

В.Н. Зоря, Е.П. Волюнкина, Е.В. Протопопов

Сибирский государственный индустриальный университет

ОЦЕНКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА

Аннотация. Проведены исследования характеристик и параметров конвертерного шлака ОАО «ЗСМК», в том числе с проведением серии экспериментальных плавков в лабораторной электродуговой печи. Установлено, что потери железа с конвертерным отвальным шлаком в условиях ОАО «ЗСМК» после первичной обработки на шлаковых полях путем отмагничивания магнитных компонентов составляют в среднем 22,7 %, в том числе 9,0 % в виде металлического железа и 13,7 % в составе оксидов. При сортировке шлака крупные фракции обогащаются оксидным железом, главным образом в виде (FeO) и (Fe₃O₄), в то время как (Fe₂O₃) переходит в мелкую фракцию. В процессе плавления конвертерного шлака происходит частичное восстановление железа, что сопровождается увеличением содержания металлического железа в среднем до 11,7 %. При этом основная доля металлического железа сосредоточена в крупных фракциях (более 40 мм) и составляет в среднем 18 %, в то время как в более мелких фракциях содержание металлического железа составляет 5 – 6 %.

Ключевые слова: конвертерный шлак, оксиды железа, сортировка шлака, фракция.

THE EVALUATION OF METALLURGICAL VALUE OF CONVERTER SLAG

Abstract. The research of parameters of converter slag of JSC “ZSMK” was conducted, including the series of experimental smelting in a laboratory electric arc furnace. It was determined that the loss of iron with converter dump slag in JSC “ZSMK” after primary treatment on slag fields by removing of magnetic components is on the average 22.7 %, including 9.0 % in the form of metallic iron and 13.7 % in the oxides. In the process of sorting of slag the large fractions enrich themselves with oxide iron, mainly in the form of (FeO) and (Fe₃O₄), while the (Fe₂O₃) goes to the smaller fraction. In the process of melting of converter slag there is a partial recovery of iron, which is accompanied by an increase in the content of metallic iron in the average of 11.7 %. At the same time, the main part of the metallic iron is concentrated in large fractions (+40 mm) and is on the average of 18 %, while in the smaller fractions the content of the metallic iron is 5 – 6 %.

Keywords: converter slag, iron oxide, process of sorting slag, fractions.

Шлакопереработка и утилизация металлургических шлаков получили широкое распространение в мире. На современных металлургических заводах утилизируются не только все образующиеся шлаки, но и постепенно вводятся в разработку накопленные шлаковые отвалы [1, 2]. Поэтому переработка и использование шлаков в настоящее время представляют собой самостоятельную подотрасль металлургического производства.

На большинстве российских металлургических предприятиях традиционно перерабатывается доменный шлак с получением гранулированного шлака или фракционированного щебня, используемых в дальнейшем как сырье для производства портландцемента, в строительной отрасли и дорожном строительстве. Сталеплавильные шлаки многопланово и широко используются за рубежом, в то время как в России их переработка организована лишь на ряде предприятий [3]: Новолипецком, Нижнетагильском, Череповецком («Северсталь») металлургических комбинатах, Таганрогском металлургическом заводе. Известен положительный опыт переработки шлаков и возвращения их в плавку [4].

В то же время, конвертерный шлак ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» после охлаждения на шлаковых полях используется крайне ограниченно, например в основном для формирования ограждающей дамбы шламонакопителя. Совершенно очевидно, что такой подход приводит к

значительным безвозвратным потерям железа и других элементов, содержащихся в шлаках.

В настоящее время действующий с 1964 г. шламонакопитель ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» готовится к закрытию, при этом практически за 50 лет эксплуатации на его территории сформировалось техногенное месторождение вторичного сырья, в котором находятся ценные железосодержащие составляющие шламов и шлаков. В связи со снижением запасов природного железорудного сырья в перспективе это техногенное месторождение безусловно будет разрабатываться.

Для технико-экономического обоснования и создания перспективных технологий переработки конвертерных шлаков требуется оценка их металлургической ценности. С этой целью были проведены исследования характеристик и параметров шлаков со шлаковых полей и шлаков разливки конвертерных цехов, в том числе с проведением серии экспериментальных плавков в лабораторной электродуговой печи.

При постановке задач исследования основное внимание было уделено:

- оценке гранулометрического состава и физико-механических свойств шлака;
- анализу неоднородности шлака по химическому составу и перераспределения основных компонентов при сортировке шлака;

– определению содержания металлического железа в шлаке.

