

*Проценко М.Ю.,
к.т.н. Куберский С.В.,
к.т.н. Эссельбах С.Б.
(ДонГТУ, Алчевск, Украина)*

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ
ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ
МАРГАНЕЦСОДЕРЖАЩИМИ ОТХОДАМИ**

Запропоновано метод дугового відновлення елементів зі шлаків виробництва сілікомарганцю в залізовуглецеві розплави та зроблена оцінка його ефективності.

***Ключові слова:** дугове відновлення, шлак, марганець, кремній, легування.*

Предложен метод дугового восстановления элементов из шлака производства силикомарганца в железоуглеродистые расплавы и произведена оценка его эффективности.

***Ключевые слова:** дуговое восстановление, шлак, марганец, кремний, легирование.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Постоянный рост объемов производства черных металлов сопутствует образованию огромных шлаковых отвалов, занимающих большие площади и оказывающие негативное влияние на экологическую обстановку.

Переработка и утилизация шлаков является актуальным и обязательным элементом безотходной технологии, так как способствует ресурсосбережению, а также снижению загрязнений водного и воздушного бассейнов.

Особый интерес для металлургии представляют шлаки ферросплавного производства, которые содержат значительное количество ценных компонентов используемых для рафинирования и легирования железоуглеродистых расплавов.

Наибольшее количество шлака образуется при производстве марганцевых сплавов и составляет около 57% от общего выхода ферросплавных шлаков.

При производстве марганцевых ферросплавов со шлаками теряется до 31% марганца, причем основная доля марганца (22,2%) теряется с отвальными шлаками.

Реальный путь снижения потерь марганца со шлаками – использование их в производстве ферросплавов и других металлургических переделах в качестве марганецсодержащего сырья.

Актуальным на современном этапе является переработка шлаков силикомарганцевого производства, в которых содержатся корольки силикомарганца, а марганец находится в виде силикатов.

Анализ исследований и публикаций.

Способы пневматической и магнитной сепарации, применяемые для обогащения ферросплавных шлаков, с целью их дальнейшего использования в шихте для производства ферросплавов, являются достаточно сложными с точки зрения технологии и используемого оборудования. Кроме того, силикомарганец и силикаты марганца не обладают магнитными свойствами, плотность силикатов марганца близка к плотности других составляющих шлака, поэтому извлечение их из шлаков с использованием традиционных технологий затруднено. В результате со шлаками силикомарганца от производства марганцевых ферросплавов ежегодно теряется свыше 100 тыс. тонн металла и значительная часть марганца в виде различных соединений [1].

Примерный химический состав шлака производства силикомарганца показан в таблице 1 [2, 3].

Таблица 1 – Химический состав отвального шлака производства силикомарганца

Компонент шлака	Mn	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
Содержание, %	13 – 18	45 – 50	12 – 19	2 – 5	6 – 9
Компонент шлака	FeO	S	P	K ₂ +Na ₂ O	
Содержание, %	0,4 – 0,7	0,8 – 1,3	0,004 – 0,010	2 – 5	

Постановка задачи. С целью ресурсосбережения и улучшения экологической обстановки оценить эффективность использования различных технологических схем переработки и утилизации марганецсодержащих отходов черной металлургии.

Изложение материала и его результаты. На первом этапе было исследовано влияние низких температур на эффективность использования магнитной сепарации для обогащения шлака силикомарганцевого производства.

Перед обогащением шлака силикомарганца производили его предварительное дробление и рассев. Шлак помещали в алюминиевую

емкость, где в него заглублялась термопара для контроля температурного режима. Магнитную сепарацию осуществляли с использованием постоянных магнитов, предварительно охладив шлак жидким азотом. Исследования производили в трех температурных интервалах ($-196 \div -150^{\circ}\text{C}$, $-150 \div -100^{\circ}\text{C}$, $-100 \div -50^{\circ}\text{C}$).

Анализ результатов экспериментов показывает, что предложенный метод позволяет произвести обогащение шлака силикомарганцевого производства по содержанию марганца на $30,5 \div 66,47\%$. Максимальное обогащение характеризует температурный интервал $-150 \div -100^{\circ}\text{C}$ при этом содержание марганца возрастает с 17% до $28,3\%$, т. е. на $66,47\%$ [4]. Достигнутое в результате обогащения содержание марганца в сырье отвечает его содержанию в промышленных марганцевых рудах, которые могут использоваться в ферросплавном производстве.

Однако, предложенный способ подготовки сырья требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований для разработки эффективной и конкурентноспособной технологии.

