

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ / METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3>**ШЛАКИ КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Научная статья

Немчинова Н.В.^{1,*}, Тютрин А.А.², Хоанг В.В.³, Жидков К.И.⁴¹ORCID : 0000-0001-9895-1709;²ORCID : 0000-0001-9983-2680;^{1,2,3,4} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ninavn[at]yandex.ru)

Аннотация

Кремний металлургических марок широко используется в различных отраслях промышленности: черной металлургии, производстве кремнийорганических соединений, солнечной энергетике и др. Получение кремния осуществляется в руднотермических печах (РТП) при плавке шихты из кварцита и углеродистого восстановителя. Извлечение целевого продукта невысокое (~ 70 %), что связано с потерями кремния с отходящими газами при плавке и со шлаками при окислительном рафинировании в ковше. Целью исследований явилось изучение химического состава образующихся в процессе плавки (печного) и рафинирования (рафинировочного) шлаков, причин потерь кремния с ними и поиск путей переработки кремнийсодержащих шлаков. Известно, что в процессе плавки образуется до 5 % печного шлака. Нами был изучен химический состав образцов печного шлака методом рентгеноспектрального анализа (РСМА). Установлено, что шлак состоит в основном из невосстановленных оксидов примесных элементов (Ca, Al), содержащихся в сырьевых материалах, карбида кремния (промежуточного продукта восстановления) и элементного кремния (с включениями силицидов железа), запутавшегося в шлаке из-за высокой его вязкости. Методами рентгенофазового, металлографического и РСМА были изучены образцы рафинировочного шлака, образующегося при окислительном рафинировании кремниевого расплава, выпускаемого из РТП. Установлено, что рафинировочные шлаки содержат элементный кремний до 70 %; потери кремния со шлаками снижает общее его извлечение в технологическом процессе. Таким образом, рафинировочные шлаки необходимо перерабатывать с целью доизвлечения Si. Показаны пути поиска способов переработки шлаков.

Ключевые слова: производство кремния, MG-Si, печной шлак, рафинирование кремния, рафинировочный шлак, переработка шлаков.

SILICON PRODUCTION SLAGS

Research article

Nemchinova N.V.^{1,*}, Tyutrin A.A.², Hoang V.V.³, Zhidkov K.I.⁴¹ORCID : 0000-0001-9895-1709;²ORCID : 0000-0001-9983-2680;^{1,2,3,4} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

* Corresponding author (ninavn[at]yandex.ru)

Abstract

Metallurgical brands of silicon are widely used in various industries: ferrous metallurgy, production of organosilicon compounds, solar energy, etc. Silicon is produced in ore-thermal furnaces by smelting a charge of quartzite and carbonaceous reducing agent. Extraction of the target product is low (~ 70%), which is associated with losses of silicon with the exhaust gases during smelting and with slag during oxidative refining in the ladle. The aim of the research was to study the chemical composition of the smelting (furnace) and refining (refining) slag, the causes of silicon losses with them and the search for recycling of silicon-containing slag. It is known that up to 5 % of furnace slag is formed in the process of melting. We studied the chemical composition of furnace slag samples by X-ray diffraction analysis (XRD). It was found that the slag consists mainly of unreduced oxides of impurity elements (Ca, Al) contained in the raw materials, silicon carbide (intermediate product of reduction) and elemental silicon (with iron silicide inclusions) entangled in the slag because of its high viscosity. X-ray phase, metallographic and EDX methods were used to study the samples of refining slag formed during oxidative refining of silicon melt produced from RTP. It was found that the refining slag contains elemental silicon up to 70 %; the loss of silicon with the slag reduces its total extraction in the technological process. Thus, it is necessary to recycle refining slags for the purpose of additional extraction of Si. The ways of searching for the ways of slag processing are presented.

Keywords: silicon production, MG-Si, furnace slag, silicon refining, refining slag, slag recycling.

Введение

Металлургическая промышленность является неотъемлемой частью развитых стран в мире, в том числе и России [1].

Кремний металлургических марок MG-Si (от англ. Metallurgical Grade Silicon) используется в качестве легирующей добавки для получения Al-Si сплавов, в химической промышленности для производства силиконов, также применяется в электронной промышленности и секторе производств изделий для солнечной энергетике (солнечные панели, кремниевые чипы, полупроводники). Кремний как основа различных материалов находит широкое

применение в других отраслях промышленности: строительство, компьютерная техника, производство кремнийорганических соединений и оптоволоконных изделий, в черной металлургии и др. [2], [3], [4], [5].

