

УДК 669.187.2

П.И. ТИЩЕНКО, канд. техн. наук, ведущий специалист
ЧП Фирма «РОУД», г. Донецк

С.Н. ТИМОШЕНКО, канд. техн. наук, доцент
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

ПЛАВИЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В ЭЛЕКТРОПЕЧИ С ПОДОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Разработан и опробован в лабораторных условиях жидкофазный плавильно-восстановительный процесс для утилизации металлосодержащих отходов в электропечи путем углеродотермического восстановления и электролиза. Технологические особенности процесса – создание электрической цепи с помощью подовых электродов и использование джоулева тепла – позволяют достичь высоких показателей энергоэффективности, экологической безопасности и снизить производственные затраты.

Ключевые слова: металлосодержащие отходы, утилизация, электропечь с подовыми электродами, энергоэффективность, экологическая безопасность.

В условиях высоких и нестабильных цен на металлолом и чугун актуальной становится задача использования металлизированного сырья, полученного не только из рудных материалов, но и из техногенных отходов (окалина, пыль, шламы). С другой стороны, требует решения проблема утилизации больших объемов накопленных на металлургических предприятиях ранее и создаваемых в настоящее время техногенных отходов. В связи с этим не прекращается поиск новых технологий их рециклинга – энергоэффективных и экологически безопасных.

Попытки использования в шихте дуговых сталеплавильных печей вместо части традиционного металлолома (до 10–15 %) неметаллизированных (сырых) брикетов (с добавками углеродистого восстановителя и связующего), изготовленных из техногенных отходов, заметного успеха не имели [1]. Брикеты вследствие низкой механической прочности разрушались, и оксиды железа практически полностью переходили в шлак. Поэтому предварительной процедурой рециклинга оксидных материалов должна стать их металлизация.

В мировой практике металлизированное сырье (МС) получают твердофазными (Midrex, Energiron-HYL,

ITmk-3 и др.) и жидкофазными (Corex, OxyCup и др.) процессами [2], причем последние являются более производительными и менее требовательными к качеству исходной шихты. Характерной чертой всех технологий утилизации отходов является их высокая капиталоемкость (от 250–300 млн долл. США). Чтобы окупить затраты на внедрение такой технологии в экономически приемлемый срок, годовой объем производства продукта должен составлять не менее 200–500 тыс. т.

В условиях металлургических предприятий Украины наиболее востребованной стала бы технология утилизации железосодержащих отходов в количестве, соответствующем объему их образования (20–50 тыс. т в год) при сроке окупаемости инвестиций 1–2 года. Такими показателями ни одна из имеющихся технологий получения МС из техногенных отходов не обладает, при этом лучшими среди них являются процессы ITmk-3 и OxyCup.

Технология ITmk-3 [3] предусматривает производство чугуна в виде оплавленных гранул без использования кокса и агломерата. В печь с вращающимся подом тонким слоем загружают окатыши, полученные из металлосодержащих отходов, низкосортного угля и свя-



зующего, и нагревают их до 1350–1450 °С. Железо быстро восстанавливается, науглероживается и частично расплавляется (весь процесс занимает около 10 мин). На выходе получают гранулированный чугун, содержащий 95–97 % железа. Расход энергии составляет 13,5 ГДж/т продукта. К недостаткам процесса относятся его зависимость от природного газа, используемого для отопления печи, и довольно длительный срок окупаемости (при производительности ниже 200 тыс. т продукта в год).

Процесс OxuSip [4] заключается в восстановлении и плавнении в шахтной печи брикетов, содержащих железосодержащие отходы, восстановитель (в виде коксовой мелочи), известь (в качестве флюса) и связующее. Продуктом является жидкий чугун, до 4 % которого составляет углерод. Расход дутья и коксовой мелочи на 1 т чугуна – 1100–1200 м³ и 200–300 кг соответственно, продолжительность процесса – около 1,5 часа. Недостатком технологии является дорогостоящее производство брикетов (смеситель, пресс, сушка); чтобы инвестиции в него окупались в приемлемый срок, необходимо выпустить не менее 200 тыс. т продукта в год [5].

