

УДК 669.054:669.782

к.т.н. Проценко М. Ю.,
к.т.н. Куберский С. В.,
Проценко В. И.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ИЗ ПЕСКА

В работе проанализировано распределение компонентов между контактирующими фазами при дуговом глубинном восстановлении кремния из песка, выполнен сравнительный анализ расчетного и экспериментального химического состава конечного шлака, а также показана высокая сходимость теоретических и практических результатов.

Ключевые слова: дуговое глубинное восстановление, материальный баланс, кремний, рудно-восстановительная смесь, баланс обработки, распределение компонентов, внепечная обработка расплава.

Для улучшения качества стали и обеспечения требуемого уровня ее физических свойств в традиционных технологических схемах производства предусмотрена внепечная обработка железоуглеродистых расплавов различными ферросплавами и лигатурами. Кроме того, ужесточение требований к качеству стали приводит к увеличению выпуска легированных марок, а следовательно, и к повышению удельного расхода ферросплавов.

Поэтому объемы производства стали в значительной степени определяют как качественный, так и количественный рост ферросплавного производства. Причем наибольшие объемы потребления в сталеплавильном производстве характерны для кремнийсодержащих ферросплавов и лигатур.

Динамика производства стали в мире и РФ за период 2015–2021 гг. приведена на рисунке 1 [1, 2], а ферросплавов и ферросилиция за период 2015–2019 гг. — на рисунке 2 [3–6].

Данные рисунков 1 и 2 подтверждают высказанную выше взаимосвязь между ростом объемов производства стали и кремнистых ферросплавов, а также динамику их изменения.

В настоящее время обработка жидкого металла ферросплавами остается одним из

основных методов воздействия на качество и свойства стали, чугуна и цветных сплавов. В последние годы отмечается значительный спрос на средне- и высоколегированные стали повышенного качества, что является предпосылкой к увеличению потребностей в ферросплавах и лигатурах, а также их стоимости.

Значительное влияние на себестоимость ферросплавов оказывают потери базовых элементов при традиционных схемах переработки рудного сырья и последующей обработке металлических расплавов. При раскислении и легировании стали марганцем с использованием ферромарганца сквозное извлечение его из оксидной марганецсодержащей руды не превышает 50 % от общего количества легирующего элемента, содержащегося в руде. Основная часть потерь, согласно данным работы [7], имеет место при выплавке марганецсодержащего сплава. Часть марганца возвращается в ферросплавное производство при использовании шлаков в качестве шихты или применении шлака непосредственно в сталеплавильном производстве для прямого легирования и частичной замены ферросплавов. Но даже с учетом этих факторов потери марганца снижаются незначительно и составляют 57–67 % [7, 8].

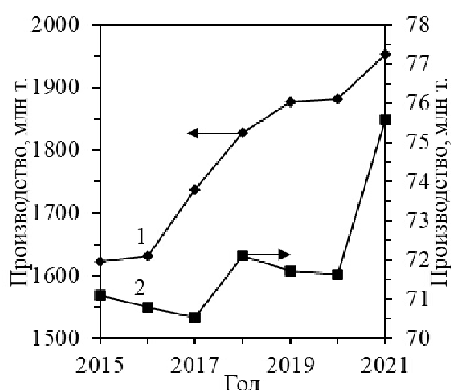


Рисунок 1 Производство стали в мире (1) и РФ (2)

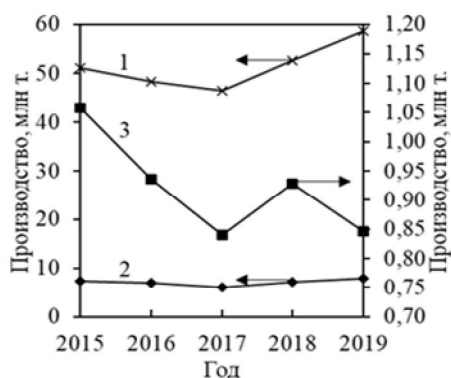


Рисунок 2 Производство ферросплавов в мире (1), в РФ (2) и кремнистых ферросплавов РФ (3)

