

Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевого производства для поиска путей их рациональной переработки

© Н.В. Немчинова, В.В. Хоанг, И.И. Апончук

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – провести аналитические исследования химического состава рафинировочного шлака кремниевого производства для выбора путей его дальнейшей переработки. Объектом исследований явились образцы шлака после окислительного рафинирования с АО «Кремний» компании «РУСАЛ» (г. Шелехов Иркутской обл., Россия). Исследования химического состава образцов шлака проводили рентгенофазовым, рентгенофлуоресцентным, металлографическим методами исследования, а также методом сканирующей электронной микроскопии. В результате проведенных аналитических исследований было установлено, что основные составляющие рафинировочного шлака в основном представлены элементарным кремнием, его карбидом и оксидом. Также присутствует углерод в элементарном виде. Показано, что карбид кремния является продуктом недовосстановления карботермического процесса в руднотермической печи. По данным рентгенофлуоресцентного анализа в образце шлака кроме кремния содержатся, % масс.: Ca – 7,40; Al – 3,80; Fe – 0,30; Ba – 0,19; K – 0,14; Na – 0,09; Sr – 0,09; Mg – 0,08; Ti – 0,05; S – 0,02. Кальций и алюминий присутствуют в шлаке в основном в виде оксидов, также фиксируются сложные оксиды типа анортита: $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. В незначительном количестве присутствуют оксиды других металлов, переходящие в рафинировочный шлак в составе печного шлака, образующегося при плавке кремнеземсодержащего сырья. Шлаки окислительного рафинирования производства кристаллического кремния являются техногенным сырьем, содержащим ценные компоненты. Ввиду значительного содержания в рафинировочном шлаке кремния (от 42% до 65%) проведен анализ основных способов переработки данного техногенного сырья для доизвлечения кремния или получения товарных кремнийсодержащих продуктов, востребованных в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: производство кремния, рафинирование кремния, шлак, примеси, металлография

Для цитирования: Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Апончук И.И. Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевого производства для поиска путей их рациональной переработки. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 252–263. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-252-263>

Research into the chemical composition of refinery slag from silicon production for its efficient recycling

Nina V. Nemchinova, Vien V. Hoang, Irina I. Aponchuk

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim was to investigate the chemical composition of refinery slag obtained during silicon production in order to identify approaches to its further recycling. Research samples were collected from the slag remained after oxidation refining at the JSC Silicon (AO Kremny), RUSAL (Shelekhov, Irkutsk Oblast). The methods of X-ray phase, X-ray fluorescence, metallographic and scanning electron microscopy were employed to investigate the chemical composition of the samples. It was found that the refinery slag under study includes such basic components as elemental silicon, its carbide and oxide, as well as elemental carbon. It was shown that silicon carbide is the product of incomplete reduction, resulting from melting silica-containing ores in a smelting furnace. According to the conducted X-ray fluorescent analysis, the samples also contain (wt %): Ca – 7.40; Al – 3.80; Fe – 0.30; Ba – 0.19; K – 0.14; Na – 0.09; Sr – 0.09; Mg – 0.08; Ti – 0.05; S – 0.02. Calcium and aluminium are present in the slag mostly in the form of oxides. Complex oxides of an anorthite type were also found: $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. The refinery slag under study also features insignificant amounts of other metal oxides, which are released from the furnace slag forming during the smelting process. The slag produced by oxidation refining during crystalline silicon production is a technogenic raw material containing valuable components. Due to the significant content of silicon in the refinery slag (from 42% to 65%), the existing methods applied to recycle such an

industrial material were analysed in terms of additional silicon extraction or production of commercial silicon-containing products, which are in demand in various industries.

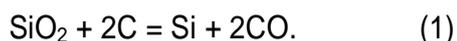
Keywords: silicon production, silicon refining, slag, impurities, metallography

For citation: Nemchinova NV, Hoang VV, Aponchuk II. Research into the chemical composition of refinery slag from silicon production for its efficient recycling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):252–263. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-252-263>

ВВЕДЕНИЕ

Металлургическая отрасль является неотъемлемой частью развитых мировых стран, в том числе и России [1, 2]. Metallургический кремний ($Si_{мет}$) широко используется как раскислитель при производстве чугуна, в качестве модификатора свойств различных сплавов и легирующего элемента в них, сырья для получения поликристаллического кремния, кремнийорганических материалов и силанов [3–7]. Производство $Si_{мет}$ развивается за счет расширения сырьевой базы путем вовлечения в производство новых видов рудного и техногенного сырья, совершенствования оборудования и технологических процессов [8–14]. Годовой объем производства металлургического кремния достигает ≈ 1 млн т, Китай является крупнейшим производителем. Норвежская компания «Elkem» по объемам производства кремния занимает 2 место. В России единственным производителем кремния для различных отраслей потребления является АО «Кремний» ОК «РУСАЛ» (г. Шелехов, Иркутская обл.).

$Si_{мет}$ в АО «Кремний» получают при высоких температурах (свыше $2000^{\circ}C$) в рудно-термических печах (РТП) из кремнеземсодержащего сырья восстановлением углеродом по основной реакции [4, 8, 15, 16]:



Шихтой для получения кремния служит кварцит Черемшанского месторождения, являющегося рудной базой предприятия, и смесь углеродистых восстановителей (УВ): древесный уголь, нефтяной кокс, каменный уголь различных производителей. Получение

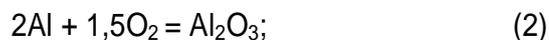
кремния происходит через стадии образования карборунда и газообразного монооксида кремния [3, 4, 7, 15]. Многостадийность процесса обуславливает неполноту протекания химических реакций, что вызывает недовосстановление кремния из карборунда и металлов из их оксидов из золы УВ и примесей кварцита.

