

УДК 658.567.1, 621.745.58

Ровин С.Л., Ёкубов Д.Р.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕЦИКЛИНГ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования шлаков сталеплавильных дуговых печей, анализ методов их переработки и возвращения в производство содержащегося в них металла. В ходе исследований были получены новые данные о структуре, составе и свойствах дисперсных материалов, остающихся в настоящее время в отвалах после традиционной переработки сталеплавильных шлаков путем их дробления и омагничивания, определены наиболее рациональные способы извлечения из этих материалов остаточного железа и возвращения его в производство. Для рециклинга омагниченного дисперсного отсева шлаков предлагается использовать ротационные наклоняющиеся плавильные печи, позволяющие не только эффективно, без угара, переплавлять тонкодисперсный скрап, но и восстанавливать содержащиеся в шлаке оксиды железа.

Ключевые слова: сталеплавильные шлаки, дисперсные железосодержащие отходы, обогащение, восстановление, рециклинг

Введение

Экономическая и экологическая важность и актуальность переработки и возвращения в производство дисперсных железосодержащих отходов с каждым годом становится все более и более очевидной. По оценкам специалистов, сегодня перерабатывается и возвращается в производство не более 55-60% таких отходов, а их накопление в отвалах и на промышленных полигонах достигает объемов добычи руды и исчисляется сотнями миллионов тонн, создавая серьезную экологическую опасность [1, 2].

К дисперсным отходам черных металлов принято относить материалы с размерами частиц менее 30-35 мм и толщиной не более 3-5 мм, их источниками, как правило, являются технологические процессы производства металлов и обработки металлических заготовок и изделий. Основными видами этих отходов являются шлаки плавки и обработки жидких металлов, аспирационные пыли металлургических процессов, скрап процессов разлива чугуна и стали, пыли процессов резки, дробеметной очистки и зачистки заготовок, окалина процессов сварки, а также прокатных, кузнечных и термических цехов, шламы шлифовки и стружка цехов механической обработки и т.п. Дисперсные железосодержащие отходы относятся к одним из самых крупнотоннажных твердых промышленных отходов. Количество шлака достигает 10% от количества жидкого металла в чунолитейных и 15-25% в сталелитейных и сталеплавильных цехах, аспирационные пыли составляют около 1,0-1,6% от массы выплавляемого металла, окалина – 1-2% от массы поковок и проката, шламы и стружка – до 5-10% от массы обрабатываемых заготовок. При этом в настоящее время лишь стружка и мелкий скрап возвращаются в производство в количествах, сопоставимых с объемами их образования – утилизируется около 65-75% образующейся стружки черных металлов, а объемы рециклинга оксидных и многокомпонентных отходов, таких как окалина и шламы, не превышают 15-20% [3, 4].

Главная причина такой ситуации – в непригодности традиционных плавильных печей, применяемых сегодня в литейных цехах и на металлургических заводах, к работе на дисперсной шихте. Вторая важная причина – чрезвычайная неоднородность металлосодержащих отходов, как по размеру частиц – от нескольких сантиметров (как в скрапе и шлаке) до нескольких микрон (как в аспирационной пыли), так и по составу – от металлических (стружка, скрап, отходы дробы, пыль зачистки отливок) до оксидных и многокомпонентных отходов (окалина, шламы шлифовки, металлургическая пыль и т.п.). Немаловажное значение имеет и недостаточная изученность физико-химических свойств этих отходов, особенно многокомпонентных, таких как шлаки, аспирационные пыли и шламы [3].

Один из наиболее крупнотоннажных железосодержащих отходов сталеплавильного производства – это шлаки плавки и внепечной обработки жидкого металла, однако общее содержание железа в них, как правило, не превышает 30-35%, но при этом большая часть железа в шлаке (до 75-80%) находится в металлическом состоянии – в виде скрапа. Включения скрапа в электросталеплавильном шлаке могут иметь размеры от долей миллиметра до метра и более (когда вместе со шлаком из ковша сливаются остатки металла).