Как установлено, основной способ уборки и удаления конвертерного шлака в текущем производстве основан на технологии, предусматривающей первичную переработку его на шлаковых полях с извлечением крупных шлако-стальных коржей и вывоз шлака на шламонакопитель. При этом в составе направленного на шламонакопитель шлака содержится значительное количество железа в виде металлического скрапа, капель-корольков и оксидов железа.

Для исследования были отобраны представительные пробы шлака со шлаковых полей и разовые пробы шлака разливок цехов 1 и 2. Отбор и анализ проб производился в соответствии с требованиями ГОСТ 25470 – 82, ГОСТ 17495 – 80 и ГОСТ 27562 – 87.

По количественному соотношению шлаков ККЦ-1 и ККЦ-2 рассчитан средневзвешенный гранулометрический состав (см. рисунок).

Приведенные на рисунке данные показывают, что усредненный гранулометрический состав шлака более чем на треть (38,6 %) представлен мелкими и пылевидными частицами размером менее 10 мм, треть (31,5 %) составляют частицы размером 10 – 40 мм и менее трети (29,9 %) составляют частицы размером более 40 мм.

Перед проведением исследований химического состава шлаков из подготовленных проб путем отмагничивания извлекали магнитные компоненты, в составе которых содержались металлическое железо и магнетит. В дальнейшем остаток после отмагничивания анализировали химическим методом в соответствии с действующими стандартами.

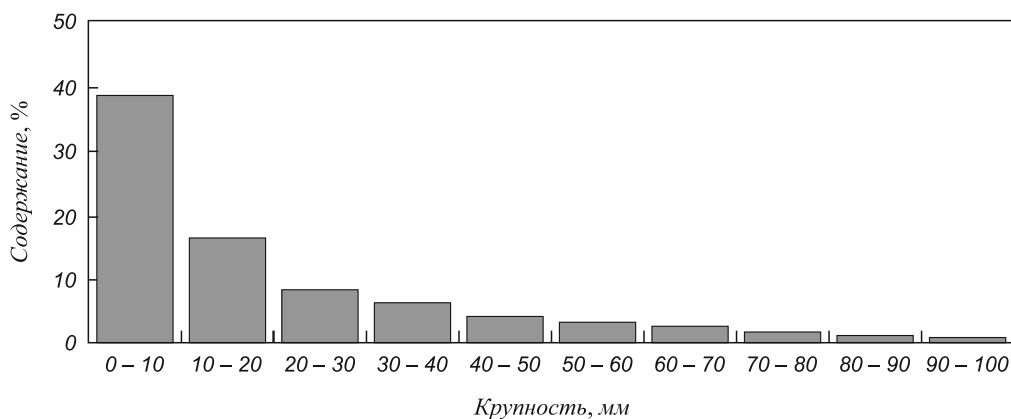
Объединенные пробы шлака, сортированного по фракциям 0 – 3, 3 – 5, 5 – 10, 10 – 25, 25 – 40, 40 – 100, более 100 мм, исследовали на химический состав для определения содержания основных компонентов в каждой фракции (табл. 1). При сопоставлении данных химического состава шлака по фракциям отмечена неравномерность распределения отдельных компонентов в сортированном шлаке. Например, содержание FeO во фракции шлака более 100 мм было в 2 – 4 раза выше,

чем во фракции 0 – 3 мм, а содержание Fe_2O_3 , напротив, в 5 – 6 раз ниже. Для установления зависимости между содержанием основных компонентов в сортированном шлаке и его крупностью выполнен корреляционный анализ. Полученные значения коэффициентов корреляции (числитель) и показатели их значимости (знаменатель) приведены в табл. 2.

Значимость коэффициентов корреляции определена по значениям *F*-критерия Фишера. В табл. 2 выделены коэффициенты, значимость которых выше критического значения *F*-критерия (6,61). Эти коэффициенты являются достоверными, т.е. выраженная коэффициентами зависимость является статистически вероятной на 99,5 %. В рассматриваемом случае достоверными являются взаимосвязи между гранулометрическим составом шлака и содержанием в нем оксида FeO для всех проб. Взаимосвязь между гранулометрическим составом шлака и содержанием в нем оксидного железа $Fe_{окс}$ и оксида Fe_2O_3 является достоверной только для шлаков разливок. Достоверными являлись также взаимосвязи между гранулометрическим составом шлака и содержанием в нем оксидов MgO в шлаках с полей и оксидов P_2O_5 в шлаках разливок.