При производстве силикомарганца сквозные потери марганца и кремния составляют ~45–50 % и ~70–80 % соответственно. Эффективная переработка силикомарганцевого шлака в сталеплавильных технологиях практически невозможна ввиду присутствия в нем марганца и кремния в виде силикатов. Анализ калькуляции себестоимости производства марганцевых сплавов показывает, что расходы на шихтовые материалы составляют 27–48 % всех затрат, поэтому особое внимание необходимо уделить рациональному использованию шихты и снижению потерь базовых элементов со шлаком, а также в результате испарения [7].

Одной из наиболее актуальных проблем современной металлургии являются поиск альтернативных традиционных шихтовых материалов и разработка новых технологиче-

ских приемов, позволяющих эффективно использовать их при производстве железоуглеродистых сплавов. Метод дугового глубинного восстановления (ДГВ) полезных элементов из вторичных материалов и отходов непосредственно в металлический расплав появился в металлургии довольно недавно и в настоящее время является актуальным направлением научных исследований [8].

Конкурентоспособность предложенного способа рафинирования и раскисления-легирования расплавов в первую очередь обусловлена снижением расходов на шихтовые материалы и энергоресурсы, а также увеличением сквозного извлечения примесей из материалов, содержащих их оксиды. Для повышения эффективности технологии обработки расплавов методом ДГВ важными являются разработка и описание механизма восстановления примесей и их распределения между контактирующими фазами.

Основной *целью* данной работы является комплексный анализ баланса элементов металла и компонентов шлака при легировании чугуна кремнием с использованием метода ДГВ.

Объект исследования — процесс ДГВ кремния.

Предмет исследования — анализ распределения компонентов между контактирующими фазами при обработке металла методом ДГВ кремния.

Основная *задача*, решаемая в исследованиях, заключается в анализе материального баланса метода ДГВ кремния в железоуглеродистый расплав на основании проведенной серии экспериментальных плавок.

При проведении исследований использовали стандартные методики подготовки сырья, отбора и подготовки проб для химического анализа состава чугуна и шлака. Химический анализ проб производился на спектрометре серии ARL 9900, относительное стандартное отклонение которого составляет 0,01–0,001. Полученные результаты экспериментальных данных обрабатывались на ПЭВМ с использованием стандартного пакета программ Microsoft Excel.

С целью развития теории и технологии дугового глубинного извлечения полезных элементов в железоуглеродистые расплавы авторами настоящей статьи были предложены теоретические и технологические аспекты извлечения кремния из песка, в котором содержание кремнезема может достигать 97 % [9].

При ДГВ основными затратными статьями являются шихтовые материалы и электроэнергия. Доля затрат на шихтовые материалы в себестоимости, как правило, не превышает 10÷15 % (для кремниевых и марганцевых ферросплавов 30÷40 %). Поэтому процесс будет рентабельным, если затраты на электроэнергию будут находиться в пределах 55÷70 %.

В работе [10] приведены материальные балансы процессов алюмотермического ДГВ магния из магнезита и карботермического ДГВ марганца из силикомарганцевого шлака. Ввиду относительной новизны метода ДГВ кремния из песка до настоящего времени отсутствовали данные о распределении компонентов между контактирующими фазами в процессе такой обработки железоуглеродистых расплавов.