Переработка шлаков, традиционно применяемая сегодня на большинстве электросталеплавильных заводов, включает в себя следующие операции: на первом этапе – транспортировку в шлаковые отделения, кантовку шлаковых чаш в шлаковые ямы (траншеи), охлаждение шлака, дробление его падающим грузом, разрыхление и извлечение с помощью грузоподъемных электромагнитов крупных кусков металла – так называемых сливов, размером от 300-400 до 1000 мм и более; на втором этапе – магнитную сепарацию, дробление с помощью щековых, валковых или конусных дробилок, грохочение (как правило, используется полотно с ячейкой от 80 до 100 мм), повторную магнитную сепарацию и грохочение. Повторному грохочению (рассеву) подвергают, как правило, как отмагниченный, так и немагнитный шлак. Чаще всего используют сито с ячейкой от 10 до 30 мм. Извлеченный на первом и втором этапе скрап имеет зашлакованность на уровне 5-15% и воз-

вращается обратно в дуговую сталеплавильную печь. Таким образом удастся вернуть до 75-80% металла, содержащегося в шлаке. В немагнитной части шлака содержание железа общего, как правило, не превышает 8-10%, и после сортировки она может быть использована для изготовления строительных материалов, для отсыпки дорожного полотна, для укрытия полигонов промышленных и бытовых отходов и т.д. [5-7].

Дисперсный отмагниченный отсев шлака с размерами частиц от 0 до ~30 мм имеет общее железосодержание на уровне 45–55%, но в настоящее время практически не используется. Непосредственное возвращение такого материала в электродуговую печь приводит к снижению всех технических параметров плавки и значительному угару – переходу его снова в шлак. В то же время, по оценкам специалистов, количество такого материала составляет до 10–12% от исходной массы электросталеплавильного шлака, и его рециклинг позволил бы дополнительно вернуть в производство около 10 тыс. т железа на каждый 1 млн т выплавленной стали.

Исследование и анализ результатов

В работе были исследованы образцы электросталеплавильного шлака, прошедшего предварительную переработку в соответствии с представленной выше схе-

мой, включая дробление, магнитную сепарацию и рассев, отобранные в отвалах различных электрометаллургических заводов в Беларуси, России и Узбекистана, в том числе ОАО «Белорусский металлургический завод», АО «Узметкомбинат», АО «Таганрогский металлургический завод» и Выксунского металлургического завода. Несмотря на широкую географию источников отобранных проб, исследования выявили их близость по ряду существенных характеристик, как по внешнему виду (рис. 1), так и по составу, в первую очередь по общему железосодержанию и форме, в которой находится железо (табл. 1), что позволяет говорить о возможности и целесообразности единого подхода к вопросам переработки и рециклинга этих отходов.

На первом этапе исследования определяли влажность (W , %) образцов путем сушки до постоянной массы при температуре $110 \pm 5^\circ\text{C}$, насыпную плотность (ρ_n , кг/м^3) – взвешиванием заданного объема шлака после свободной засыпки в мерную емкость, потери при прокаливании (п.п.п., %) – потери массы после нагрева до 900°C и выдержки в течение 30 мин, а также состав образцов с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Усредненные результаты анализов представлены в табл. 1.



Рис. 1. Образцы железосодержащего шлака: а – АО «ТМЗ»; б – ОАО «БМЗ»; в – АО «Узметкомбинат»

Таблица 1

Состав образцов омагниченного отсева электросталеплавильного шлака

Номер образца	Наименование материала	Состав материала, %										Потери п.п.п., %	Влажность W , %	Плотность ρ_n , кг/м^3
		$\text{Fe}_{\text{общ}}$	$\text{Fe}_{\text{мет}}$	P	S	C	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO			
1	Шлак ОАО «БМЗ»	45,8	32,1	0,06	0,07	1,5	21,0	15,80	3,3	5,4	0,53	2,24	2,25	1870
2	Шлак АО «Узметкомбинат»	52,1	38,5	0,08	0,03	1,3	22,3	11,5	3,15	3,68	0,55	3,21	1,3	2020
3	Шлак АО «ТМЗ»	48,6	35,4	0,1	0,12	2,1	20,6	14,1	3,79	3,42	0,77	3,12	2,05	1960
4	Шлак «БМЗ»	54,3	39,8	0,09	0,1	1,2	21,25	9,4	2,9	3,3	0,61	2,52	0,65	2140