Фирма «РОУД» провела лабораторные исследования двухстадийного процесса рециклинга железосодержащих отходов в электродуговой печи [6], на первой стадии которого происходило твердофазное предварительное восстановление компактированных отходов в сводовой камере электродуговой печи отходящими газами плавки, а на второй, жидкофазной, – получение чугуна в жидкой ванне печи. Однако проблемы, связанные с непостоянством восстановительного потенциала отходящих газов и совмещением различных по физической сути стадий в одном агрегате, не позволили достичь высокой энергоэффективности и экологической безопасности при применении этой технологии.

Предприятия черной металлургии Украины испытывают потребность в конкурентоспособных технологических процессах производства МС в объеме 20–50 тыс. т в год. Потенциальными потребителями продукта в Донецком регионе являются ОАО «Энергомашспецсталь» (г. Краматорск), ООО «Азовэлектросталь» (г. Мариуполь), ООО «Электросталь» (г. Курахово), ЧП «ДЭМЗ» (г. Донецк).

Отсутствие рентабельных технологий утилизации техногенных отходов является проблемой и для предприятий цветной металлургии. Исходя из этого целью настоящей работы была разработка малозатратного, энергетически эффективного и экологически безопасного процесса восстановления рудных материалов и техногенных отходов, содержащих оксиды железа, меди и других металлов, для последующего рециклинга полученного полупродукта.

В основе технологии [7] лежит использование углеродотермического восстановления оксидных материалов, в т.ч. техногенных отходов, в печи, где основная часть энергии, необходимой для данного процесса, выделяется в шлаковой ванне при прохождении через нее электрического тока. Дополнительное тепло (в качестве альтернативы электроэнергии) получают при продувке металла в ванне кислородом в результате окисления углерода. При использовании постоянного тока определенное развитие получает электролиз, обеспечивая осаждение восстанавливаемого металла из шлакового расплава на катоде. Шихта, представляющая собой смесь железосодержащих материалов, восстановителя в виде низкосортного угля и шлакообразующих, поступает в ванну через шахту в плавильной камере печи, а жидкий металл (продукт восстановления) накапливается в горне-копильнике, откуда его периодически сливают в ковш.

Важную конструктивную роль играют подовые электроды, которые обеспечивают подвод тока к шихте и переплавляемому металлу без использования верхних графитированных электродов с соответствующими механизмами перемещения и управления, что в значительной мере снижает инвестиционные расходы, упрощает организацию движения столба шихтовых материалов и улавливание пылегазовыделений из печи, физическое тепло которых частично используется для предварительного нагрева шихты. Подовый электрод стержневого типа (в печи установлены два таких электрода) представляет собой биметаллический стержень, нижняя (медная) часть которого охлаждается водой и соединена с источником тока, а верхняя (стальная) – контактирует с расплавом. При работе печи стальная часть электрода расплавляется до термически равновесной толщины, становясь частью ванны.

Согласно технологической схеме процесса, приведенной на рис. 1, производство МС включает следующие операции:

- непрерывную загрузку предварительно перемешанных компонентов шихты в шахту печи, где в условиях противотока с горячими отходящими газами происходит предварительное твердофазное восстановление;
- плавление шихтовых материалов и жидкофазное восстановление металла за счет джоулева тепла, выделяемого в шлаковой ванне при прохождении электрического тока между подовыми электродами, а также при окислении углерода шихты и металлической ванны газообразным кислородом;
- периодический выпуск металлического расплава (восстановленного МС и шлака) через специальные летки.