Производство кремния относится к бесшлаковым в отличие от аналогичных процессов производства ферросплавов [3, 17], однако в процессе плавки кремнеземсодержащей шихты в мощных РТП образуется до 5%, а в печах малой и средней мощности – 2–3%. Образование шлака, в котором всегда присутствует кремний, снижает общее извлечение целевого продукта в карботермическом процессе: в среднем, соответственно, на 2,2 и 1,2%, в зависимости от мощности печи [3, 4].

Для получения товарного продукта, удовлетворяющего требованиям потребителей, выплавляемый кремний должен содержать минимальное количество примесей (Fe, Ca, Al, Ti и др.). Для этого на АО «Кремний» используется окислительное рафинирование кремния.

После выпуска кремния из печи проводится его рафинирование в ковше продувкой воздухом или кислородом с добавкой флюса (кварцевого песка, согласно ГОСТ 22551-77¹, марки ОСВ-020-В), рис. 1.

Основные реакции, описывающие процесс рафинирования выплавляемого кремния, следующие:



¹ГОСТ 22551-77. Песок кварцевый, молотые песчаник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности. Технические условия (с изм.). Введ. 01.01.1979. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997.



Реакция (8) способствует наличию аморфной кремнеземсодержащей фазы в шлаках.

Однако реакции (2)–(8) отражают лишь общую суть окисления расплавленного кремния [3, 4]. Анализ же литературных данных показывает, что процесс окисления примесей кремния кислородом образует рафинировочный шлак, имеющий в своем составе CaO, Al₂O₃, SiO₂ и кремния с включениями SiC и корольками кремния. Также в шлак полностью переходит печной шлак, представляющий собой продукт из невосстановленных оксидов и неразложившегося карборунда [18, 19]. Ввиду близости плотности рафинировочного шлака к плотности кремния затрудняется отделение кремниевой фазы от шлака, что приводит к потерям кремния.

Данный промышленный способ требует малых эксплуатационных затрат и позволяет

удалить из кремния алюминий, кальций, титан, фосфор при использовании незначительного количества флюсов. Карбид кремния (как продукт недовосстановления в процессе плавки) переходит в рафинировочный шлак при отстаивании.

Исследования химического состава образцов проводили рентгенофазовым, рентгенофлуоресцентным (РФА), металлографическим методами исследования, а также методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), относящиеся к современным методам изучения характеристик сырья и продуктов кремниевого производства [18].

ИЗУЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШЛАКОВ КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Объектами исследований явились образцы рафинировочных шлаков АО «Кремний». Плотные материалы, к которым относится рафинировочный шлак (рис. 2), для аналитических исследований (рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный анализы) должны быть измельчены в дробильном устройстве с дальнейшим доизмельчением до получения материала с диаметром зерен меньше 50 мкм. Для исследований микроструктуры и поверхности образцов электронно-микроскопическим и металлографическим методами анализа необходима подготовка шлифов со шлифованием и полированием.

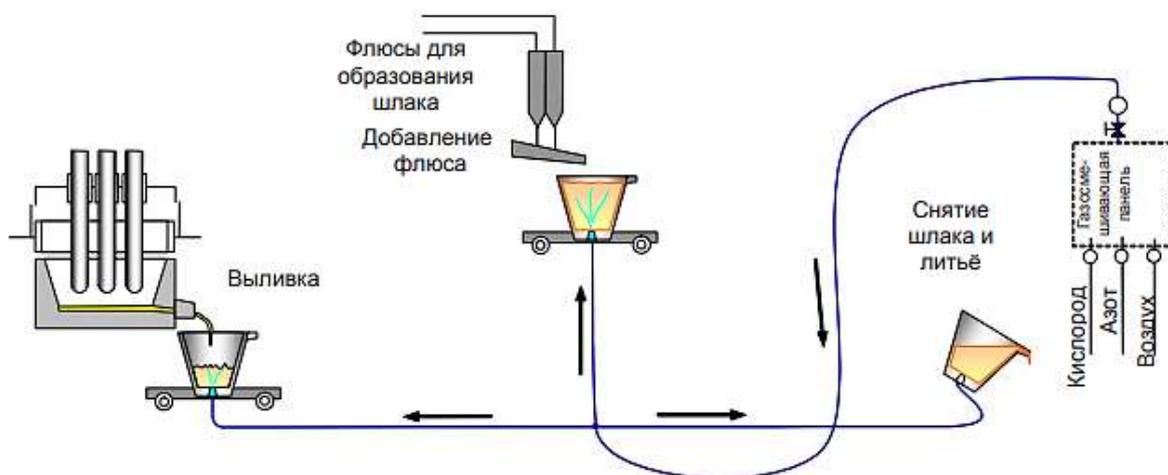


Рис. 1. Окислительное рафинирование металлургического кремния в АО «Кремний»
Fig. 1. Oxidizing refining of metallurgical silicon at Silicon JSC



Рис. 2. Рафинировочный шлак кремниевого производства в АО «Кремний»: а – общий вид;
 б – фото измельченного образца шлака (сканирующая электронная микроскопия, увеличение x100)
 Fig. 2. Refinery slag of silicon production at Silicon JSC: a – general view;
 b – image of a crushed slag sample (scanning electron microscopy, 100x magnification)

Для проведения РФА, СЭМ и рентгенофазового анализа образцы шлаков подвергали дроблению в лабораторной щековой дробилке ШД 10 м («Вибротехник», Россия). Затем раздробленный на куски материал перемешивали и подвергали повторному измельчению. Далее истирали до порошкообразного состояния в агатовой ступке для получения пригодных для анализа проб. Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе JIB-Z4500 («JEOL», Япония), см. рис. 2 б.