Анализ показал, что, несмотря на то, что образцы хорошо магнитятся, в их составе имеется значительное количество компонентов, не содержащих железо

(балласта), а поверхности металлических включений сильно зашлакованы. В связи с этим были проведены действия, направленные на дополнительное

обогащение образцов: после удаления свободной влаги (сушки), они обрабатывались на вибросите с размером ячейки 2,5 мм (отделялась мелкая фракция) и подвергались галтовке в лабораторной установке «пьяная бочка» (рис. 2, а), что позволило удалить значительную часть неметаллических загрязнений с поверхности металлических частиц. Количество отсеянной мелочи составило от 15,6 до 22,5% от массы образцов, а количество пыли, отделенной при галтовке – от 10,2 до 16,7% от массы загруженного в установку материала.

Исследование элементного состава и микроструктуры пыли и отсеянных мелких частиц шлака проводилось с помощью энергодисперсионного спектрометра INCA-350 и электронного сканирующего микроскопа Vega Tescan, анализ их фазового состава осуществлялся на дифрактометре ДРОН-3. Отгалтованная часть с размерами элементов $\geq 2,5$ мм расплавлялась в лабораторной высокочастотной индукционной установке

(рис. 2, б) с целью определения количества содержащегося в ней металла (металлургического выхода).

Исследования микроструктуры и элементного состава мелочи выявили значительную неоднородность: от частиц с содержанием железа ($Fe_{общ}$) до 64-65% до частиц, в которых железа нет вообще или содержание его не превышает 3-5%. При этом суммарное количество частиц, богатых железом, и металлизированных включений в этой фракции во всех образцах оказалось незначительным. В целом, как показал анализ, количество железа металлического ($Fe_{мет}$) в материале, прошедшем через сито 2,5 мм, не превышает 2-3%, а железо общее ($Fe_{общ}$) – не более 20-25%. Причем было установлено, что элементные составы отсева (то есть фракции с размером частичек менее 2,5 мм) для всех проб достаточно близки. Структура, спектрограмма и усредненный элементный состав частиц размером менее 2,5 мм некоторых образцов представлен на рис. 3 и 4.

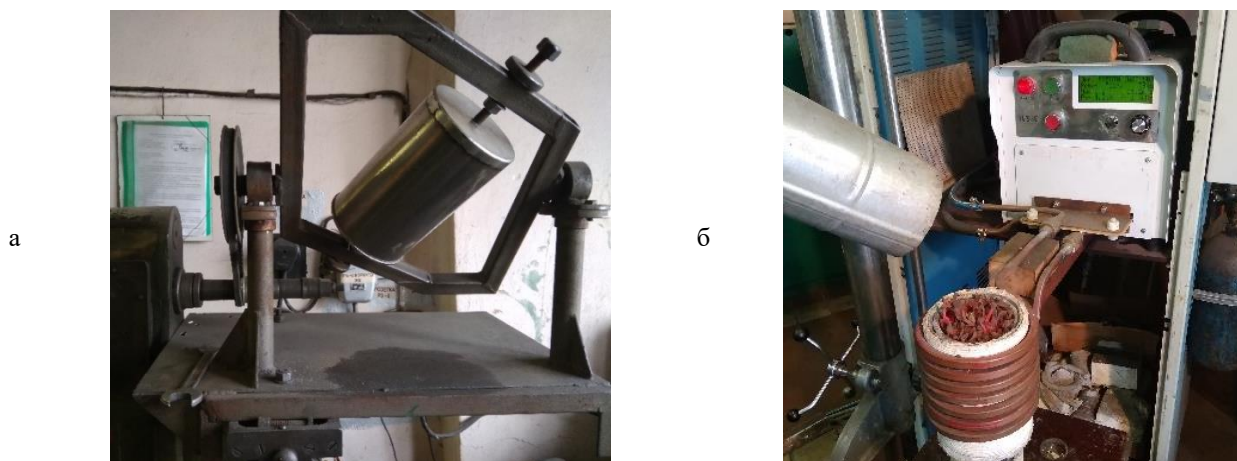


Рис. 2. Лабораторное оборудование:

а – галтовочная установка «пьяная бочка»; б – высокочастотная индукционная установка

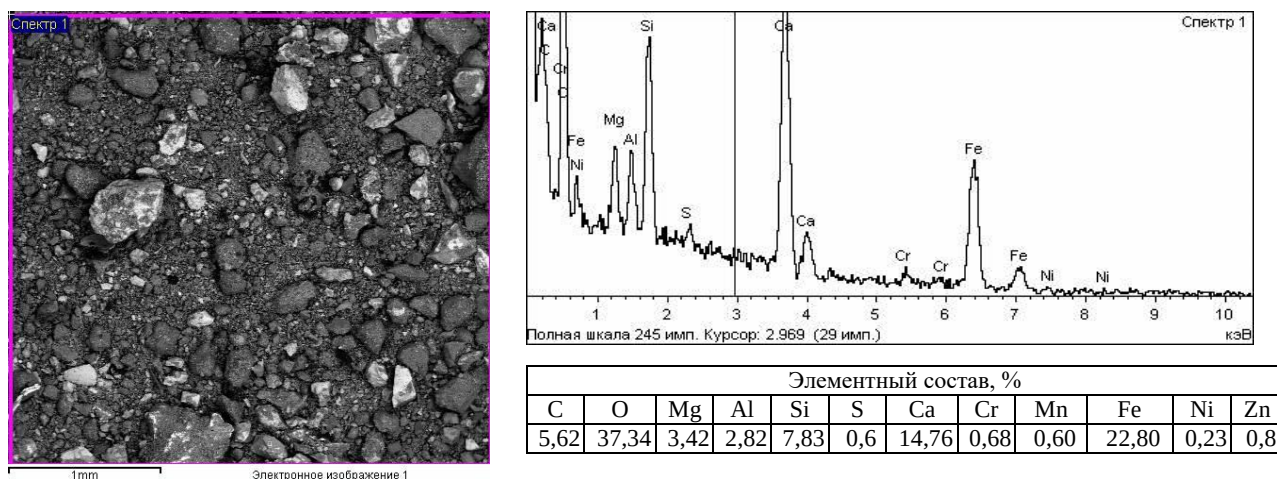


Рис. 3. Структура, спектрограмма и усредненный элементный состав шлака из ВМЗ фракции < 2,5 мм

