe_{общ.}$	$Fe_{мет.}$	FeO/Fe_2O_3
I	0,3448–0,3436	2436,89–2430,02	32,87	12,20	1,889
II	0,3446–0,3430	2435,58–2425,18	36,36	10,80	0,728
III	0,3437–0,3404	2431,89–2410,35	38,55	21,50	1,049
IV	0,3425–0,3378	2428,98–2397,59	55,93	22,40	8,987

Расход кокса снижается при увеличении в шихте доли исследованных видов обогащенного шлака в той большей степени, чем они богаче по металлическому железу и ниже по окисленности (FeO/Fe_2O_3). Величина основности обогащенного шлака также оказывает положительное влияние на расход кокса, снижая расход сырого флюса. Обратное пропорционально расходу кокса изменяется производительность печи.

Анализ данных, представленных в таблицах 3 и 4, позволяет заключить, что показатели доменной плавки определяются в соответствии с качеством ($Fe_{общ.}$, $Fe_{мет.}$), состоянием (FeO/Fe_2O_3) и основностью исследованных видов шлака обогащенного.

Для граничных составов некоторые зависимости, характеризующие поведение шлака в печи, показаны на рис.1 и 2.

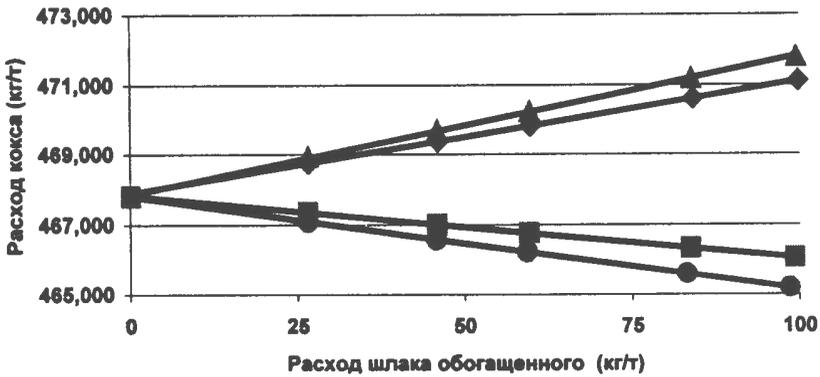


Рис.1. Изменение расхода кокса в зависимости от количества шлака обогащенного в доменной шихте. ◆ – Ш01 ($Fe_{общ.}=32,2\%$), ■ – Ш02 ($Fe_{общ.}=38,55\%$), ▲ – Смесь 1 ($Fe_{общ.}=36,37\%$), ● – Смесь 2 ($Fe_{общ.}=46,0\%$)

Между фазовым физико–химическим составом и положительными свойствами обогащенного шлака может быть проведена аналогия с испытанным, показавшим весьма высокую технологическую пригодность (эффективность) высокоосновным агломератом ($CaO/SiO_2 = 1,9 \div 2,2$ ед.) с повышенной долей FeO (14–20 %) и некоторым количеством металлического железа (до 5 %), изготовленном с использованием подготовленных отходов [2]. Имеется основание полагать, что при высоком соотношении извести с закисью железа (при ограниченной доле SiO_2), привнесенной извне, и соответствующем количестве металлического железа будет иметь место рациональная последовательность агрегатных превращений подготовленного материала в печи. Вероятно, именно в данном направлении следовало бы производить поиск и конструирование наиболее технологически пригодного (эффективного) железорудного сырья, особенно, в связи с прогрессивным нарастанием использование в доменной плавке ПУТ взамен природного газа.

Особенности поведения шлаков в доменной печи видны из приведенных рисунков. На рис.1 показан характер изменения расхода кокса при различном количестве в доменной шихте исследуемых видов шлака обогащенного. Представленные на рис.1 зависимости обусловлены изменением плавки (табл.2), выражаемой пределами численных значений общего расхода тепла на выплавку 1 кг чугуна (QBT) и

количества тепла углерода на косвенное восстановление (CO_i) элементов чугуна [3]. Из рис.1 следует, что при увеличении в шихте шлака обогащенного состава IV от 26,54 до 98,55 кг/т чугуна расход кокса, сокращающийся только за счет качества шлака (остальные условия плавки во всех случаях оставались постоянными), составляет 6,7 кг/т чугуна. Для других вариантов проплавки шлака обогащенного в тех же пределах расходов экономия кокса заметно меньше. Это, как уже указывалось, вызвано различным качеством (по $\text{Fe}_{\text{общ.}}$, $\text{Fe}_{\text{мет.}}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, CaO/SiO_2) шлака изучаемых вариантов, подтверждаемое и энергетическим показателем материала QBRF [4], характеризующим затраты тепла на превращение 1 кг данного материала в чугун и шлак (рис.2). Вместе с тем, приведенные на рис.2 данные дают основание заключить, что плотная структура шлака и нахождение ионов железа в составе расплава оксидов обуславливает переменную степень прямого восстановления в зависимости от окисленности шлака, и, естественно, вследствие разной способности к восстановлению, по разному отражается на расходе кокса.