Следующий исследованный способ переработки силикомарганцевого шлака предполагал переплав его в смеси с восстановителем в медеплавильной электродуговой печи ДМ – 0,5 Стахановского ферросплавного завода.

Для переплава отвального шлака использовали шихту следующего состава:

шлак	– 300кг,
уголь тощий	– 20 кг,
известняк	– 40 кг,
стальная обрезь	– 14 кг.

Шихту тщательно перемешали и засыпали в электропечь.

Среднее содержание марганца в исходном шлаке составило $13,6\%$.

Переплав смеси производили непрерывно, без догрузки дополнительных порций шихтовых материалов. Во время разогрева и расплавления смеси, периодически производили наклон ванны для улучшения перемешивания содержимого. Продолжительность периода нагрева и расплавления шихты составила 2 часа 20 мин.

В результате переплава шлака получено 17 кг сплава с содержанием марганца 21% . Расчетная степень восстановления марганца составила около 9% .

Шлак после переплава верхний и нижний получился однородный, одинакового химического состава с содержанием марганца $12,8 - 13,0\%$ и SiO_2 $47,5 - 48,4 \%$, темно-зеленого цвета и практически не имел вкраплений угля и известняка. За время работы печи было израсходовано 400 квт·ч электроэнергии, что свидетельствует о крайне низкой эффек-

тивности данного способа. Только по расходу электроэнергии затраты на получение лигатуры предложенным способом более чем в 25 раз выше по сравнению с традиционной технологией производства ферромарганца, и несмотря на относительно низкую стоимость шихты перспектив такая технология не имеет.

Авторами настоящей статьи предложена схема восстановления марганца и кремния из шлака производства силикомарганца методом дугового глубинного восстановления (ДГВ).

Метод заключается в восстановлении компонентов шлака в электрической дуге определенным восстановителем. Предложен карботермический метод восстановления с использованием боя графитовых электродов, который наиболее распространен и доступен.

Для исследований было проведено две серии опытов, на воздухе и с использованием жидкого расплава.

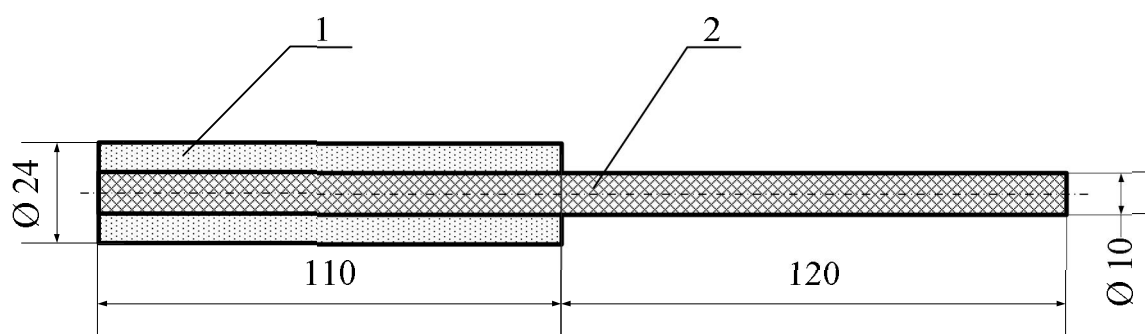
Установка для дугового восстановления элементов на воздухе состоит из рудно-восстановительного блока и углеродистого тигля.

Блок представляет собой стальной электрод, заформованный в рудно-восстановительной смеси (рисунок 1).

Рудно-восстановительная смесь состояла из:

шлак производство силикомарганца	– 69%;
бой графитовых электродов	– 23%;
жидкое стекло (связка)	– 8%.

Расчет необходимого количества углерода был выполнен с учетом возможного восстановления всех компонентов шлака. Шлак и бой электродов подвергались дроблению, расसेву на фракцию –0,4 мм и смешиванию с последующей добавкой жидкого стекла.



1 – рудно-восстановительная часть блока; 2 – стальной электрод.

Рисунок 1 – Рудно-восстановительный блок со стальным электродом

Из подготовленной смеси производили формование блока с использованием специальной оснастки. Затем рудно-восстановительный блок извлекали из оснастки, просушивали при 280 – 300 °С и взвешивали.

Блок, служащий анодом, закрепляли в неподвижном электродо-держателе установки для его сжигания. В нижней части установки был выполнен подвижный графитовый тигель, который являлся катодом.

Сжигание блока производили при силе тока 100–250 А и напряжении 30 – 35 В. Время сжигания одного блока при этом колебалось в пределах от 96 до 202 секунд.