Мировые производственные мощности по выпуску кремния составляют ~ 2,4 млн. т в год и распределяются между основными странами (рис. 1) [5].

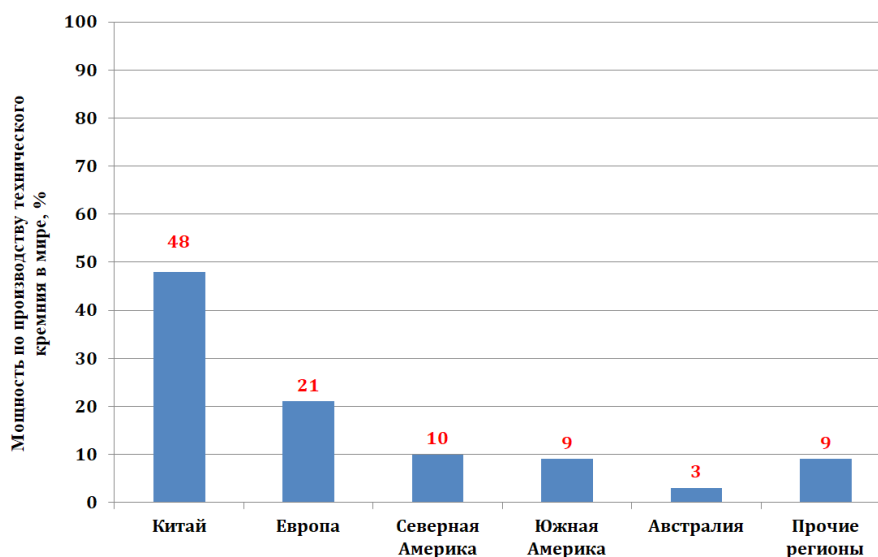


Рисунок 1 - Структура мощностей по производству MG-Si в мире

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.1>

В нашей стране крупнейшим производителем MG-Si является АО «Кремний» (г. Шелехов, Иркутская обл.), входящее в компанию РУСАЛ. Предприятие введено в эксплуатацию в 1981 г. и является единственным в России производителем высокочистых марок кремния – рафинированного кремния. Кремний производят карботермическим способом при плавке шихты при температуре 2000–2200 °С в трехфазных РТП [2], [4] из кварцита Черемшанского месторождения, являющегося основным рудным сырьем. В качестве углеродистого восстановителя используется смесь углеродных материалов (нефтекокс, каменный и древесный угли) для выплавки кремния по основной реакции:



Кроме кварцита и восстановителя в шихту также добавляется древесная щепа для разрыхления.

Извлечение кремния невысокое (~ 70 %): это связано с потерями ценного элемента с газами в виде монооксида кремния SiO – обязательного промежуточного продукта плавки при химических взаимодействиях кремнезема с углеродом в составе шихты для плавки [2], [7], а также с потерями элементного кремния в шлаке при окислительном рафинировании в ковше. Снижение потерь кремния со шлаком является актуальным как с экологической точки зрения, так и со стороны применения методов и технологий, направленных на ресурсосбережение производства кремния. Поэтому целью данных исследований является изучение количественного и фазового состава печного и рафинировочного шлаков кремниевое производства для дальнейшего поиска способа их переработки, основанных на доизвлечении кремния в виде сплава.

Образование печного шлака при плавке

В зависимости от вида используемой РТП (в АО «Кремний» установлены печи мощностью 16,5 и 25 МВ·А) в процессе плавки может образоваться до 5 % печного шлака. При высокой температуре в РТП при плавке шихты (свыше 1700 °С) образуются сложные оксидные соединения на основе CaO: анортит ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), геленит ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), метасиликат кальция ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), алит ($8\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) [8]. Наличие таких оксидов как Al_2O_3 и CaO в составе сложных тугоплавких силикатов говорит о незавершенности процесса восстановления кремнеземсодержащей шихты, содержащей примеси. Данные шлаки отличаются от обычных металлургических шлаков [9], [10]: обладают большей плотностью (2,84–2,9 г/см³ в зависимости от вида его шлакообразующих компонентов), чем у выплавляемого MG-Si (2,33 г/см³), и значительной вязкостью (3–5 Па·с) [11]. При нарушениях технологии ведения плавки в шлаках увеличивается содержание невосстановленного $\alpha\text{-SiO}_2$ -кристобалита и неразложившегося SiC (карбид кремния – обязательный промежуточный продукт процесса получения MG-Si [7]).