Важным является характер изменения величины, характеризующей количество углерода кокса, сгорающего у фурм. Величина $C_{\text{ф}}$ при изменении расхода в шихте шлака обогащенного исследованных видов изменяется неоднозначно. Для высокосортных шлаков составов IV и II ($\text{Fe}_{\text{общ.}}$ 23,53 и 21,50 % при $\text{Fe}_{\text{мет.}}$ 22,4 и 21,5 % и основностью 1,65 и 1,55 ед.) количество углерода кокса, сгорающего у фурм, снижается при росте расхода шлака (рис.2), вследствие чего экономится кокс. Для шлака III (содержание $\text{Fe}_{\text{общ.}}$ –25,57%, $\text{Fe}_{\text{мет.}}$ –10,8%, CaO/SiO_2 –1,86 ед. приводит к практически полному исключению расхода сырого флюса), наблюдается независимость $C_{\text{ф}}$ от расхода обогащенного шлака (горизонтальная линия для $C_{\text{ф}}$ у шлака III). Для шлака состава I ($\text{Fe}_{\text{общ.}}$ –20,67 %, $\text{Fe}_{\text{мет.}}$ –12,2 %, CaO/SiO_2 –1,52 ед.) с ростом его расхода величина $C_{\text{ф}}$ возрастает, т.е. этот материал не способствует сокращению расхода кокса.

Шлак состава I не способствует улучшению технологии плавки и его целесообразно использовать в аглошихте, обеспечивая необходимую в агломерате долю марганца и способствуя удалению из аглоспека щелочных соединений. Шлак состава III может быть использован в доменной шихте как источник марганца в извести. Шлаки составов IV и III целесообразно использовать в доменной шихте как металлизированное сырье, обеспечивающее заметное повышение эффективности доменных печей.

К сожалению в условиях работы доменных цехов комбината «Криворожсталь» отсутствуют возможности отдельной подачи в печь обогащенного шлака исследованных составов I и IV. В домны загружаются обогащенный шлак недостаточно определенного состава, близкого к среднему, но с весьма широкими колебаниями составляющих. Такая ситуация обуславливает часто необходимость

сокращения расхода шлака в шихте, поскольку превышение некоторого предела негативно сказывается на шлаковом режиме, ровности схода при высокой колеблемости состава чугуна.

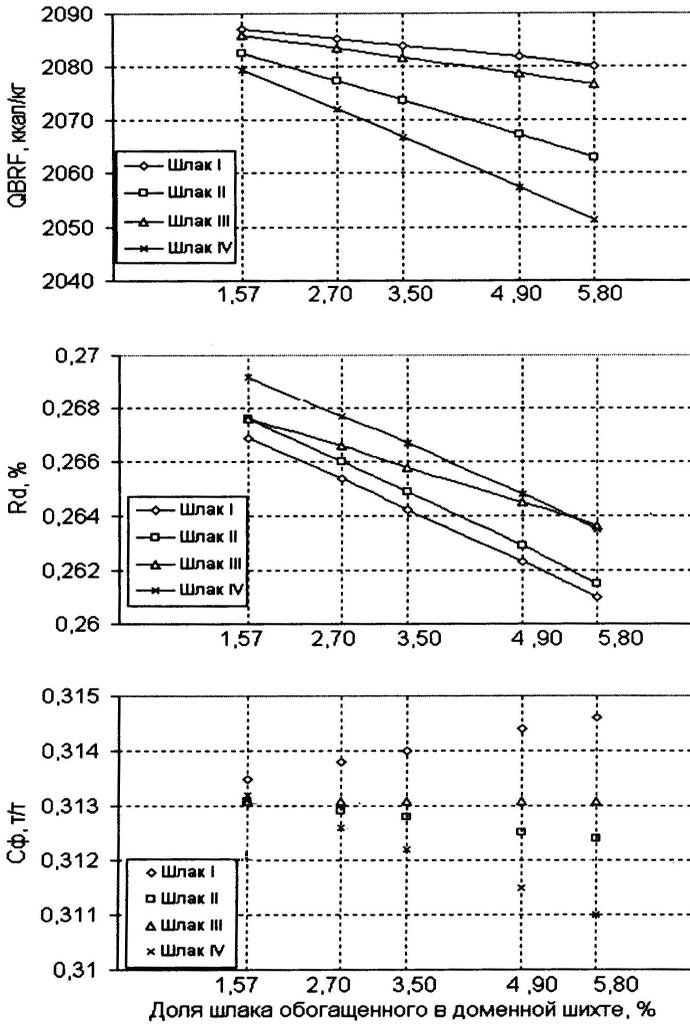


Рис.2. Изменение показателей, определяющих эффективность плавки, в зависимости от доли шлака обогащенного в шихте