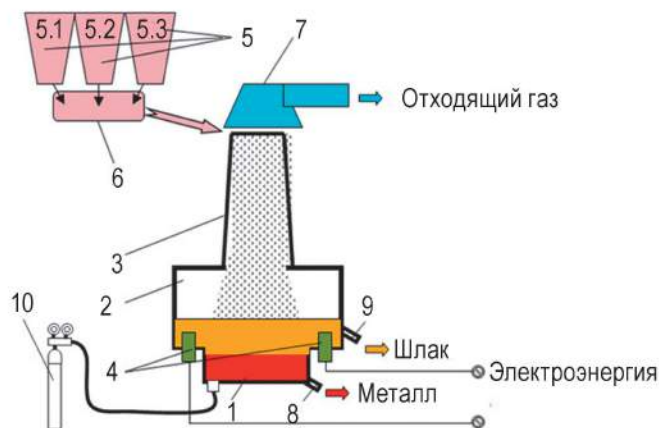


Рисунок 1 – Технологическая схема установки и процесса

Основными узлами установки являются плавильная печь, состоящая из горна-копильника 1 и корпуса 2, футерованная огнеупорными материалами, и шахта 3 для подачи в печь и предварительного восстановления исходных шихтовых материалов. В горне печи есть подовые электроды 4. Установка снабжена системой загрузки шихты с бункерами 5 для железосодержащих материалов (5.1), восстановителя (5.2) и шлакообразующих (5.3), а также смесителем 6. Пылегазовыделения выводятся из печи системой газоудаления 7. Для периодического выпуска жидкого МС и шлака предусмотрены летки 8 и 9. Горн-копильник оборудован системой продувки жидкой ванны кислородом 10.

Жидкофазный плавильно-восстановительный процесс в электрической печи с подовыми электродами был опробован на лабораторной установке емкостью до 50 кг по жидкому металлу. Режимные параметры и результаты испытаний представлены в табл. 1.

Для оценки роли электролиза в процессах восстановления эксперименты проводили на переменном токе (опыты 1–3) при напряжении 68–75 В, силе тока 1,75–1,90 кА, а также на постоянном токе – при аналогичных электрических параметрах (опыт 4). В качестве исходной шихты опробованы следующие техногенные железосо-

держащие отходы (ЖСО): в опытах 1 и 4 – окалина прокатных цехов, в опыте 2 – шлам доменного цеха, в опыте 3 – колошниковая пыль доменного цеха. В качестве восстановителя в опытах 1–3 применяли уголь марки АР (его доля составила 25 % от массы ЖСО). Шлакообразующим служила известь (около 10 % от массы ЖСО). Сверху ванну через трубку продували кислородом. В опыте 4 (на постоянном токе) углеродистый восстановитель и продувку кислородом не использовали. Конечным продуктом процесса был жидкий чугун.

Для создания электрической цепи и выделения джоулева тепла, необходимого для разогрева печи, в начале процесса использовали электропроводную коксовую мелочь, которую помещали между подовыми электродами. Выход годного при восстановлении железосодержащих отходов оценивали по величине отношения массы железа в чугуне к массе общего железа в ЖСО (с учетом потерь железа со шлаком).

При оценке энергетического баланса процесса в лабораторной установке исходили из соотношения (1,4–1,6) между теплом, выделяющимся в шлаковой ванне при прохождении электрического тока, и теплом, полученным от окисления углерода газообразным кислородом, а также из значения теплового КПД печи (0,6).

Согласно приведенным данным, оптимальным исходным материалом являются ЖСО в виде окалины, которые обеспечивают 94 % выхода годного и расход электроэнергии 2,12 кВт·час на килограмм продукта (или 7,6 МДж/кг). С учетом тепла экзотермических реакций в жидкой ванне при продувке кислородом (который, как предполагается, расходуется преимущественно на окисление углерода) определен общий удельный расход энергии на лабораторной установке: он составил 12–13 МДж/кг продукта, что соответствует значению аналогичного показателя процесса ITmk-3.