При отклонениях работы РТП шлак опускается на подину, в результате чего образуется сложная по химическому составу подовая настель с температурой плавления до 1600 °С. Степень кислотности печного шлака производства кремния составляет в среднем 2,8, поэтому данный продукт можно отнести к особо вязким - так называемым «длинным шлакам» [11].

В наших исследованиях химический состав образца печного шлака определялся с помощью электронно-зондового анализатора Superprobe JXA-8200 («Jeol Ltd.», Япония) (рис. 2, табл. 1). Микроанализатор укомплектован растровым электронным микроскопом высокого разрешения, энергодисперсионным спектрометром (EDS) с кремний-литиевым детектором (EX-84055MU) с разрешением 133 eV и пятью спектрометрами с волновой дисперсией. Фото изображений

исследуемых образцов в обратно рассеянных электронах (режим COMPO – контраст по атомному номеру) выполнены на растровом электронном микроскопе; химический состав фаз определен на EDS.

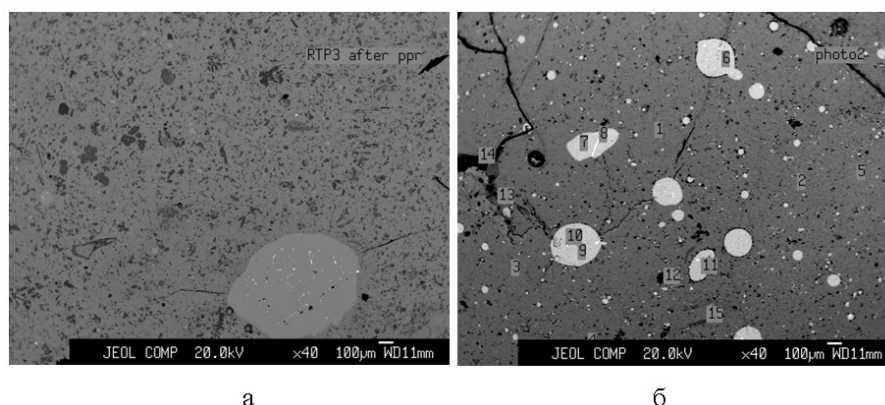


Рисунок 2 - Фото поверхности образца печного шлака (данные PCMA):
а – общий вид; б – фото поверхности в режиме COMPO
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.2>

Примечание: 1-15 – области; химический состав приведен в табл. 1

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, печные шлаки являются источником поступления в кремниевый расплав примесных элементов в виде кислородсодержащих соединений (сложных составных алюминатов и силикатов кальция типа анортита, см. области 1-5, 12-15 на рис. 2, состав которых, по результатам анализа PCMA, приведен в табл. 1). Кремний всегда запутывается в печном шлаке (см. области 6, 7 и 9, рис. 2, химический состав также приведен в табл. 1), что приводит к снижению его общего извлечения при плавке [12]. В исследуемых областях 8, 10, 11 (см. рис. 2 и табл.1, данные рентгеноспектрального микроанализа) зафиксированы силициды железа (с примесью титана) как составляющие интерметаллических включений в элементном кремнии.

Печной шлак при выливке кремния из РТП переходит в расплав и далее смешивается со шлаком, образующимся при окислительном рафинировании, применяемом в промышленных условиях в АО «Кремний».

Таблица 1 - Результаты PCMA образца печного шлака

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.3>

Области (см. рис. 2)	Содержание элемента, % масс.						Итого
	Si	O	Fe	Ca	Ti	Al	
1	26,676	44,191	-	18,619	-	10,514	100,000
2	27,419	43,799	-	18,552	-	10,230	100,000
3	26,507	44,585	-	18,508	-	10,400	100,000
4	43,433	36,039	-	12,719	-	7,809	100,000
5	30,708	42,792	-	16,455	-	10,045	100,000
6	100,000	-	-	-	-	-	100,000
7	100,000	-	-	-	-	-	100,000
8	50,709	-	42,918	-	6,373	-	100,000
9	100,000	-	-	-	-	-	100,000
10	50,791	-	41,799	-	7,410	-	100,000
11	75,962	-	15,171	-	8,867	-	100,000
12	53,066	26,830	-	12,695	-	7,409	100,000
13	24,830	49,240	-	15,655	-	10,275	100,000
14	25,684	46,867	-	16,770	-	10,679	100,000
15	22,075	45,532	-	14,255	-	18,138	100,000

Шлак окислительного рафинирования кремниевого расплава

Окислительное рафинирование расплава кремния после его выпуска из РТП проводят в рафинировочных ковшах (емкостью до 2,4 т MG-Si) при температуре 1570 °С продувкой воздухом и с использованием флюса – кварцевого

песка марки $2K_2O_3O3$ [13]. При этом примеси в кремнии (Ca, Al, SiC) и образовавшийся в процессе плавки печной шлак переходят в шлаковую фазу, которая далее отделяется от очищенного металла. Для более полного разделения кремния и шлака отстаивание может проходить до 3-х часов.