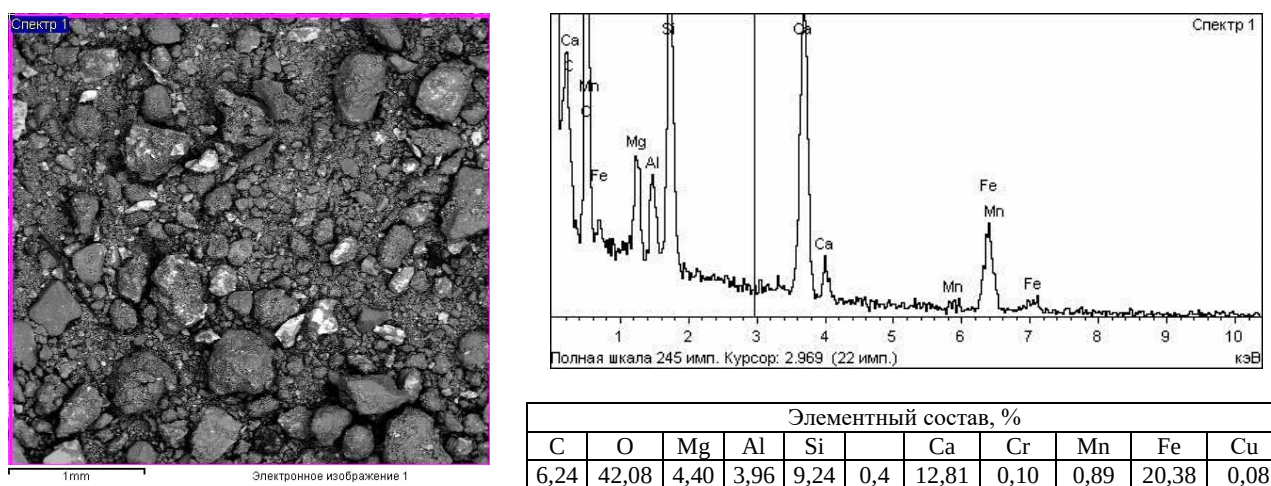


Рис. 4. Структура, спектрограмма и усредненный элементный состав шлака из БМЗ фракции < 2,5 мм

Помимо железа и его соединений, в частицах этой фракции значительную часть составляют кремний, алюминий, кальций, магний, которые согласно фазовому анализу находятся в составе оксидов, силикатов, алюмосиликатов, фаялитов, ферритов и других соединений.

Учитывая относительно невысокое общее содержание железа в отсеке шлака с размером частиц менее 2,5 мм, была проведена попытка его обогащения путем дополнительной магнитной сепарации. Однако даже двукратным омагничиванием удалось отделить от этого материала лишь около 15% балласта (содержащего не более 5% железа) и довести содержание $Fe_{общ}$ в нем до ~23-28%. При таком содержании любые пирометаллургические методы извлечения железа из материала экономически невыгодны.

Примерно такое же содержание железа было обнаружено в пыли, отделенной от образцов в процессе галтовки: $Fe_{общ}$ находилось в пределах ~23-30%, при этом содержание $Fe_{мет}$ не превышало 1-3 %.

Плавку отгатованного материала с размером частиц от 2,5 до 30 мм вели при частотах 11000-13000 Гц. В графитовый тигель загружали около 1,0 кг материала. После расплавления для исключения дополнительного окисления металла при контакте с воздухом на поверхность расплава подавали защитный углеродсодержащий флюс (измельченный бой графитовых тиглей). Среднее время плавки составило 50-55 мин, включая время разогрева, расплавления,

перегрева, удаления шлака, заливки пробы на химанализ и слива полученного расплава в металлический кокиль. Выход металла, полученный в результате лабораторных плавок, составил от ~54 до ~62% от массы переплавляемого образца.

Анализ состава полученного металла проводился на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 3460, его результаты представлены в табл. 2. В результате экспериментальных плавок во всех случаях получили углеродистую сталь с низким содержанием марганца (Mn) и кремния (Si) и достаточно высоким углеродом (C). Эти особенности состава (низкий Mn и Si) объясняются в первую очередь происхождением переплавленного скрапа – ливиную долю (до 85-90%) шлака электросталеплавильных цехов составляет печной шлак, скачанный из ДСП до начала доводки расплава по составу, а высокое содержание углерода связано с особенностями проведения экспериментальных плавок – использованием графитового тигля и покровного углеродистого флюса.

Состав шлака, полученного при переплавке образцов, определялся с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Общее количество железа в шлаке составило от ~23 до 28,5%, при содержании железа металлического от 3,0 до 7,5%.

Результаты разделения исследованных образцов омагниченного дисперсного электросталеплавильного шлака на металлическую и неметаллическую части представлены в итоговой табл. 3.