Положительные коэффициенты корреляции содержания оксидного железа с крупностью шлака для шлака с полей (0,70) и шлака разливок (0,89) свидетельствуют о том, что при сортировке шлака крупные фракции обогащаются оксидным железом. Это происходит, главным образом, за счет увеличения содержания оксида FeO, коэффициент корреляции которого с гранулометрическим составом положительный (0,88). Одновременно происходит перераспределение оксида Fe_2O_3 в мелкие фракции, о чем свидетельствует отрицательный коэффициент корреляции (–0,65). Однако на суммарный процесс обогащения оксидным железом крупных фракций этот факт не оказывает значительного влияния.

Таким образом, результаты исследований показали, что оксид FeO в гораздо большей степени чем другие компоненты шлака обладает свойством концентрироваться в определенной фракции. Для выявления взаи-



Усредненный гранулометрический состав конвертерного шлака

Таблица 1

Химический состав конвертерного шлака

Материал	Фракция, мм	Содержание, %														
		Fe _{окс}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	V ₂ O ₅	S	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO
Шлак ККЦ-1	0 – 3	9,50	5,04	7,97	16,80	53,00	6,90	2,90	6,00	0,60	0,70	0,10	1,30	0,40	0,30	<0,001
	3 – 5	13,79	9,75	8,86	17,90	49,30	4,70	2,90	6,00	0,70	0,40	0,10	1,30	0,40	0,30	<0,001
	5 – 10	14,92	10,80	9,31	18,00	48,00	4,20	3,10	6,70	0,50	0,50	0,09	1,30	0,40	0,30	<0,001
	0 – 10	12,66	8,43	8,72	17,53	50,13	5,31	2,99	6,31	0,60	0,60	0,10	1,30	0,40	0,30	<0,001
	10 – 25	16,01	12,58	8,89	17,50	47,30	4,20	2,90	6,20	0,50	0,40	0,10	1,60	0,40	0,30	<0,001
	25 – 40	17,02	13,57	9,23	16,90	47,20	3,60	2,60	6,40	0,50	0,40	0,10	1,50	0,40	0,20	<0,001
	10 – 40	16,34	12,90	9,00	17,30	47,27	4,00	2,80	6,27	0,50	0,40	0,10	1,60	0,40	0,30	<0,001
	40 – 100	15,09	13,82	6,20	17,20	49,40	2,60	2,50	6,90	0,40	0,70	0,08	1,10	0,40	0,20	<0,001
	Более 100	18,40	22,30	1,50	25,00	40,90	2,30	2,50	3,50	0,50	0,50	0,07	1,50	0,40	0,20	<0,001
	Более 40	16,65	17,82	3,99	20,87	45,40	2,46	2,50	5,30	0,50	0,60	0,08	1,30	0,40	0,20	<0,001
	Средне-взвеш.	14,95	12,24	7,76	18,20	47,98	4,17	2,80	6,06	0,50	0,60	0,09	1,40	0,40	0,27	<0,001
Шлак ККЦ-2	0 – 3	9,30	6,14	6,46	25,60	42,80	7,30	5,10	4,80	0,50	0,40	0,13	1,30	0,50	0,50	<0,001
	3 – 5	16,88	11,58	11,24	21,00	43,00	4,90	4,20	4,50	0,50	0,60	0,11	1,50	0,50	0,40	<0,001
	5 – 10	17,49	14,03	9,39	20,00	43,50	5,10	3,80	4,10	0,60	0,40	0,10	1,60	0,50	0,30	<0,001
	0 – 10	12,86	9,33	8,00	23,24	43,05	6,30	4,57	4,54	0,50	0,50	0,12	1,40	–	–	–
	10 – 25	15,73	19,98	0,27	18,69	46,70	2,79	3,06	5,17	0,79	0,53	0,12	1,88	–	–	–
	25 – 40	12,87	16,01	0,59	25,81	43,10	2,07	6,03	5,36	0,86	0,48	0,09	1,72	–	–	–
	10 – 40	14,70	18,54	0,39	21,27	45,40	2,53	4,13	5,24	0,82	0,51	0,11	1,82	–	–	–
	40 – 100	16,30	20,21	0,82	16,34	48,90	2,68	2,55	5,17	0,82	0,65	0,15	2,10	–	–	–
	Более 100	20,10	24,91	1,03	17,88	45,40	1,40	1,92	5,40	0,74	0,49	0,12	2,19	–	–	–
	Более 40	18,11	22,45	0,92	17,07	47,23	2,07	2,25	5,28	0,78	0,57	0,14	2,14	–	–	–
	Средне-взвеш.	15,15	16,36	3,46	20,60	45,13	3,81	3,66	4,99	0,68	0,53	0,12	1,77	–	–	–