Данный вид рафинирования направлен на удаление в основном алюминия и кальция [4]. Железо, растворенное в кремнии, не поддается связыванию в шлак из-за высокого восстановительного потенциала системы и сдвига равновесия реакции (2) влево:

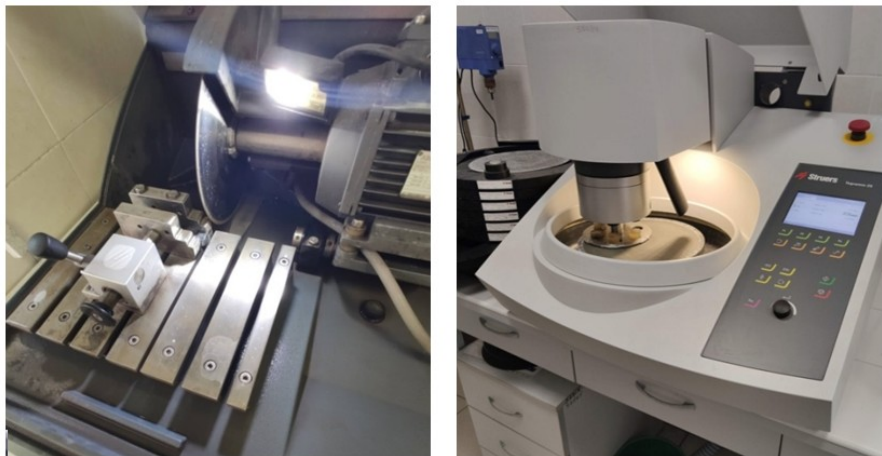


Поэтому необходимо жестко контролировать поступление в технологический процесс данного элемента с шихтовыми материалами (кварцитом, углеродистыми восстановителями).

Продуктом окислительного рафинирования является рафинировочный шлак. Кроме образующейся оксидной фазы, в нем фиксируется ценный кремний и всегда присутствует тугоплавкий карбид кремния (как продукт недвосстановления [2], [6]). Наличие элементного кремния в рафинировочных шлаках снижает общее извлечение кремния при плавке, снижая тем самым эффективность производства в целом.

Металлографическое изучение исследуемого объекта исследований проводилось на кафедре металлургии цветных металлов ИРНИТУ с помощью инвертированного металлографического микроскопа Olympus GX-51 (фирмы «Olympus», Япония) с предварительным шлифованием и полировкой поверхности [14].

Для изучения микроструктуры шлака образцов пробоподготовка к металлографическим исследованиям включала в себя получение среза от общего куска шлака с помощью отрезного станка Labotom-5 фирмы «Struers» (Дания), рис. 3, а.



а

б

Рисунок 3 - Подготовка образцов шлака к металлографическим исследованиям:
а – отрезной станок Labotom-5; б – шлифовально-полировальный станок Tegramin-25
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.4>

Далее обрезанные по требуемым размерам куски шлака для последующей шлифовки заливались акриловой смолой DuroCit, обладающей коротким временем затвердевания и незначительной усадкой. Шлифование и полировка образцов шлака осуществлялась на шлифовально-полировальном станке Tegramin-25 той же фирмы, рис. 3, б.

На рис. 4, а представлен общий вид подготовленных шлифов из образцов рафинировочных шлаков для металлографических исследований, на рис. 4, б – фото поверхности образца. Согласно рис. 4, б, в рафинировочном шлаке в общей оксидной фазе расположены корольки кремния, химический состав которых представлен в табл. 1. Включения металлического кремния имеет сферическую форму и предполагается, что кремний механически захватывается шлаком за счет высокой вязкости шлака. Снижение вязкости шлака позволит снизить потери кремния, но при этом есть риск, что более жидкотекучий шлак может затруднять разделение продуктов – кремния и шлака в рафинировочном ковше.