Рентгенофазовый анализ образцов шлака. Согласно данным химического и рентгенофазового анализа, выполненного на дифрактометре «ДРОН-7» (Россия) в АО «Кремний», основными компонентами шлака являются (табл. 1) карбид и оксид кремния, аморфный кремнезем, включения углерода и

кремния, а также сложные оксиды как продукты недовосстановления карботермического процесса (в частности, анортит [19]).

Рентгенофазовый анализ исследуемых образцов рафинировочного шлака был выполнен с помощью рентгеновского дифрактометра XRD-7000 («Shimadzu», Япония) с вертикальным θ - θ гониометром. Съемка проводилась с использованием Cu_α -излучения в пошаговом режиме в диапазоне углов 2θ от 3 до 80° . Для идентификации фаз исследуемых образцов использовалась база порошковых дифрактограмм PDF-2. Проведенный анализ пробы шлака также подтвердил наличие основных соединений в продукте рафинирования: Si, SiC, 2 вида SiO_2 (низкотемпературный кристобалит и низкотемпературный кварц), рис. 3.

Таблица 1. Фазовый состав кремниевого шлака (данные АО «Кремний»)
 Table 1. Phase composition of silicon slag (data of Silicon JSC)

Компонент	Состав шлака, % масс.		
	РТП-6	РТП 1,2 (средние значения)	РТП-3,4 (средние значения)
Si	44,1	65,3	42,1
SiC	3,3	3,1	12,1
C	–	1,1	0,9
SiO_2 (кварцит)	2,9	1,9	–
SiO_2 (кристобалит)	2,2	4,6	2,6
$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (анортит)	26	–	–
SiO_2 (аморфная фаза)	21,5	24	42,3

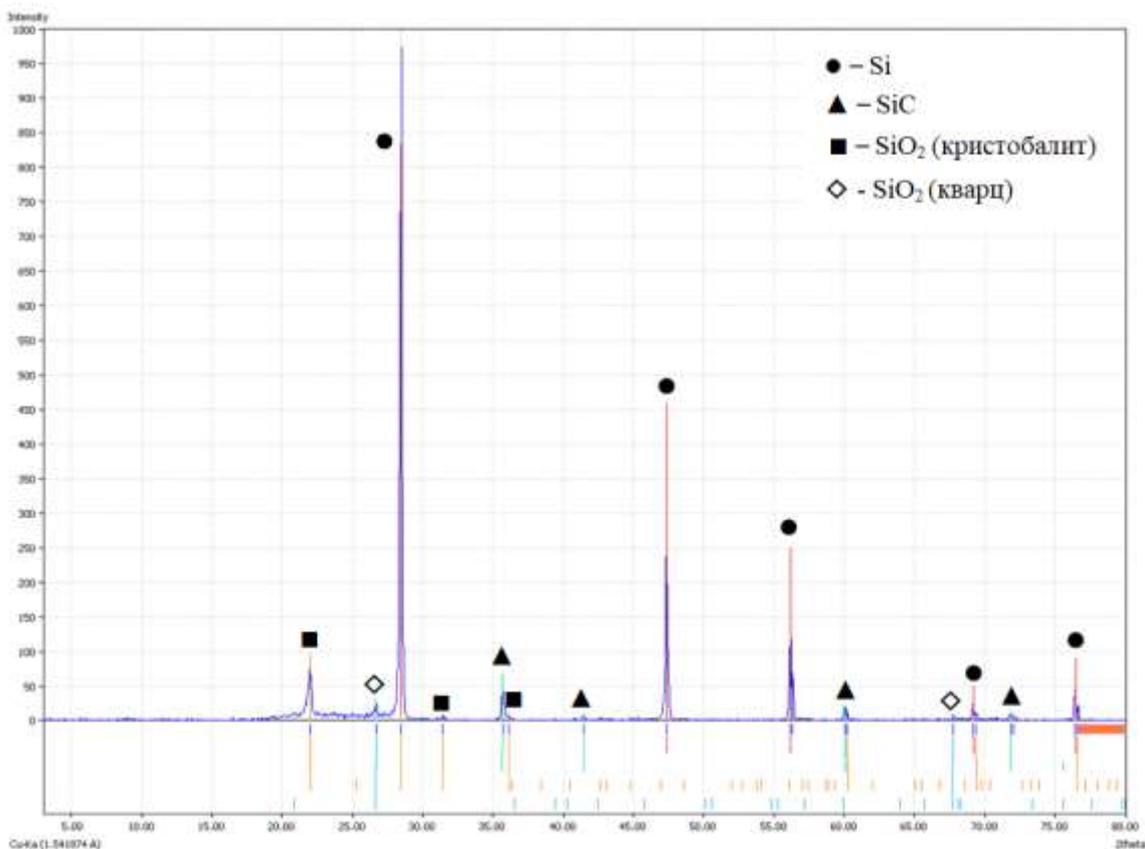


Рис. 3. Дифрактограмма образца рафинировочного шлака
Fig. 3. Diffraction pattern of a refinery slag sample