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции (числитель) и их значимость (знаменатель), характеризующие взаимосвязь между химическим и гранулометрическими составами шлака

Проба	Значение показателя для компонента шлака										
	Fe _{окс}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	S	P ₂ O ₅	
Шлак с полей	<u>0,70</u>	<u>0,88</u>	<u>-0,65</u>	<u>-0,05</u>	<u>-0,20</u>	<u>-0,92</u>	<u>-0,43</u>	<u>-0,06</u>	<u>-0,14</u>	<u>0,50</u>	
	5,0	13,8	4,0	0,2	0,7	21,4	1,9	0,2	0,5	2,5	
Шлак разливок	<u>0,89</u>	<u>0,89</u>	<u>-0,66</u>	<u>-0,35</u>	<u>-0,11</u>	<u>-0,57</u>	<u>-0,46</u>	<u>-0,36</u>	<u>-0,26</u>	<u>0,90</u>	
	15,5	15,7	4,3	1,4	0,4	3,1	2,1	1,5	1,3	17,1	

мосвязи между этим оксидом и другими компонентами шлака дополнительно выполнен парный корреляционный анализ (табл. 3).

Представленные в табл. 3 данные показывают, что содержание Fe_{окс} в шлаке определяется, главным образом, оксидом FeO, о чем свидетельствует положительный достоверный коэффициент корреляции 0,79. При этом

оксид FeO не коррелируется положительно ни с одним из компонентов, однако характеризуется достаточно высоким отрицательным (-0,75) значением коэффициента корреляции с оксидом Fe₂O₃. Этот факт, очевидно, свидетельствует о наличии в составе шлака магнитного оксида Fe₃O₄, являющегося промежуточным в процессе окисления железа Fe ↔ FeO ↔ Fe₃O₄ ↔ Fe₂O₃.

Значения коэффициентов парной корреляции, характеризующие взаимосвязь между основными компонентами шлака

Проба	Значения коэффициента для компонента шлака						
	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MnO
Fe _{окс}	$\frac{0,79}{7,48}$	$\frac{-0,18}{0,66}$	$\frac{-0,70}{4,90}$	$\frac{-0,22}{0,82}$	$\frac{-0,32}{1,30}$	$\frac{-0,51}{2,53}$	$\frac{-0,24}{0,93}$
FeO	–	$\frac{-0,75}{6,09}$	$\frac{-0,89}{15,11}$	$\frac{0,02}{0,06}$	$\frac{-0,34}{1,41}$	$\frac{-0,37}{1,54}$	$\frac{-0,34}{1,40}$
Fe ₂ O ₃	–	–	$\frac{0,66}{4,29}$	$\frac{-0,26}{1,00}$	$\frac{0,20}{0,76}$	$\frac{0,03}{0,12}$	$\frac{0,29}{1,12}$
MgO	–	–	–	$\frac{0,06}{0,21}$	$\frac{0,18}{0,66}$	$\frac{0,31}{1,25}$	$\frac{-0,01}{0,03}$

Примечание. В числителе – коэффициент корреляции, в знаменателе – его значимость.

Оксид FeO с высокой степенью достоверности отрицательно коррелируется с оксидом MgO с коэффициентом корреляции 0,89, что свидетельствует о том, что он в значительной степени содержится в шлаке в составе сложных соединений с MgO и эта взаимосвязь усиливается при снижении крупности частиц.

С целью определения содержания металлического железа в конвертерном шлаке проведена серия плавок проб фракционированного шлака шлаковых полей и разливок в лабораторной электродуговой печи с загрузкой по металлу 2 кг. В процессе исследований были проплавлены 12 проб шлака, в том числе четыре вида шлака по три фракции каждого. Фракции выбраны в соответствии с перспективой их использования в агломерационном (0 – 10 мм), доменном (10 – 40 мм) и сталеплавильном (более 40 мм) процессах. В качестве продуктов плавки были выделены металл (слитки) и обедненный шлак.