Для анализа материального баланса процесса ДГВ кремния из песка в лабораторных

условиях были проведены балансовые экспериментальные плавки по обработке чугуна. Обработку чугуна производили в индукционной сталеплавильной тигельной печи ёмкостью 60 кг (ИСТ-0,06) с использованием источника питания ТИР-630. Для ДГВ кремния в металл погружали графитовый (контактный) электрод и с помощью специального кронштейна, где уже был закреплен опытный рудно-восстановительный блок (РВБ), производили обработку. Для исследований были изготовлены РВБ Ø55 мм. При изготовлении РВБ в качестве основного рудного сырья использовали песок (50,5 %), в качестве связующего — комбинацию жидкого стекла (ж. с.) и каменноугольного пека (к. п.) 15 % и 10 % соответственно, а в качестве восстановителя, количество которого рассчитывали по стехиометрии реакций восстановления кремния углеродом, — коксовую мелочь (24,5 %). В состав РВБ входила рудно-восстановительная смесь (РВС), комбинированный токопроводящий электрод (КЭ), состоящий из стальной трубки Ø18 мм, набитой внутри электродной смесью (ЭС) (MgO 11,1 %, графит 71,1 % и к. п. 17,8 %). Химический состав шихтовых материалов для изготовления РВБ и шлака представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав шихтовых материалов и конечных продуктов обработки

Материал	№ РВБ	Содержание компонентов, %							
		MnO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Прочие ²
Песок	1–3	–	95,9	0,95	0,29	0,87	1,34	–	0,65
Шлак перед обработкой	1	0,50	66,75	7,20	1,23	3,150	11,24	–	9,93
	2	0,50	66,20	4,00	0,70	3,30	13,30	–	12,00
	3	0,50	68,50	2,62	0,60	3,30	13,6	–	10,88
Шлак после обработки	1	0,50	66,20	4,0	0,70	3,30	13,30	–	12,00
	2	0,50	68,5	2,62	0,60	3,30	13,6	–	10,88
	3	0,50	69,20	2,67	1,10	3,30	13,9	–	9,33
Зола кокса ¹	1–3	–	48,7	5,00	1,00	25,00	–	0,30	20,00
Магнезит		–	3,50	4,70	87,90	–	–	–	3,90
Жидкое стекло		–	36,70	0,20	–	0,15	0,10	–	62,85
Футеровка		–	98,00	0,50	0,50	1,00	–	–	–

¹В коксе содержится ~10 % золы.²В том числе ж. с. содержит 8,8 % Na₂O, остальное влага.

Стальная труба для комбинированного электрода использовалась такая же, как и в работе [7].

Основные технологические параметры и энергетические затраты при внепечной обработке железоуглеродистого расплава методом ДГВ кремния приведены в таблицах 2 и 3.

Длительность обработки составляла 5,5–10,8 мин и определялась энергетическими параметрами процесса. По окончании обработки производили замер температуры и отбирали пробу металла и шлака. Остатки рудно-восстановительного блока взвешивали и определяли их геометрические размеры.

РВБ сжигали поочередно при обработке чугуна в ИСТ-0,6 с кислой кварцевой футеровкой. Поэтому конечный шлак после сжигания блока № 1 в расчетах принимался как шлак перед обработкой при сжигании блока № 2. Аналогичное условие принималось при обработке металла блоком № 3.

Экспериментальные данные, полученные после проведения обработки металлического расплава методом ДГВ кремния, представлены в таблице 3.

Необходимо отметить, что прирост кремния в таблице 3 приведен за вычетом его количества, поступающего в металл из трубки комбинированного электрода, а общий прирост углерода в металле опре-

делялся с учетом перехода его из графитового (контактного) электрода.

Материальный баланс процесса оценивали по количеству компонентов и элементов, перешедших в шлак, пыль, газ и металл из рудно-восстановительных блоков, шлака, находящегося на поверхности расплава перед обработкой, и футеровки тигля печи.