При использовании других видов ЖСО (шлак и плавильная пыль) показатели процесса ухудшаются на 20–25 % как по выходу годного, так и по энергоэффективности. В случае восстановления железа элект-

Таблица 1 – Режимные параметры и результаты опытных плавков

№ опыта	Состав исходной шихты (ЖСО), %						Состав продукта (чугун), %						Состав шлака, %			Масса, кг			Время плавки, мин	Выход годного, %	Расход на 1 кг продукта	
	Fe ₂ O ₃ +FeO	CaO+MgO	SiO ₂	MnO	Zn	C	Fe	C	Mn	S	P	Zn	Fe ₂ O ₃ +FeO	CaO+MgO	SiO ₂	ЖСО	продукта	шлака			электроэнергии, кВт·час	кислорода, м ³
1	90,9	1,0	3,2	0,4	–	0,26	96,5	2,2	0,32	0,040	0,08	–	9,4	64,5	11,9	42,0	27,5	6,5	57	94	2,12	0,25
2	63,5	4,4	14,0	0,06	0,1	5,8	94,8	3,4	0,12	0,065	0,12	0,08	17,9	41,8	32,7	39,5	17,4	15,8	68	76	2,25	0,28
3	66,8	6,9	8,6	0,2	1,5	9,4	94,6	4,1	0,14	0,055	0,11	0,34	15,2	40,3	33,8	38,9	15,7	13,4	66	71	2,29	0,28
4	90,9	1,0	3,2	0,4	–	0,26	97,3	2,2	0,33	0,040	0,08	–	4,8	57,3	32,2	25,5	8,4	6,2	125	48	4,54	–



тролизом показатели процесса снижаются примерно в два раза.

Ожидаемый расход электроэнергии на процесс при переходе к пилотной установке (с учетом данных, полученных в лабораторных условиях, и с поправкой на повышение теплового КПД печи с 0,6 до 0,7) составит 1,7–1,8 тыс. кВт·час (т.е. 6,1–6,5 ГДж). Общий ожидаемый удельный расход тепла (с учетом экзотермических реакций в ванне при продувке кислородом) не превысит 10–12 ГДж на тонну жидкого МС. В данном случае энергия в основном расходуется на протекание эндотермических процессов восстановления оксидов железа (50–60 %) и на нагрев, плавление, перегрев металла и шлака до температуры выпуска (20–25 %). Остальная часть приходится на потери тепла с отходящими газами и через поверхность агрегата. Следует отметить, что жидкофазный плавильно-восстановительный процесс не уступает по энергоэффективности наиболее прогрессивному аналогу – ITmk-3.

Исследуемый процесс был также опробован для переработки медьсодержащих шлаков класса А с целью восстановления меди для последующего рециклинга продукта. Исходные параметры и результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Эксперименты проводили на переменном токе при следующих электрических параметрах: напряжение 68–75 В, сила тока 1,75–1,90 кА. В качестве шихты в опытных плавках использовали смесь медьсодержащего шлака класса А (35 кг), угля марки АР (7 кг), игравшего роль восстановителя, и извести (3 кг). Средний расход электроэнергии составил 3,56 кВт·час/кг продукта (или 12,8 МДж/кг). Продувку ванны кислородом не проводили.

Как следует из приведенных данных, при восстановлении меди процесс весьма эффективен. Однако он не позволяет достичь рафинирования расплава от примесей других цветных металлов, присутствующих в исходном шлаке (свинец, олово, цинк), что необходимо учитывать при выборе общей стратегии рециклинга.

Задачей дальнейших исследований является создание и испытание пилотной установки мощностью 1–3 тыс. т жидкого чугуна в год с целью наработки технологической и технико-экономической базы, необходимой для решения вопроса о строительстве промышленной установки производительностью 20–50 тыс. т металлized сырьев в год.

ВЫВОДЫ

Разработан и опробован в лабораторных условиях жидкофазный углеродотермический плавильно-восстановительный процесс в электрической печи с подовыми электродами, позволяющий использовать различные шихтовые железосодержащие материалы – окалину, пыль, шламы доменного и сталеплавильного производств.