Таблица 2

Состав металла, полученного при переплавке отгатованных образцов шлака

Номер образца*	Элементный состав, %											
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	P	S	Fe
1	0,56	0,16	0,12	0,10	-	0,02	0,17	0,07	0,03	0,03	0,060	Остальное
2	0,50	0,05	0,04	0,21	-	0,05	0,12	0,07	0,01	0,028	0,056	
3	0,63	0,10	0,05	0,30	0,18	0,04	0,15	0,09	0,06	0,020	0,050	
4	0,48	0,09	0,10	0,10	0,26	0,07	0,11	0,02	0,09	0,030	0,065	

*Номер образца соответствует исходному номеру и названию в табл. 1.

Содержание и распределение железа в дисперсном электросталеплавильном шлаке

Номер образца*	Влажность, W, %	Фракция размером $\geq 2,5$ мм, % от массы образца			Фракция $< 2,5$ мм, % от массы образца (Fe _{общ} , %)
		Скрап		Пыль очистки скрапа (Fe _{общ} в пыли, %)	
		металл	шлак плавки (Fe _{общ} в шлаке, %)		
1	2,3	30,3	26,1 (24,0)	16,7 (28,1)	22,5 (20,4)
2	1,3	36,4	28,5 (26,4)	16,3 (26,8)	15,8 (23,1)
3	2,0	34,0	27,6 (22,9)	14,4 (23,2)	19,4 (24,7)
4	0,7	36,9	29,0 (28,5)	10,2 (30,8)	20,4 (22,9)

*Номер образца соответствует его номеру и названию в табл. 1.

Полученные данные подтверждают, что, во-первых, большая часть железа в исследованных образцах шлака находится в виде металлических включений (до 70-75%) и, во-вторых, содержание железа общего в частицах размером менее 2,5 мм и пылевидной фракции является относительно небольшим (не более 20-30%), а железа металлического – ничтожным (не более 3-5%). Кроме того, экспериментальные плавки показали, что, несмотря на очистку (галтовку) поверхности извлеченного из шлака скрапа, количество неметаллических включений в скрапе остается значительным – при переплавке скрапа масса образующегося шлака доходила до 40-45% от количества загруженного в тигель материала.

Учитывая дисперсность (от ~ 2 до ~ 30 мм), неоднородность и сильное загрязнение скрапа, входящего в состав шлака, в условиях реального производства наиболее подходящим агрегатом для его переплава представляются специальные ротационные наклоняющиеся печи (РНП) нового поколения с управляемой атмосферой в рабочем пространстве, в которых нагрев и расплавление материалов реализуются в динамическом, постоянно перемешиваемом слое, продуваемом потоком газотеплоносителей, движущихся по винтовой петлеобразной траектории (рис. 5) [8, 9].

Переплав мелкого скрапа в ротационных наклоняющихся печах может осуществляться в соответствии с уже отработанной в печах такого типа технологией плавки чугуна и дробленой стальной стружки. Эта технология включает в себя: высокотемпературный безокислительный нагрев, расплавление, при необходимости – науглероживание расплава, выдержку до прекращения кипа, скачивание шлака и выдачу расплава в

изложницы или в разливочный ковш с передачей жидкого металла в традиционные электрические плавильные печи или установки внепечной обработки для доводки расплава до заданного химсостава [9].

При использовании такой технологии, помимо удаления неметаллических включений, появляется возможность не только минимизировать угар металла при нагреве и расплавлении, но и восстановить присутствующие в скрапе оксиды железа как в твердой фазе – в процессе нагрева в восстановительной атмосфере, так и в жидкой фазе – в процессе кипа ванны в присутствии твердого восстановителя. Режим безокислительного нагрева реализуется в РНП путем сжигания жидкого или газообразного топлива с недостатком кислорода (с коэффициентом избытка воздуха $\alpha \approx 0,9$) и добавления в завалку твердых углеродсодержащих материалов (коксик, отсеб угля, антрацита и т.п.). Переход от твердой к жидкой фазе осуществляется с использованием дутья, обогащенного до 28-30% кислорода (скорость подъема температуры в печи при этом достигает 50-60 К/мин, а время перехода сокращается до 5-10 мин), что позволяет предотвратить спекание дисперсных частиц, обеспечивает необходимый для расплавления стального скрапа температурный напор и при этом минимизирует потери на угар (окисление) металла в переходный период. При необходимости (значительном содержании оксидов железа в исходном материале) процесс может быть дополнен жидкофазным восстановлением и науглероживанием (с использованием дробленого электродного боя, графита и т.п.), которые реализуются здесь же, в РНП, после расплавления шихты [9,10].