Было установлено, что получаемые в результате плавления шлаки приобретают пористую структуру, имеют темно-серый цвет с блестящей поверхностью. В лабораторных условиях выполнено дробление шлака до крупности 0 – 2 мм, затем истирание до крупности 0 – 0,08 мм с целью подготовки проб для проведения анализа на химический состав. В процессе подготовки проб из шлака выделены мелкие металлические включения (корольки). Общее содержание металлического железа оценивалось по сумме всех металлических включений, выделенных из шлака после плавки (слитки) и при истирании (корольки). Из оставшейся пробы шлака магнитом были дополнительно извлечены магнитные компоненты, которые внешне имели неметаллический вид. Результаты исследований представлены в табл. 4.

Из представленных данных видно, что среднее содержание металлического железа в проплавленном шлаке со шлаковых полей составило 5,9 % (ККЦ-1) и 14,7 % (ККЦ-2). Более высокое содержание металлического железа в шлаках ККЦ-2, очевидно, связано с

использованием агрегатов значительно большей садки (350 т), более высокой интенсивностью продувки кислородом и неэффективным управлением процессом шлакообразования, в результате чего реализуется «открытая» продувка, что характеризуется повышенным выносом жидкого металла в шлак. Среднее содержание металлического железа в шлаках сталеплавильного производства, рассчитанное по количественному соотношению шлаков двух цехов, составляет 11,7 %, что позволяет сделать вывод о перспективности извлечения и возвращения материала в плавку.

Полученные результаты свидетельствуют о неравномерности распределения металлического железа в шлаке по классам крупности. В пробах шлака из шлаковых полей содержание Fe_{мет} в крупных фракциях 10 – 40 и более 40 мм значительно выше, чем в мелкой фракции 0 – 10 мм. Так, в пробах шлаков ККЦ-1 крупностью 0 – 10 мм содержится 3,1 % железа, а в крупных частицах (более 40 мм) – 11,8 %; в пробах шлаков ККЦ-2 – соответственно 7,1 и 26,7 %. В среднем в проплавленном шлаке содержится по фракциям 0 – 10, 10 – 40 и более 40 мм соответственно 5,7; 8,4 и 22,8 % Fe_{мет}. Выделенное из шлака в виде слитков и корольков металлическое железо можно распределить следующим образом: на долю фракции 0 – 10 мм приходится 19 %, 10 – 40 мм – 23 % и большая часть (58 %) железа приходится на долю фракции более 40 мм.

В шлаках разливок среднее содержание металлического железа составляет 3,3 – 9,9 %. При этом в отличие от проб шлаков из шлаковых полей основная его часть (26 – 65 %) содержится во фракции 0 – 10 мм, 25 – 47 % – во фракции 10 – 40 мм и 10 – 27 % – в пробах шлаков фракции крупнее 40 мм. Перераспределению металла в мелкие фракции (до 40 мм), очевидно, способствует длительное отстаивание шлака перед разливкой при постепенном накапливании его в шлаковых чашах. В таких условиях, очевидно, в течение временного периода отстаивания шлака крупные корольки успева-

Состав продуктов, полученных в результате плавки шлака

Проба	Компоненты продуктов плавки	Содержание, %			
		по фракциям, мм			среднее
		0 – 10	10 – 40	более 40	
Шлак ККЦ-1 (шлаковое поле)	Железо мет. (слитки)	2,7	5,1	11,0	5,5
	Железо мет. (корольки)	0,4	0,3	0,8	0,4
	Железо мет. всего	3,1	5,4	11,8	5,9
	Магнитный компонент шлака	12,9	8,6	0,7	8,5
	Шлак	84,0	86,0	87,5	85,6
Шлак ККЦ-2 (шлаковое поле)	Железо мет. (слитки)	5,7	9,8	25,0	13,4
	Железо мет. (корольки)	1,4	0,7	1,7	1,3
	Железо мет. всего	7,1	10,5	26,7	14,7
	Магнитный компонент шлака	2,1	0,5	0,4	1,1
	Шлак	90,8	89,0	72,9	84,2
Расчетное среднее по шлакам ККЦ-1, ККЦ-2					
	Железо мет. всего	5,7	8,4	22,8	11,7
	Магнитный компонент шлака	5,9	3,9	0,5	3,7
	Шлак	88,4	87,7	76,7	84,6
Шлак разливки ККЦ-1	Железо мет. (слитки)	1,2	3,6	1,3	2,0
	Железо мет. (корольки)	1,5	2,7	0,2	1,3
	Железо мет. всего	2,7	6,3	1,5	3,3
	Магнитный компонент шлака	5,3	0,6	5,9	4,3
	Шлак	92,0	93,1	92,6	92,4
Шлак разливки ККЦ-2	Железо мет. (слитки)	10,1	12,1	6,2	9,1
	Железо мет. (корольки)	0,9	1,2	0,5	0,8
	Железо мет. всего	11,0	13,3	6,7	9,9
	Магнитный компонент шлака	0,8	0,6	13,7	6,5
	Шлак	88,2	86,1	79,6	83,6

ют опуститься на дно чаши, а мелкие брызги металла задерживаются в верхних горизонтах объема шлака в чаше. Крупные линзы металла, выбитые с днища чаш, и крупный скрап в исследованиях не учитывались.