Рентгенофлуоресцентный анализ пробы рафинировочного шлака. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ образцов шлака выполняли с помощью спектрометра марки S4 Pioneer («Bruker AXS», Германия). Согласно данным РФА, шлак содержит помимо элементного кремния другие элементы, % масс.: Ca – 7,40; Al – 3,80; Fe – 0,30; Ba – 0,19; K – 0,14; Na – 0,09; Sr – 0,09; Mg – 0,08; Ti – 0,05; S – 0,02. Поскольку шлак содержит кремний, то железо, по нашему мнению, входит в состав интерметаллических соединений – силицидов (чаще всего с примесью титана), всегда присутствующих в выплавляемом кремнии [20]. Присутствие серы можно объяснить наличием частиц углерода в шлаках (табл. 2), в состав которого входит данный элемент [21].

Металлографический анализ шлифов шлака. Металлографическое изучение исследуемого объекта исследований проводили с помощью инвертированного металлографического микроскопа «Olympus GX-51»

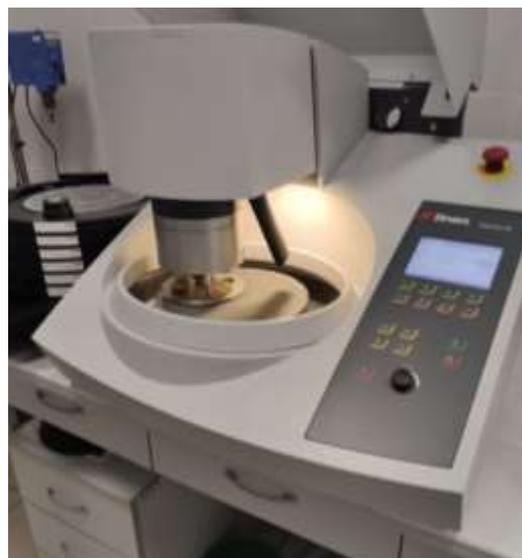
(«Olympus», Япония), оснащенного цифровой камерой Altra20. Металлографический метод исследований требует высококачественной (специальной) подготовки образца для исследований: резка образцов, запрессовка проб для подготовки образцов к шлифовке, шлифование и полировка.

Для изучения микроструктуры шлака образцов пробоподготовка к металлографическим исследованиям включала в себя получение срезов от общего куска шлака с помощью отрезного станка «Labotom-15» фирмы «Struers» (Дания), рис. 4 а. 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 осуществлялись на шлифовально-полировальном станке «Tegramin-25» («Struers», Дания), рис. 4 б.



a



b

Рис. 4. Подготовки образцов к металлографическим исследованиям: а – отрезной станок Labotom-5; б – шлифовально-полировальный станок Tegramin-25
Fig. 4. Sample preparation for metallographic studies: a – Labotom-5 cut-off machine; b – Tegramin-25 grinding and polishing machine

На вращающуюся платформу с магнитной подложкой прикрепляется шлифовальный диск. После установки платы вращателя образцов в правильное положение над пробоподготовительной поверхностью соединение вращателя образцов фиксируется. В «Tegramin» встроена база данных с 200 методами подготовки образцов.

В наших исследованиях (см. табл. 2) были использованы 3 режима работы с различными лубрикантами: Piano 220 – вода; Largo – DiaPro All/Lar (9 мкм); Mol – DiaDuo-2 (3 мкм). Использование DiaDuo-2 (алмазной суспензии с лубрикантом) позволяет максимально сократить расход используемых дорогостоящих алмазосодержащих продуктов, а также оптимально подходит для дозирования вручную и обеспечивает при этом идеальную поверхность микрошлифа. Обработка образцов проводилась различными дисками с последующей полировкой алмазными суспензиями различной крупности (9 мкм, 3 мкм, см. табл. 2).

На рис. 5 приведены фото участков трех образцов шлака.

Обработка изображений трех образцов шлака проводилась в программе «SIAMS Photolab», широко используемой для изуче-

ния различных металлсодержащих материалов [22, 23].

На рис. 6, 7 приведены примеры обработки в программе результатов изображения участка поверхности образца кремниевого шлака № 1: размеры зерен кремния и его содержание в образце, соответственно.

Результаты обработки изображения образцов кремниевого шлака представлены в табл. 3.