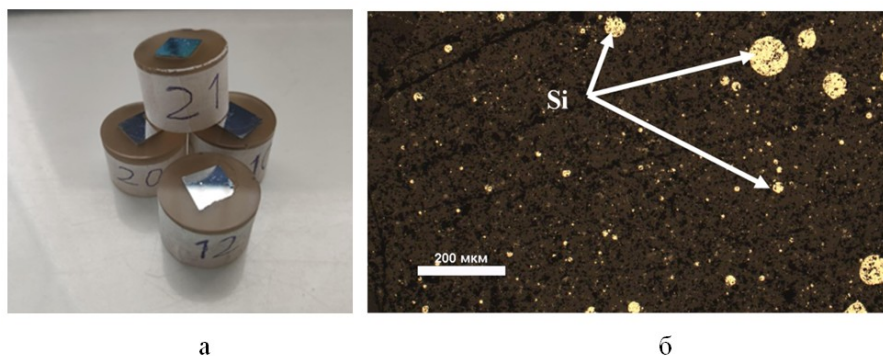


Рисунок 4 - Результаты металлографических исследований:
 а – общий вид шлифов образцов шлака; б – фото поверхности образца
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.5>

Примечание: увеличение $\times 50$

Рентгенофазовый анализ пробы рафинировочного шлака был проведен в Центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (г. Иркутск) на рентгеновском дифрактометре ДРОН–3.0 (Россия). Условия съемки: излучение – Cu-K α , Ni – фильтр, V= 25 кВ, I = 20 мА, шаг сканирования – 0,05°, угловой диапазон: 3 – 75°2 θ . Фазовый состав проб расшифрован с помощью программы поиска фаз (Diffrac^{plus}, PDF–2, 2007 г). Как видно из данных рис. 5, в шлаке содержатся кремний (70 % \pm 5), графит (10 % \pm 5), кристобалит (10 % \pm 5), диалюминат кальция, следы карборунда.

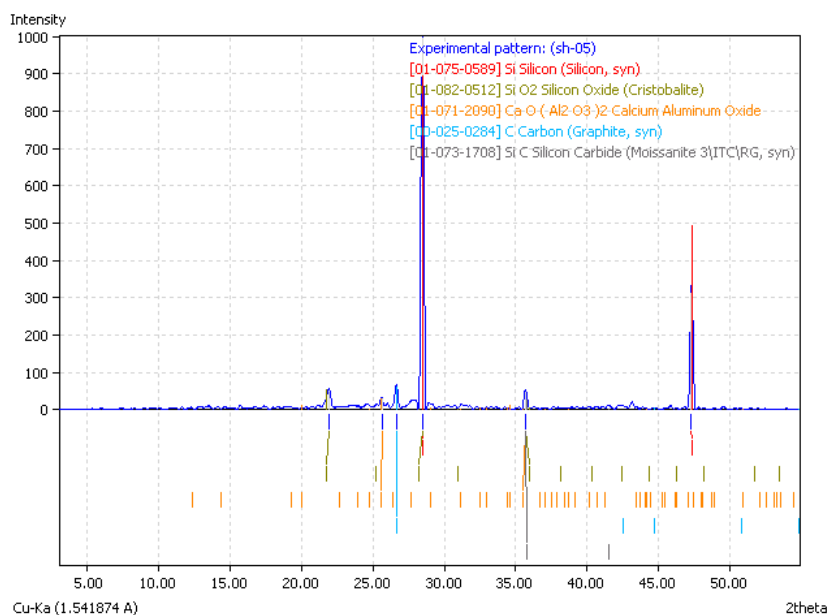


Рисунок 5 - Дифрактограмма образца рафинировочного шлака
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.6>

На рис. 6-7 и в табл. 2 приведены результаты РСМА образца рафинировочного шлака.

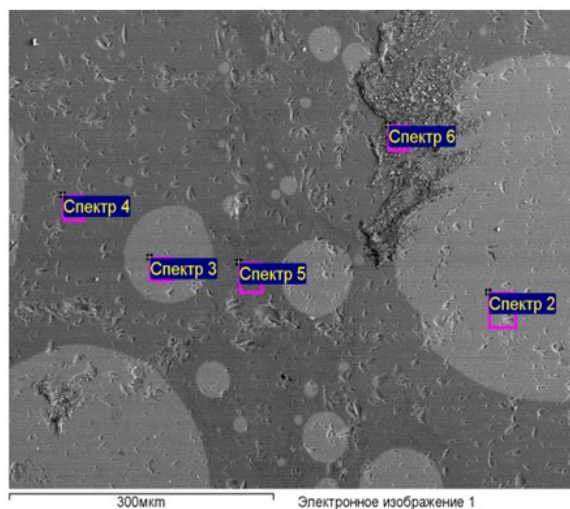


Рисунок 6 - РСМА образца рафинировочного шлака, фото поверхности
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.7>