Среднее содержание магнитного компонента в проплавленных шлаках шлаковых полей составило 1,1 – 8,5 %, в том числе в мелких фракциях в среднем 5,9 % и в крупных – 0,5 %. При этом в проплавленных шлаках разливок содержание магнитного компонента составляло 4,3 – 6,5 %.

В табл. 5 представлены результаты исследования химического состава выделенных из шлака корольков металла. Как установлено, выделенные из шлаков металлические корольки характеризуются на основании данных анализа как низкоуглеродистый металл с незначительным остаточным содержанием серы, фосфора и марганца. В металле, выделенном из шлаков разливки, отмечено более высокое содержание углерода и марганца, очевидно, обусловленное введением ферросплавов в процессе раскисления металла.

Определено, что в результате проплавления шлака произошло снижение содержания оксидного железа в среднем в 1,5 раза, причем особенно заметно уменьшилось содержание оксидов Fe_2O_3 : в шлаках ККЦ-1 – с 7,76 до 0,88 %, ККЦ-2 – с 3,46 до 0,91 %, что косвенно свидетельствует о произошедшем в процессе плавления шлака частичном восстановлении железа.

На основе материального баланса железа до и после плавления шлаков выполнен расчет содержания металлического железа в исходном шлаке. Получено, что конвертерный шлак после первичной переработки его на шлаковых полях содержит в среднем 22,7 % железа, в том числе 9,0 % металлического и 13,7 % – в виде оксидов. Среднее содержание металлического железа по фракциям составляет: 5,1 % для фракции 0 – 10 мм; 5,6 % для фракции 10 – 40 мм; 18 % для фракции более 40 мм. Таким образом, установлено, что около 59 % содержащегося в шлаке металла сосредоточено в крупной фракции (более 40 мм), на долю фракций 0 – 10 и 10 – 40 мм приходится соответственно 21 и 20 %.

Химический состав корольков металла, выделенных в процессе проплавления шлака

Материал	Крупность, мм	Массовая доля элементов, %				
		C	Si	Mn	S	P
Шлак ККЦ-1 (шлаковое поле)	10 – 40	0,25	<0,03	0,15	0,011	0,017
Шлак ККЦ-2 (шлаковое поле)	10 – 40	0,13	<0,03	0,10	0,016	<0,010
Отмагниченный материал из шлака ККЦ-2	0 – 10	0,05	<0,03	0,11	0,049	0,011
	10 – 40	0,04	<0,03	0,11	0,021	0,010
	> 40	0,03	<0,03	0,09	0,010	<0,010
Шлак разливки ККЦ-2	10 – 40	0,93	0,03	0,94	–	–
	> 40	1,08	<0,03	0,36	–	–

Выводы. Потери железа с конвертерным отвальным шлаком в условиях ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» после первичной обработки на шлаковых полях путем отмагничивания магнитных компонентов составляют в среднем 22,7 %, в том числе 9,0 % в виде металлического железа и 13,7 % – в составе оксидов. При сортировке шлака крупные фракции обогащаются оксидным железом главным образом в виде FeO и Fe₃O₄, в то время как оксид Fe₂O₃ переходит в мелкую фракцию. В процессе плавления конвертерного шлака происходит частичное восстановление железа, что сопровождается увеличением содержания Fe_{мет} в среднем до 11,7 %. При этом основная его доля сосредоточена в крупных фракциях (более 40 мм) и составляет в среднем 18 %, в то время

как в более мелких фракциях содержание металлического железа составляет 5 – 6 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. – М.: Мир, 2003. – 528 с.
2. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И. Промышленность и окружающая среда. – М.: ИКЦ Академкнига, 2002. – 469 с.
3. Рябов Т.В. // Новости черной металлургии за рубежом. 2000. № 4. С. 128 – 130; 2004. № 3. С. 75,76.
4. Голов Г.В. // Сталь. 1995. № 1. С. 73.

© 2013 г. В.Н.Зоря, Е.П. Волюнкина, Е.В. Протопопов
Поступила 25 апреля 2013 г.