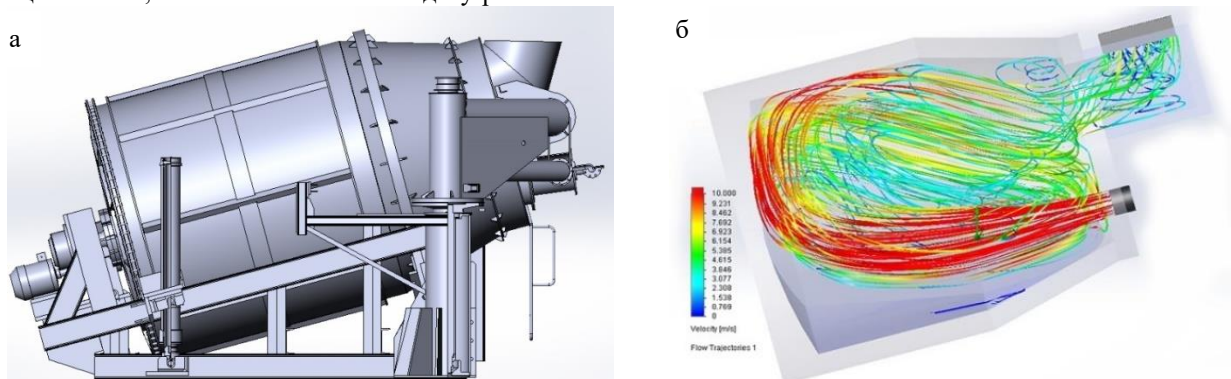


Рис. 5. Общий вид печи (а) и траектория движения газового потока в РНП (б)

Полный цикл плавки мелкого скрапа в РНП составит около 60 мин. Результаты расчета ориентировочных удельных затрат материалов и энергоносителей на переплавку в РНП мелкого скрапа, извлеченного из электросталеплавильного шлака, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Удельные затраты материалов и энергоносителей* на получение 1 т стали из мелкодисперсного скрапа в РНП

Материалы и энергоносители	Удельный расход
1. Железосодержащее сырье (омагниченный очищенный мелкий скрап), кг	1650-1800
2. Восстановитель – коксик, отсев угля, отсев антрацита, лигнин, кг	50-60
3. Флюсы – известняк, плакировый шпат, кг	50-60
4. Топливо – природный газ, м ³	100-110
5. Кислород, м ³	17-20
6. Электроэнергия, кВт·ч	5-6

* При непрерывном технологическом процессе, без учета энергозатрат на разогрев печи.

Выводы

Исследования образцов дисперсного (с размером частиц до 30 мм), прошедшего магнитную сепарацию электросталеплавильного шлака позволили уточнить характеристики материала, выявить ряд важных структурных особенностей и определить рациональные (экономически целесообразные) варианты его переработки и рециклинга.

Содержание железа общего в таких материалах находится на уровне 45-55%, причем до 70-75% этого железа присутствует в металлическом виде, а большая часть балласта (с содержанием $Fe_{общ}$ не более 25%) имеет размер частиц менее 2-3 мм. Массовая доля такой фракции в исследованных образцах составила от 15,8 до 22,5%.

С учетом результатов исследования, наиболее рациональной технологической схемой рециклинга таких материалов представляется последовательное проведение следующих операций: галтовка и обеспыливание с целью отделения от металлического скрапа

неметаллических загрязнений, рассев – отделение мелкой фракции с размером частиц менее ~2,5 мм, содержащей наименьшее количество железа, а затем безокислительная плавка выделенного очищенного скрапа в РНП. Использование такой технологии при минимальных затратах на переработку позволит извлечь из дисперсных электросталеплавильных шлаков, которые сегодня остаются в отвалах, до 80-85% содержащегося в них железа, что эквивалентно дополнительному возвращению в производство до 10000 т металла на каждый миллион выплавленной стали.