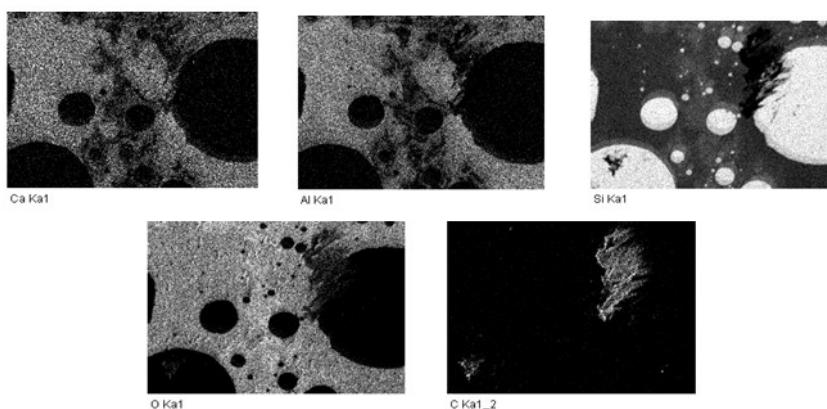


Рисунок 7 - РСМА образца рафинировочного шлака, спектры элементов
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.8>

Согласно данным РСМА, шлак – многокомпонентная система, состоящая из металлического кремния (области 2, 3), силикатных фаз (области 4–6), химический состав данных областей приведен в табл. 2. Область 6 представлена алюмосиликатом кальция с напылением углерода. Это отчетливо видно на спектрах элементов (см. рис. 7). Также следует отметить повышенное содержание углерода и в других областях исследуемой поверхности образца рафинировочного шлака ввиду применения напыления его углеродом (для электропроводимости при проведении РСМА).

Таблица 2 - Результаты РСМА образца рафинировочного шлака

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.9>

Области (см. рис. 6)	Содержание элемента, % масс.					Итого
	C	O	Al	Si	Ca	
2	15,38	5,63	-	84,62	-	100,00
3	10,37	-	-	89,63	-	100,00
4	13,46	62,10	5,05	16,12	3,27	100,00
5	12,29	64,72	1,41	20,61	0,97	100,00
6	58,24	35,33	0,61	2,72	3,10	100,00

Поиск способа переработки шлаков кремниевого производства

В связи с тем, что шлак содержит элементный кремний, данный продукт окислительного рафинирования представляет интерес для доизвлечения кремния. Существует несколько направлений переработки шлаков

кремниевого производства [15], основные из них направлены на доизвлечение кремния путем сортировки, отстаивания, переплавки, либо выделения из шлака в виде сплава с другими элементами (например, железом).

Нами разрабатывается способ извлечения кремния из шлака в виде сплава. Для этого ведутся работы по подбору флюсов с целью снижения вязкости шлака и температуры плавки шлакосодержащей шихты для увеличения извлечения кремния в сплав. Также для определения оптимальных параметров плавки применяется математическая обработка результатов экспериментов.

Заключение

Кремний металлургических марок находит широкое применение в различных отраслях промышленности. Получение MG-Si характеризуется невысоким его извлечением (~70 %) из-за потерь кремния с отходящими газами в виде газообразного монооксида кремния и потерь уже выплавленного металла со шлаком при окислительном рафинировании в ковше.

Показано, что при плавке может образоваться до 5 % печного шлака (тугоплавкой смеси силикатов кальция и алюминия с вкраплениями карборунда и корольками запутавшегося кремния). Печной шлак при выливке из печи переходит в расплав и по окончании процесса рафинирования – в рафинировочный шлак. По результатам проведенных исследований выявлено, что в данном продукте содержится кремний в виде металлических включений, а также в форме оксида и карбида; кроме этого, в шлаке присутствуют оксиды алюминия и кальция (как продукты окислительного рафинирования). Высокое содержание кремния в рафинировочном шлаке (по данным проведенных аналитических исследований - до 70 %) приводит к еще большему снижению извлечения кремния в технологическом процессе, снижая эффективность кремниевого производства в целом. Нахождение в шлаке ценного Si в элементном виде позволяет сделать вывод о возможности его выделения из шлака, например, в виде сплава с другим металлом.