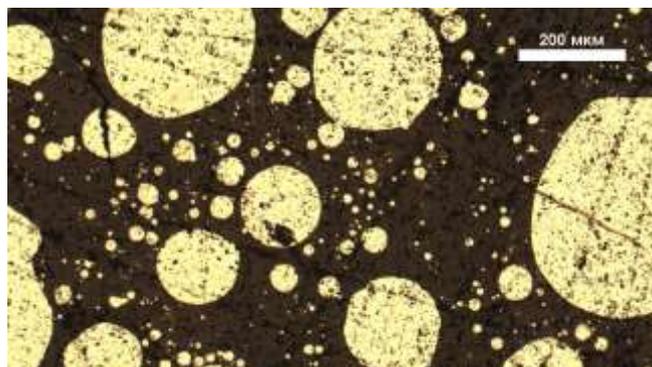
Как видно из представленных в табл. 3 результатов, образцы шлаков отличаются по количеству частиц различного размера. Доля кремния в образце шлака № 1 составляет 41,7% и, как видно из представленных в табл. 3 результатов, образцы шлаков различаются по количеству частиц различного размера. Доля кремния в образце шлака № 1 составляет 41,7% и он представлен более крупными включениями до 370,34 мкм. Образцы шлаков № 2 и № 3 содержат меньшее количество включений кремния диаметром до 107,09 мкм и 98,43 мкм, соответственно. Среднеквадратичное отклонение размеров частиц образцов шлаков № 2 и № 3 составляет 15 мкм, что свидетельствует о более однородной структуре этих образцов по распределению частиц в пробе.

Таблица 2. Условия выравнивания, шлифования и полирования
Table 2. Conditions for flattening, grinding and polishing

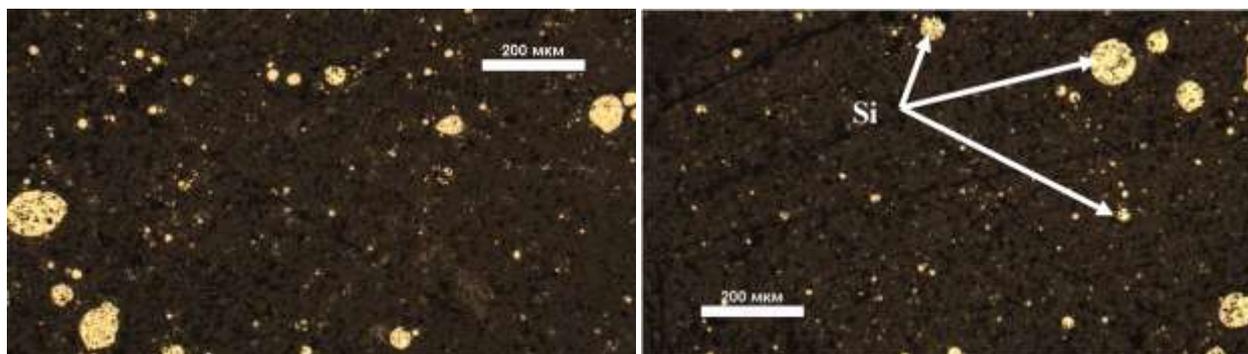
Поверхность	Лубрикант	Время, мин	Усилие, Н	Скорость, об/мин
Piano 220	Вода	90	40	300
Largo	DiaPro All/Lar	180	40	150
Mol	DiaDuo-2	150	45	150

Таблица 3. Значения размеров зерен и доли кремния в образцах шлака
Table 3. Values of grain sizes and silicon proportion in slag samples

Наименование показателя	Вид образца		
	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Число частиц	223	112	114
Минимальное значение, мкм	6,38	6,38	6,38
Максимальное значение, мкм	370,34	107,09	98,43
Среднее значение, мкм	25,22	15,09	14,52
Среднеквадратичное отклонение, мкм	44,40	15,17	15,14
Медиана, мкм	11,57	10,25	9,76
Диапазон, мкм	9,00	5,65	4,68
Доля, %	41,7	3,9	3,6
Удельная поверхность, 1/мкм	0,028	0,007	0,007
Средняя хорда, мкм	59,3	21,3	19,8
Межчастичное расстояние, мкм	82,9	521,3	532,2



a



b

c

Рис. 5. Фото образцов кремниевого шлака (металлографическое исследование) при увеличении $\times 50$: а – образец 1; б – образец 2; с – образец 3

Fig. 5. images of silicon slag samples (metallographic study) at 50x magnification: a – sample 1; b – sample 2; c – sample 3