Расчет материального баланса производился по методике, представленной в работе [7]. Для расчета компонентов, поступающих из футеровки и шлака перед обработкой плавки, задавались расходными величинами этих материалов, исходя из имеющегося опыта реализации процесса ДГВ и литературных данных. Принимали, что количество шлака на поверхности расплава перед обработкой блоками № 1, № 2, № 3 составляет 62, 83 и 81 г, а количество футеровки, перешедшей в шлак в процессе сжигания этих блоков, — 31, 41 и 37 г соответственно. Также учитывалась масса отобранных проб металла 96, 113 и 102 г для РВБ № 1, 2 и 3 соответственно.

Результаты расчета материального баланса процесса ДГВ кремния для РВБ № 1 представлены в таблице 4. Аналогичные расчеты были выполнены и для других РВБ, для которых получена невязка материального баланса не более 0,2 %, что подтверждает правильность выполненных расчетов и принятых допущений.

Таблица 2

Основные параметры обработки металла методом ДГВ кремния

№ РВБ	Масса металла, кг	Время обработки, с	Мощность, кВт	Затраты электроэнергии, кВт·ч
1	40,00	648	10,55	1,819
2	39,97	332	11,18	1,269
3	39,85	394	9,29	1,326

Таблица 3

Опытные данные после обработки

№ РВБ	Расход материалов, г				Прирост в металле, г		Степень восстановления Si, %
	РВС, г	КЭ		Графитовый электрод	С	Si	
		Стальная труба	ЭС				
1	247	164	30	111	164,28	51,96	68,56
2	160	110	20	94	47,95	3,91	85,54
3	173	173	23	114	35,89	27,81	65,37

Таблица 4

Материальный баланс обработки расплава РВБ № 1

Поступило	г	Получено	г
Металлического расплава	40000	Металла	40068
РВС	247	Металла пробы	96
ЭС	30	Шлака	329
Трубка КЭ	164	Газов и пыли	101
Графитового электрода	111		
Шлака перед обработкой	62		
Футеровка	31		
Всего:	40645		40594
Невязка:	~0,13 %		

По методике, представленной в работе [7], были выполнены расчеты химического состава шлака после обработки металла РВБ № 1, 2 и 3. Сравнение расчетного химического состава шлака и его состава, полученного при анализе проб рентгенофлуоресцентным методом, представлено в таблице 5. При расчете химического состава конечного шлака учитывали поступление магнезита из электродной смеси.

Из данных таблицы 5 видно, что расчетный химический состав шлака достаточно близок к результатам лабораторного анализа. Некоторое отклонение величин можно объяснить как погрешностью в химическом анализе, так и неточностями в определении массы расхода футеровки, конечного шлака и шлака перед обработкой, которые являются гетерогенными. Большее количество Fe_2O_3 (более чем в 2,5 раза), полученное в результате химического анализа, может свидетельствовать о возможности частичного окисления железа за счет оголения зеркала металла, однако этот факт требует дополнительных исследований. Полученные сравнительные результаты (табл. 5) еще раз подтвержда-

ют близкую сходимость экспериментальных и расчетных данных.

На основании данных таблиц 4 и 5 можно отметить, что извлечение кремния из песка при использовании процесса ДГВ составляет 65–85 % и является достаточно высоким показателем в сравнении со сквозным извлечением кремния из кварцита при производстве ферросплавов и дальнейшем легировании ими стали. При определении эффективности процесса необходимо учитывать шлак, который остается после обработки. Количество такого шлака будет больше количества, используемого в качестве основного рудного материала, а химический состав близок к составу шлаков, которые можно использовать для производства строительных материалов и в дорожном строительстве. Поэтому затраты на шихтовые материалы и, соответственно, себестоимость обработки будут еще ниже. Результаты проведенной работы в дальнейшем позволят прогнозировать распределение компонентов при обработке металла методом ДГВ кремния, что необходимо для организации эффективного технологического процесса.