После каждой плавки полученный металл, остаток электрода и шлак были взвешены. Химический состав металлического электрода и полученного в результате оплавления электрода металла представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав металлического электрода и полученного металла

Материал	Содержание элементов, %					
	Mn		Si		S	
	min	max	min	max	min	max
электрод	0,59		0,10		0,038	
металл	1,30	2,89	0,58	2,82	0,110	0,180

Шлак производства силикомарганца содержал 13,7% Mn, 46,9% SiO₂, 1,3% S. На основании данных таблицы 2 были произведены расчеты степени восстановления элементов представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Расчетная степень восстановления элементов, %

Показатель	Элементы					
	Mn		Si		S	
	min	max	min	max	min	max
Степень восстановления	14,68	44,31	5,68	28,00	13,69	30,39

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой степени восстановления марганца и кремния, однако попутно с ними восстанавливается и сера, что крайне нежелательно при легировании по предложенной технологии чугуна и стали.

Переход серы может быть объяснен крайне низкой основностью рудно-восстановительной смеси, что затрудняет удаление ее из обрабатываемого расплава. В последующих экспериментах для рафинирования расплава от серы было исследовано влияние добавок мела на степень десульфурации и ход восстановительного процесса.

Конструкция блоков и методика проведения экспериментов аналогична предыдущим, а состав рудно-восстановительной смеси был следующим:

шлак производство силикомарганца	– 70%;
бой графитовых электродов	– 10%;
мел	– 12%;
жидкое стекло (связка)	– 8%.

Результаты проведенных опытов представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Химический состав металлического электрода и полученного металла

Материал	Содержание элементов, %					
	Mn		Si		S	
	min	max	min	max	min	max
электрод	0,59		0,10		0,038	
металл	1,19	2,77	0,28	1,15	0,095	0,180

Таблица 5 – Расчетная степень восстановления элементов, %

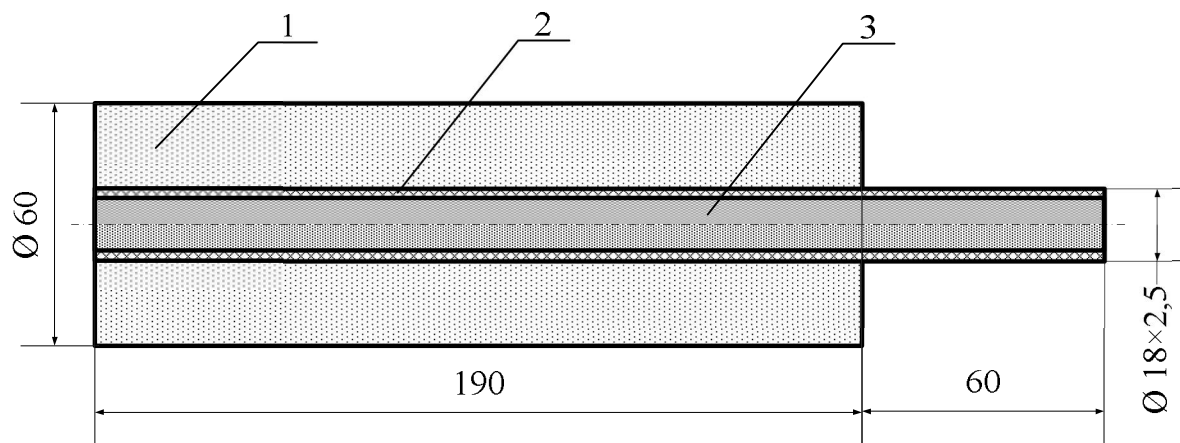
Показатель	Элементы					
	Mn		Si		S	
	min	max	min	max	min	max
Степень восстановления	9,42	37,74	1,78	9,82	9,58	24,11

Данные таблиц 4 и 5 свидетельствуют о том, что использование мела в составе блоков способствует некоторому снижению степени насыщения расплава серой, но не решают проблему в целом. Кроме того, значительно снизилась степень извлечения марганца и кремния. Повышение степени восстановления марганца и рафинирования металла от серы может быть достигнуто путем использования в составе блоков других кальцийсодержащих материалов, таких как доломит, известняк и известь.

Последующие исследования проводили на жидком металле, расплавляемом в индукционной печи емкостью 60 кг. Диаметр рудной части используемых блоков колебался от 50 до 68 мм. Использовались стальные (Ø 19 мм) и графитовые электроды в стальной трубке (Ø 18×2,5 мм) с добавкой Al₂O₃ и MgO для обеспечения синхронного расходования электрода и рудно-восстановительной смеси. При изготовлении графитовых электродов в стальную трубку набивали электродную массу при 140⁰С. Электродная масса состояла из графитовой стружки и 20% каменноугольного пека, затем к общей массе в первом случае до-

бавляли 12,5% Al_2O_3 , а во втором 12% MgO . После набивки готовые электроды коксовали в печи при постепенном увеличении температуры до 700°C и последующей выдержки.