Список источников

1. Юсфин, Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И. Промышленность и окружающая среда. М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. 469 с.
2. Шатоха В.И. Вторичные ресурсы металлургии. Днепропетровск: РИА «Днепр», 2009. 338 с.
3. Ровин С.Л., Ровин Л.Е., Насевич И.С. Переработка и утилизация дисперсных металлоторходов // Металлургия машиностроения. 2022. № 1. С.17-24.
4. Управление ресурсами. Оценка и снижение эколого-экономического ущерба / Лисиенко В.Г., Дружинина О.Г., Зобнин Б.Б., Роговин В.И., Морозова В.А. Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. 307 с.
5. Валуев Д.В., Гизатулин Р.А. Технологии переработки металлургических отходов. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2012. 196 с.
6. Айкашев А.В., Панишев Н.В., Махоткина Е.С. Эффективность переработки металлургических шлаков // Теория и технология металлургического производства. 2021. № 4 (39). С. 9-12.
7. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства / Бельский С.С., Зайцева А.А., Тютрин А.А., Исмаилов З.З., Баранов А.Н., Сокольникова Ю.В. // iPolytech Journal. 2021. № 6 (25). С. 782-794.
8. Rovin S.L., Kalinichenko A.S., Rovin L.E. Recycling of Dispersed Metal Wastes in Rotary Furnaces // Journal of Casting & Materials Engineering. 2019. №2. Р. 43-49.
9. Ровин С.Л., Ровин Л.Е., Заяц Т.М. Металлургические достоинства ротационных наклоняющихся печей // Литье и металлургия, 2010. №4. С. 40-44.
10. Ровин С.Л. Исследование работы ротационных наклоняющихся плавильных печей // Наука и техника. 2016. № 1. С.18–28.

Сведения об авторах

Ровин Сергей Леонидович – доктор технических наук, доцент, заведующий металлургическим научным центром, АО «Узметкомбинат», г. Бекабад, Республика Узбекистан. E-mail: s.rovin@uzbeksteel.uz

Ёкубов Дильмурод Рашидбекович – ведущий инженер-исследователь, АО «Узметкомбинат», г. Бекабад, Республика Узбекистан. E-mail: d.yokubov@uzbeksteel.uz

RESEARCH AND RECYCLING OF ELECTRIC STEELMAKING SLAGS

Rovin Sergey L. – Doctor of Technical Sciences, Head of the Metallurgical Research Center of JSC Uzmetkombinat, Bekabad, Republic of Uzbekistan. E-mail: s.rovinsl@uzbeksteel.uz

Yokubov Dilmurod R. – leading research engineer of JSC Uzmetkombinat, Bekabad Republic of Uzbekistan. E-mail: d.yokubov@uzbeksteel.uz

Abstract. The article presents the results of a study of slag from steelmaking arc furnaces, an analysis of the methods of their processing and the return to production of the metal contained in them. In the course of the research, new data were obtained on the structure, composition and properties of dispersed materials currently remaining in landfills after traditional processing of steelmaking slags by crushing and magnetization, and the most rational ways to extract residual iron from these materials and return it to production were determined. For the recycling of magnetized dispersed slag screening, it is proposed to use rotary tilting melting furnaces, which allow not only efficient, carbon-free melting of finely dispersed scrap, but also the reduction of iron oxides contained in the slag.

Keywords: steelmaking slags, dispersed iron-containing waste, enrichment, recovery, recycling

Ссылка на статью:

Ровин С.Л., Ёкубов Д.Р. Исследование и рециклинг электросталеплавильных шлаков // Теория и технология металлургического производства. 2025. №1(52). С. 22-28.

Rovin S.L., Yokubov D.R. Research and recycling of electric steelmaking slags. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 52, no. 1, pp. 22-28.