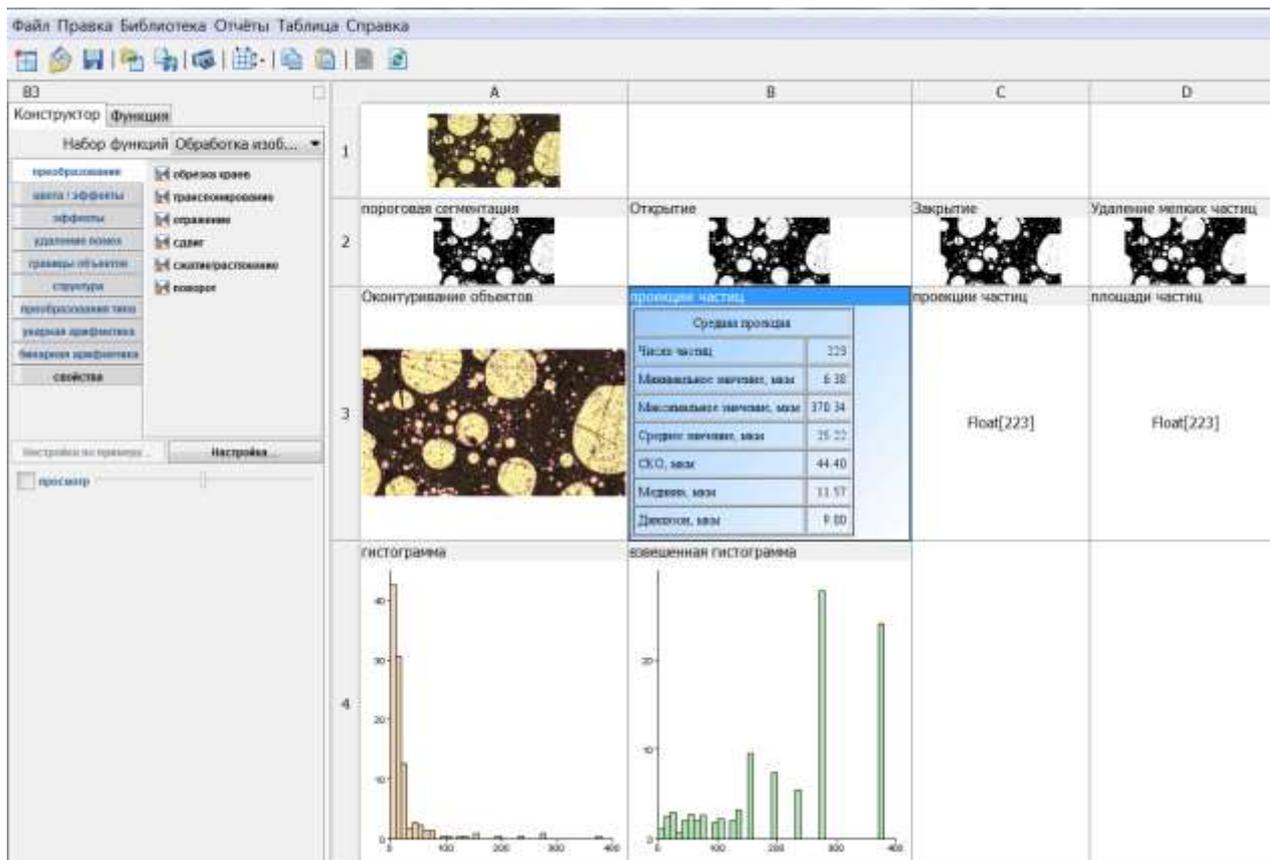


Рис. 6. Результаты обработки изображений образца шлака № 1 – характеристики включений
 Fig. 6. Results of slag no. 1 image processing – inclusion characteristics

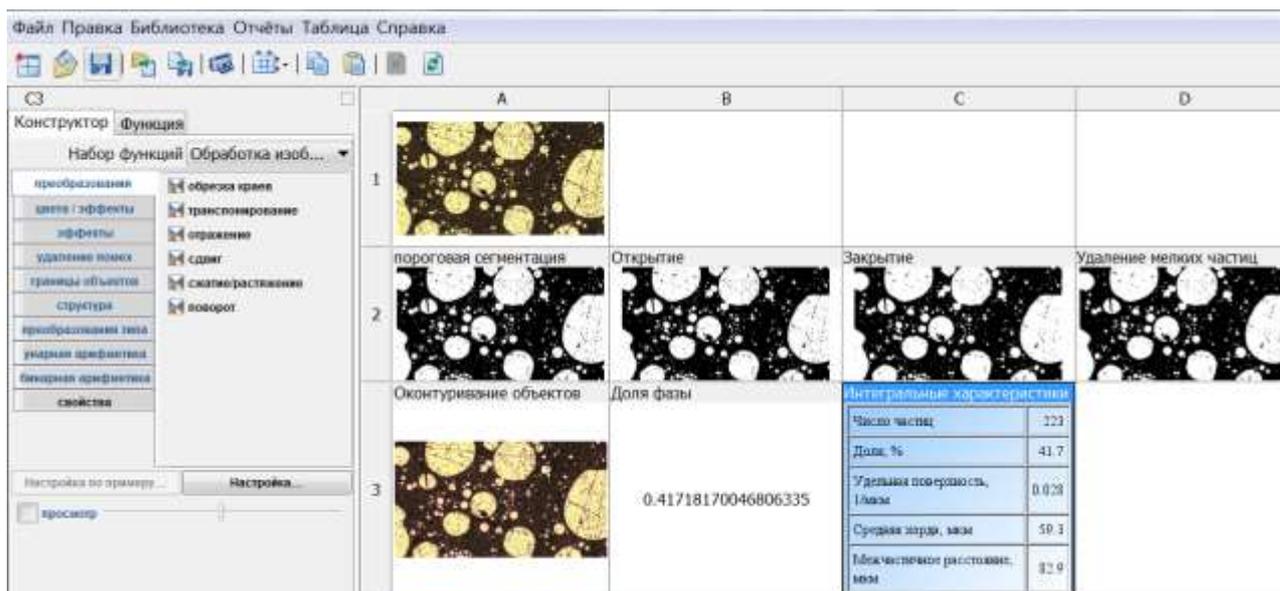


Рис. 7. Результаты обработки изображений образца шлака № 1 – характеристики включений и доля кремния в образце
 Fig. 7. Results of slag sample no. 1 image processing – inclusion characteristics and silicon proportion in the sample

ПУТИ ПЕРЕРАБОТКИ РАФИНИРОВОЧНЫХ ШЛАКОВ

В настоящее время накоплен определен-

ный опыт переработки шлаков кремниевого производства, основные предложения направлены на доизвлечение кремния или

получение продуктов, востребованных в различных отраслях.