Эскиз нового рудно-восстановительного блока представлен на рисунке 2.



1 – рудно-восстановительная часть блока; 2 – стальная трубка;
3 – электродная смесь.

Рисунок 2 – Рудно-восстановительный блок с графитовым электродом

В печь загружали определенное количество чугуна и расплавляли. Затем подключали устройство для обработки расплава в индукционной печи и начинали сжигать рудно-восстановительные блоки.

Сжигание блока производили при силе тока 300 А и напряжении 30 – 35 В. Время сжигания одного блока при этом колебалось в пределах от 220 до 603 секунд. На каждой плавке сжигались поочередно несколько блоков и отбирались пробы чугуна для химического анализа изменения его состава от блока к блоку. Расчетная степень восстановления элементов на проведенных плавках колебалась в следующих пределах:

- марганец от 14,95 до 62,57%;
- кремний от 14,74 до 79,94%;
- сера от 13,15 до 33,14%.

Аналогичные опытные плавки были проведены со шламом газоочисток производства доменного ферромарганца. Степень восстановления марганца при этом составила 78,96%, а заметного восстановления кремния и серы не наблюдалось. Отсутствие насыщения расплава серой может быть связано с высокой основностью шлама составляющей 1,2 – 1,4, а более высокая степень восстановления марганца объясняется формой его существования. Если в шлаке силикомарганцевого производства марганец связан в силикаты то в шламе находится в виде окси-

да, что способствует более полному его восстановлению при одинаковых энергетических условиях процесса.

В процессе проведения плавов была проанализирована динамика изменения температуры расплава. В среднем падение температуры чугуна без электродуговой обработки составило $37 \div 124^{\circ}\text{C}$, а с обработкой – $16 \div 99^{\circ}\text{C}$. Из этого следует, что во время электродуговой обработки тепло затрачивается помимо реакций восстановления также на нагрев расплава в среднем на 30°C и это необходимо учитывать при оценке экономической эффективности нового способа. Также установлено, что весьма эффективным является использование при дуговой обработке крышки изолирующей зеркало металла в ковше или печи от контакта с атмосферой и значительно снижающей скорость его остывания.

Выводы и направления дальнейших исследований.

Сравнительный анализ затрат на легирование чугуна марганцем и кремнием по предложенному способу и с помощью ферросплавов показал, что дуговое восстановление элементов, является достаточно перспективным.

Анализ калькуляций себестоимости производства марганец и кремний содержащих ферросплавов показывает, что доля шихтовых материалов в себестоимости составляет 35 – 40% и такая же доля затрат связана с расходом технологической электроэнергии. При дуговом восстановлении доля шихты в себестоимости не превышает 10 – 15% и процесс будет рентабельным если затраты на электроэнергию будут находиться в пределах 55 – 70%.

На проведенных экспериментах, при легировании чугуна Mn и Si, затраты на электроэнергию составили 43 – 66% (среднее 55,6%) от стоимости внепечной обработки, что свидетельствует о конкурентоспособности предложенного способа. Достаточно перспективным представляется также переработка методом дугового восстановления доменных шламов, при которой получена высокая степень извлечения марганца без заметного насыщения расплава серой.

Дальнейшие исследования будут направлены на увеличение степени восстановления легирующих, снижение энергозатрат процесса и степени восстановления вредных примесей из шихты в расплав, усовершенствование состава и конструкции рудно-восстановительных блоков, а также создания блоков для одновременного рафинирования и легирования расплава.

Библиографический список

1. Панфилов М.И. и др. *Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии* / М.И. Панфилов, Я.Ш.Школьник, Н.В. Орнин-

ский, В.А. Коломиец, Ю.В. Сорокин, А.А. Грабеклис. – М.: Металлургия, 1987. – 238 с.

2. Производство стали и ферросплавов в электропечах. Каблуковский А.Ф.: Учебник для техникумов. – М.: Металлургия, 1991. 335 с.

3. ЭлектрOMETаллургия стали и ферросплавов. Крамаров А.Д., Соколов А.Н. М., «Металлургия», 1976. 376 с.

4. Проценко М.Ю. и др. Исследование возможности обогащения шлака производства силикомарганца методом магнитной сепарации / Проценко М.Ю., Куберский С.В., Эссельбах С.Б. // Сб. научн. тр. ДонГТУ. Вып. 28.– Алчевск: ДонГТУ, 2009.– С. 254-259.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.