Полученные аналитические данные о составе шлака кремниевого производства имеют практическую ценность при оценке и разработке эффективной технологии переработки шлака. Таким образом, рафинировочный шлак является ценным техногенным сырьем для доизвлечения кремния. Нами ведутся экспериментальные работы по переработке рафинировочного шлака с выделением кремния из него в виде сплава.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.10>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3.10>

Список литературы / References

1. Сизяков В.М. Стратегические задачи металлургического комплекса России. / В.М. Сизяков, А.А. Власов, В.Ю. Бажин // Цветные металлы. – 2016. – № 1. – с. 32-37. – DOI: 10.17580/tsm.2016.01.05
2. Гасик М.И. Электротермия кремния / М.И. Гасик, М.М. Гасик – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. – 487 с.
3. Schei A. Production of High Silicon Alloys / A. Schei, J.Kr. Tuset, H. Tveit – Trondheim: Tapir, 1998. – 363 p.
4. Попов С.И. Металлургия кремния в трехфазных руднотермических печах / С.И. Попов – Иркутск: ЗАО «Кремний», 2004. – 237 с.
5. Рожихина И.Д. Ферросплавное производство: состояние и тенденции развития в мире и России. / И.Д. Рожихина, О.И. Нохрина, К.С. Ёлкин и др. // Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия – 2019 : труды XXI Междунар. науч.-практ. конф. 23-24 ноября 2019 г., Новокузнецк. ; под ред. Юрьев А.Б. – Вып. 1. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2019. – с. 20-32.
6. Belskii S.S. Thermodynamic Model of Silicon Smelting in Ore-Smelting Furnaces. / S.S. Belskii, N.V. Nemchinova // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 989. – p. 504-510. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.504
7. Ringdalen E. Reaction mechanisms in carbothermic production of silicon, study of selected reactions. / E. Ringdalen, M. Tangstad // The Minerals, Metals & Materials Society; edited by Jerome P. Downey, Thomas P. Battle, Jesse F. White – Orlando: Wiley, 2012. – p. 195-203. doi: 10.1002/9781118364765.ch24
8. Немчинова Н.В. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевого производства. / Н.В. Немчинова, Т.А. Бузикова // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2017. – №. 1. – с. 31-39. – DOI: 10.17073/0021-3438-2017-1-31-39
9. Gasik M. Handbook of ferroalloys: theory and technology / M. Gasik – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. – 536 p. doi: 10.1016/C2011-0-04204-7
10. Saevarsdottir G. Ferrosilicon smelting Current Distribution In Submerged Arc Furnances For Silicon Metal. / G. Saevarsdottir, J.A. Bakken // INFACON XII: Proceedings of the Twelfth International Ferroalloys Congress, 6–9 June 2010, Helsinki. ; edited by Asmo Vartiainen – Helsinki: Outotec Oyj, 2010. – p. 717-728.
11. Зобнин Н.Н. Влияние операционных аспектов процесса восстановления оксида кремния на соотношение материального и теплового потоков в рудно-термической печи. / Н.Н. Зобнин, С.О. Байсанов, А.С. Байсанов и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – № 24(1). – с. 444-459. – DOI: 10.21285/1814-3520-2020-2-444-459
12. Немчинова Н.В. Поведение примесных элементов при производстве и рафинировании кремния / Н.В. Немчинова – М.: Академия естествознания, 2008. – 237 с.