Так, российские ученые [24] предлагают способ извлечения кремния из шлака. Шлак как составляющий шихты получен при рафинировании кремния с введением шлакообразующих компонентов (оксидов алюминия и кальция) и растворителя (железа, добавляемого в виде стружки). Данную шихту после расплавления выдерживают при температуре не ниже 1600°C, а затем охлаждают с отделением металлической фазы, представляющей собой сплав кремния и железа, от вторичного шлака следующего состава, % масс.: SiO₂ – 46,4–52,2; Al₂O₃ – 13,3–19,4; CaO – 30,2–34,54.

Авторы [25–27] предлагают синтезировать высококремнистые силумины из алюмоматричных композиций, полученных с использованием вторичного сырья, кварцевого песка и отходов производства кристаллического (технического) кремния. Для синтеза высококремнистых силуминов использовались отходы на основе алюминия, а также наполнители (формовочный кварцевый песок марки 2K2O203 и порошкообразные отходы кремния с частицами фракции 0,3–1,0 мм в количестве 10–15% от массы вводимого алюминия). В результате авторы получили литейные заэвтектические сплавы и алюмокремниевые лигатуры с содержанием кремния до 25–26%.

Авторы изобретения [28] предлагают способ сортировки шлаков кремниевого производства, основанный на сепарации составляющих шлаков. В результате доизвлекается дополнительное количество целевого продукта. Сепарацию осуществляют рентгено-радиометрическим методом по характеристическому излучению стронция или кальция.

Предложенный способ обладает преимуществами: утилизация отвальных шлаков с извлечением дополнительного количества ценного кремния, повышение экологичности предлагаемой технологии, снижение себестоимости конечной продукции. Недостатком данного изобретения является использование процессов дробления и сортировки, требующих больших временных и финансовых затрат.

Таким образом, шлаки кремниевого производства возможно перерабатывать с целью извлечения из них кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рафинировочные шлаки кремниевого производства являются перспективным техногенным сырьем. Для изучения химического состава образцов шлаков после окислительного рафинирования с АО «Кремний» использовали рентгенофазовый, рентгенофлуоресцентный, металлографический методы исследования, а также метод сканирующей электронной микроскопии. Результаты рентгенографического исследования показали наличие в исследуемых рафинировочных шлаках кремния, карборунда, низкотемпературных кристобалита и кварца. По данным РФА в образце шлака кроме кремния содержатся, % масс.: Ca – 7,40; Al – 3,80; Fe – 0,30; Ba – 0,19; K – 0,14; Na – 0,09; Sr – 0,09; Mg – 0,08; Ti – 0,05; S – 0,02. Согласно данным химического и рентгенофазового анализов с АО «Кремний» содержание кремния в шлаках варьируется в диапазоне от 42% до 65%, что свидетельствует о перспективности переработки данного техногенного сырья для доизвлечения кремния или получения товарных кремнийсодержащих продуктов, востребованных в различных отраслях промышленности.

Список литературы

1. Holappa L. Toward sustainability in ferroalloys production // Proceeding of the Twelfth Intern. Ferroalloys Congress (Helsinki, 6–9 June 2010). Helsinki, 2010. P. 1–10.
2. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
3. Архипов С.В., Катков О.М., Руш Е.А. [и др.]. Технология выплавки технического кремния / под ред. О.М. Каткова. Иркутск: ЗАО «Кремний», 1999. 245 с.
4. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. 487 p.
5. Schei A., Tuset J.Kr., Tveit H. Production of High Silicon Alloys. Trondheim: Tapir, 1998. 363 p.
6. Andresen B. The metallurgical silicon process revisited