Отмечено, что использование подовых электродов существенно снижает инвестиционные затраты на оборудование, повышает энергоэффективность и экологическую безопасность процесса.

Описан способ получения жидкого чугуна из основных видов техногенных железосодержащих отходов металлургического производства, при реализации которого выход годного составляет 71–94 %, расход электроэнергии – 2,12–2,29 кВт·час/т продукта (или 7,6–8,2 МДж/кг), общий расход энергии – 12–13 МДж/кг продукта.

Показана возможность восстановления меди из шлаковых отходов медеплавильного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов, В.С. Практика применения оксидоуглеродных брикетов при выплавке стали в электродуговых печах на ЗАО «ВМЗ Красный Октябрь» / В.С. Антонов, Ф.М. Летучий, П.Ю. Белявский // Труды 8-го конгресса сталеплавильщиков (Нижний Тагил, 2004). – М., 2005. – С. 270–273.
2. Коновалов, Ю.В. Металлургия : учеб. пособие для бакалавров вузов в трех книгах. Кн. 1. Производство чугуна, железа, стали и ферросплавов / Ю.В. Коновалов, А.А. Троянский, С.Н. Тимошенко. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – 430 с.
3. Tanaka, H. Fastmet, Fastmelt and ITmk3: development of new coal-based Ironmaking process / H. Tanaka, R. Miyagawa, T. Harada // Direct from Midrex. Special Report. Winter 2007/2008. – P. 8–13.
4. Блатц, Ю. Технологии повторного использования пыли из фильтров и других отходов металлургического производства / Ю. Блатц // Металлургическое производство и технология (русское издание MPT International). – 2005. – № 2. – С. 6–13.

Таблица 2 – Условия и результаты плавков медных шлаков

№ опыта	Элементный состав исходного шлака, %						Элементный состав продукта, %					
	Cu	Pb	Sn	Zn	Ni	Fe	Cu	Pb	Sn	Zn	Ni	Fe
1							78,1	2,13	10,5	0,89	0,78	
2	19,58	2,85	1,15	3,98	0,10	Остальное	76,9	2,16	11,9	0,82	0,92	Остальное
3							80,3	1,82	10,2	0,94	0,73	

5. **Стовпченко, А.П.** Современное состояние переработки пыли дуговой сталеплавильной печи / А.П. Стовпченко, Ю.С. Проїдак, Л.В. Камкіна // Сотрудничество для решения проблемы отходов : матер. VI Междунар. конф. – Х. : ЭкоИнформ, 2009. – С. 61–63.
6. **Троянський, А.А.** Разработка основ непрерывного плавильно-восстановительного процесса в дуговой печи / А.А. Троянський, П.И. Тищенко, С.Н. Тимошенко, А.П. Тищенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету / Редкол. Мінаєв О.А. (голова) та ін. – Донецьк : ДонНТУ, 2002. – Вип. 40 (сер. : Металургія). – С. 76–81.
7. **Пат. 97745 Україна, С22В4/00.** Спосіб виплавки металів та агрегат для виплавки металів / П.І. Тищенко, М. Павлічевич, О.А. Троянський та ін.; ПП «Фірма РОУД». – № 201013890; заявл. 22.11.2010; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23. – 6 с.

Поступила в редакцію 16.04.2013

Розроблений і випробуваний в лабораторних умовах рідиннофазний плавильно-відновний процес для утилізації металовмісних відходів в електропечі шляхом вуглецевотермічного відновлення та електролізу. Технологічні особливості процесу – створення електричного кола за допомогою подових електродів і використання джоулевої теплоти – дозволяють досягти високих показників енергоефективності, екологічної безпеки і знизити виробничі витрати.

Developed and tested in laboratory liquid-phase smelting-and-reducing process for metal containing waste recycling in electric furnace by carbothermal reduction and electrolysis. Technological peculiarities of the process are as follows: creation of electric circuit with the help of bottom electrodes, use of Joule heat that along with chemical and physical heat of process products increases its energy efficiency, environmental safety and reduces production costs.