Таблица 5

Состав расчетного шлака и полученного по факту

№ РВБ	Содержание компонента, %															
	MnO		SiO ₂		CaO		MgO		Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃		P ₂ O ₅		Прочие	
	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.
1	0,50	0,21	66,20	68,82	4,00	4,40	0,70	2,92	3,30	3,69	13,30	5,94	–	0,02	12,00	13,99
2	0,50	0,19	68,50	80,09	2,62	3,32	0,60	1,56	3,30	2,29	13,60	4,71	–	0,01	10,88	7,84
3	0,50	0,23	69,20	74,16	2,67	4,21	1,10	2,15	3,30	2,95	13,90	5,95	–	0,01	9,33	10,34

В результате проведенной работы выполнен анализ материального баланса процесса обработки расплава методом дугового глубинного восстановления кремния. В ходе анализа получена хорошая сходимости расчетных и экспериментальных данных, что подтверждает правильность принятых в работе ограничений и допущений (расход футеровки и количеств

во шлака перед обработкой). Полученные данные будут использованы для описания механизма процесса восстановления кремния из песка методом ДГВ и разработки эффективной промышленной технологии.

Дальнейшие работы будут направлены на уточнение механизма дугового глубинного восстановления кремния из песка.

Библиографический список

1. *Официальный сайт ассоциации «Русская сталь» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.russtal.ru>.*
2. *Основные показатели работы черной металлургии России в 2020 г [Текст] / В. В. Катунин, Н. Г. Зиновьева, И. М. Иванова, Т. М. Петракова // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. — 2021. — Т. 77. — № 4. — С. 367–392.*
3. *Щедровицкий, Я. С. Высокремнистые ферросплавы [Текст] / Я. С. Щедровицкий. — Свердловск : Металлургиздат, 1961. — 256 с.*
4. *Емлин, Б. И. Справочник по электротермическим процессам [Текст] / Б. И. Емлин, М. И. Гасик. — М. : Металлургия, 1978. — 288 с.*
5. *Сычѳв, В. А. Электрические параметры ферросплавных электропечей мощностью 16,5–22,5 МВ·А [Текст] / В. А. Сычѳв, Г. Д. Чистяков // Производство ферросплавов: тематический отраслевой сборник. — М. : Металлургия, 1975. — № 4. — С. 108–112.*
6. *Дашевский, В. Я. Ферросплавы: теория и технология [Текст] / В. Я. Дашевский. — М. : Издательский дом МИСИС, 2014. — 362 с.*
7. *Проценко, М. Ю. Теоретическая и экспериментальная оценка баланса компонентов при обработке металла методом дугового глубинного восстановления [Текст] / М. Ю. Проценко, С. В. Куберский, С. Б. Эссельбах // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — Вып. 38. — С. 204–214.*
8. *Проценко, М. Ю. Разработка ресурсосберегающей технологии дугового глубинного восстановления марганца из шлака силикомарганца в железоуглеродистые расплавы [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.16.02 / Проценко Михаил Юрьевич ; ДонГТУ. — Лисичанск, 2017. — 191 с.*
9. *Использование метода дугового глубинного восстановления для извлечения кремния из песка в железоуглеродистые расплавы [Текст] / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, М. И. Воронько, И. А. Белан // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2019. — Вып. 57. — С. 37–45.*
10. *Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст] : монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 320 с.*

© Проценко М. Ю., Куберский С. В., Проценко В. И.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В., зам. нач. ЦЛК Филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» Тарасовым В. Н.

Статья поступила в редакцию 17.10.22.

PhD in Engineering Protsenko M. Yu., PhD in Engineering Kuberskiy S. V., Protsenko V. I.
(DonSTI, Alchevsk, LPR)

BURDEN BALANCE OF THE ARC DEPTH SILICON RECOVERY FROM SAND

The article analyses distribution of components between contacting phases at arc depth silicon recovery from sand, performs a comparative analysis of the calculated and experimental chemical composition of the final slag, and shows high convergence of theoretical and practical results.

Key words: arc depth recovery, burden balance, silicon, ore-reducing mixture, balance of processing, distribution of components, out-of-furnace melt processing.