13. Немчинова Н.В. Исследование химического состава металлургического кремния. / Н.В. Немчинова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2012. – № 1(2). – с. 129-134.
14. ГОСТ 2138–91. Пески формовочные. Общие технические условия. – Введ. 1993-01-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 5 с.
15. Хоанг В.В. Обзор методов переработки шлаков кремниевого производства. / В.В. Хоанг, А.А. Тютрин, Н.В. Евсеев // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2022. – № 12(1). – с. 35-40.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sizyakov V.M. Strategicheskie zadachi metallurgicheskogo kompleksa Rossii [Strategy tasks of the russian metallurgical complex]. / V.M. Sizyakov, A.A. Vlasov, V.Yu. Bazhin // *Czvetny'e metally* [Tsvetnye metally]. – 2016. – № 1. – p. 32-37. – DOI: 10.17580/tsm.2016.01.05 [in Russian]
2. Gasik M.I. E'lektrotermiya kremniya [Electrothermics of Silicon] / M.I. Gasik, M.M. Gasik – Dnepropetrovsk: Nacional'naya metallurgicheskaya akademiya Ukrainy', 2011. – 487 p. [in Russian]
3. Schei A. Production of High Silicon Alloys / A. Schei, J.Kr. Tuset, H. Tveit – Trondheim: Tapir, 1998. – 363 p.
4. Popov S.I. Metallurgiya kremniya v trexfazny'x rudnotermicheskix pechax [Metallurgy of silicon in three-phase ore-thermal furnaces] / S.I. Popov – Irkutsk: ZAO «Kremnij», 2004. – 237 p. [in Russian]
5. Rozhixina I.D. Ferrosplavnoe proizvodstvo: sostoyanie i tendencii razvitiya v mire i Rossii [Ferroalloy production: the state and trends of development in the world and Russia]. / I.D. Rozhixina, O.I. Noxrina, K.S. Yolkin et al. // *Metallurgy: technologies, innovations, quality. Metallurgy – 2019 : Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conf.ce 23-24 November 2019*; edited by Yur'ev A.B. – Issue 1. – Novokuznetsk: Izd. centr SibGIU, 2019. – p. 20-32. [in Russian]
6. Belskii S.S. Thermodynamic Model of Silicon Smelting in Ore-Smelting Furnaces. / S.S. Belskii, N.V. Nemchinova // *Materials Science Forum.* – 2020. – Vol. 989. – p. 504-510. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.504
7. Ringdalen E. Reaction mechanisms in carbothermic production of silicon, study of selected reactions. / E. Ringdalen, M. Tangstad // *The Minerals, Metals & Materials Society*; edited by Jerome P. Downey, Thomas P. Battle, Jesse F. White – Orlando: Wiley, 2012. – p. 195-203. doi: 10.1002/9781118364765.ch24
8. Nemchinova N.V. Issledovanie fazovo-ximicheskogo sostava pechny'x shlakov kremnievogo proizvodstva [Study of the phase-and-chemical composition of silicon production furnace slags]. / N.V. Nemchinova, T.A. Buzikova // *Izvestiya vuzov. Czvetnaya metallurgiya [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy]*. – 2017. – № 1. – p. 31-39. – DOI: 10.17073/0021-3438-2017-1-31-39 [in Russian]
9. Gasik M. Handbook of ferroalloys: theory and technology / M. Gasik – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. – 536 p. doi: 10.1016/C2011-0-04204-7
10. Saevarsdottir G. Ferrosilicon smelting Current Distribution In Submerged Arc Furnances For Silicon Metal. / G. Saevarsdottir, J.A. Bakken // *INFACON XII: Proceedings of the Twelfth International Ferroalloys Congress, 6–9 June 2010, Helsinki.* ; edited by Asmo Vartiainen – Helsinki: Outotec Oyj, 2010. – p. 717-728.
11. Zobnin N.N. Vliyanie operacionny'x aspektov processa vosstanovleniya oksida kremniya na sootnoshenie material'nogo i teplovogo potokov v rudno-termicheskoy pechi [Effect of silicon oxide reduction operational aspects on material and heat flow ratio in ore-thermal furnace]. / N.N. Zobnin, S.O. Bajsanov, A.S. Bajsanov et al. // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*. – 2020. – № 24(1). – p. 444-459. – DOI: 10.21285/1814-3520-2020-2-444-459 [in Russian]
12. Nemchinova N.V. Povedenie primesny'x e'lementov pri proizvodstve i rafinirovanii kremniya [The behavior of impurity elements in the production and refining of silicon] / N.V. Nemchinova – М.: Akademiya estestvoznaniya, 2008. – 237 p. [in Russian]
13. Nemchinova N.V. Issledovanie ximicheskogo sostava metallurgicheskogo kremniya [Investigation of metallurgical silicon chemical composition]. / N.V. Nemchinova // *Izvestiya vuzov. Prikladnaya ximiya i biotexnologiya [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]*. – 2012. – № 1(2). – p. 129-134. [in Russian]
14. ГОСТ 2138–91. Пески формовочные. Общие технические условия [Molding sands. General technical conditions]. – Introduced 1993-01-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 5 p. [in Russian]
15. Xoang V.V. Obzor metodov pererabotki shlakov kremnievogo proizvodstva [Review of methods for processing slags of silicon production]. / V.V. Xoang, A.A. Tyutrin, N.V. Evseev // *Molodezhny'j vestnik IrGTU [Youth Bulletin of ISTU]*. – 2022. – № 12(1). – p. 35-40. [in Russian]