- ed // Silicon for the Chemical and Solar Industry X: Proceedings of the International Conference (Ålesund – Geiranger, 28 June – 2 July 2010). Ålesund – Geiranger: Norwegian University of Science and Technology, 2010. P. 11–23.
7. Немчинова Н.В. Поведение примесных элементов при производстве и рафинировании кремния: монография. М.: Академия естествознания, 2008. 237 с.
8. Ringdalen E. Changes in Quartz During Heating and the Possible Effects on Si Production // JOM. 2015. Vol. 67. Iss. 2. P. 484–492.
<https://doi.org/10.1007/s11837-014-1149-y>
9. Зобнин Н.Н., Байсанов С.О., Байсанов А.С., Мусин А.М. Влияние операционных аспектов процесса восстановления оксида кремния на соотношение материального и теплового потоков в рудно-термической печи // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 444–459.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-444-459>
10. Немчинова Н.В., Леонова М.С., Тютрин А.А. Экспериментальные работы по плавке окомкованной шихты в производстве кремния // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 1. С. 209–217.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-209-217>
11. Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A., Bel'skii S.S. Optimizing the Charge Pelletizing Parameters for Silicon Smelting Based on Technogenic Materials // Metallurgist. 2019. Vol. 63. Iss. 1-2. P. 115–122.
<https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>
12. Tesfahunegn Y.A., Magnusson T., Tangstad M., Sævarsdóttir G. Effect of electrode shape on the current distribution in submerged arc furnaces for silicon production - a modelling approach // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. P. 595–600. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n6a6>
13. Børset M.T., Kolbeinsen L., Tveit H., Kjelstrup S. Exergy based efficiency indicators for the silicon furnace // Energy. 2015. Vol. 90. Part. 2. P. 1916–1921.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.010>
14. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Korepina N.A., Belskii S.S. On the possibility of carbonaceous dust waste use of prebaked anode production in silicon metallurgy // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 411. P. 012052.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012052>
15. Ringdalen E., Tangstad M. Reaction mechanisms in carbothermic production of silicon, study of selected reactions // International Smelting Technology Symposium (Incorporating the 6th Advances in Sulfide Smelting Symposium) (Orlando, 11–15 March 2012). Orlando: John Wiley & Sons, 2012. P. 195–203.
<https://doi.org/10.1002/9781118364765.ch24>
16. Vangskåsen J. Metal-producing mechanisms in the carbothermic silicon process, NTNU-Trondheim, 2012. [Электронный ресурс]. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/249099> (20.12.2020).
17. Gasik M. Handbook of ferroalloys: theory and technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 536 p.
18. Тютрин А.А., Фереферова Т.Т. Применение современных методов анализа для исследования шлаков кремниевого производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 9. С. 139–146.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-139-146>
19. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевого производства // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 31–39.
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39>
20. Nemchinova N.V., Hoang V.V., Tyutrin A.A. Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 969. P. 012038.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012038>
21. Валявин Г.Г., Запорин В.П., Габбасов Р.Г., Калимуллин Т.И. Процесс замедленного коксования и производство нефтяных коксов, специализированных по применению // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2011. № 8. С. 44–48.
22. Анисович А.Г. Современная металлография – основа литейного материаловедения // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 99–108.
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-99-108>
23. Немчинова Н.В., Тютрин А.А. Металлографическое исследование образцов алюминиевых рондолей // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 124–128. [Электронный ресурс]. URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10006363 (20.12.2020).
24. Пат. № 2690877, Российская Федерация, С22В 7/04, С01В 33/06. Способ выделения металлического кремния из шлака технического кремния / И.Д. Рожихина, О.И. Нохрина, И.Е. Ходосов, А.В. Проровский, А.И. Карлина, К.С. Ёлкин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет». Заявл. 27.09.2018; опубл. 06.06.2019. Бюл. № 16.
25. Арабей А.В., Рафальский И.В. Синтез алюминиево-кремниевых сплавов методом прямого восстановления кремния с использованием алюмоматричных композиционных лигатур // Литье и металлургия. 2011. № 3. С. 19–25.
26. Арабей А.В., Рафальский И.В., Немененок Б.М. Синтез сплавов системы Al-Si из алюмоматричных композиций, полученных с использованием отходов алюминия и кварцевого песка // Металл и литье Украины. 2013. № 4. С. 3–7.
27. Рафальский И.В., Арабей А.В., Немененок Б.М. Физико-химические основы синтеза силуминов с использованием кварцосодержащих материалов: монография. Минск: БНТУ, 2015. 140 с.
28. Пат. № 2209683, Российская Федерация, В03В 13/06. Способ сортировки шлаков производства кремния / П.Н. Антонов, В.А. Федосенко, Ю.О. Федоров, И.У. Кацер; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Кремний». Заявл. 29.08.2001; опубл. 10.08.2003. Бюл. № 22.

References

- Holappa L. Toward sustainability in ferroalloys production. In: Proceeding of the Twelfth Intern. Ferroalloys Congress. 6–9 June 2010, Helsinki. Helsinki; 2010, p. 1–10.
- Sizyakov VM, Vlasov AA, Bazhin VYu. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex. *Tsvetnye Metally*. 2016;1:32–37. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
- Katkov OM. *Smelting technology of industrial silicon*. Irkutsk: ZAO Kremniy; 1999, 244 p. (In Russ.).
- Gasik MI, Gasik MM. *Silicon electrothermy*. Dnepropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine; 2011, 487 p.
- Schei A, Tuset JKr, Tveit H. *Production of high silicon alloys*. Trondheim: Tapir; 1998, 363 p.
- Andresen B. The metallurgical silicon process revisited. In: *Silicon for the Chemical and Solar Industry X: Proceedings of the International Conference*. 28 June – 2 July 2010, Ålesund – Geiranger. Ålesund – Geiranger: Norwegian University of Science and Technology; 2010, p. 11–23.
- Nemchinova NV. *Behavior of impurity elements in silicon production and refining*: monograph. M.: Akademiya yestestvennykh nauk; 2008, 218 p.
- Ringdalen E. Changes in quartz during heating and the possible effects on Si production. *JOM*. 2015;67(2):484–492. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1149-y>
- Zobnin NN, Baisanov SO, Baisanov AS, Musin AM. Effect of silicon oxide reduction operational aspects on material and heat flow ratio in ore-thermal furnace. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):444–459. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-444-459>
- Nemchinova NV, Leonova MS, Tyutrin AA. Experimental works on pelletized charge smelting in silicon production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;1(21):209–217. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-209-217>
- Nemchinova NV, Leonova MS, Tyutrin AA, Bel'skii SS. Optimizing the charge pelletizing parameters for silicon smelting based on technogenic materials. *Metallurgist*. 2019;63(1-2):115–122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>
- Tesfahunegn YA, Magnusson T, Tangstad M, Saevarsdottir G. Effect of electrode shape on the current distribution in submerged arc furnaces for silicon production - a modelling approach. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(6):595–600.
- Børset MT, Kolbeinsen L, Tveit H, Kjelstrup S. Exergy based efficiency indicators for the silicon furnace. *Energy*. 2015;90(2):1916–1921.
- Nemchinova NV, Tyutrin AA, Korepina NA, Belskii SS. On the possibility of carbonaceous dust waste use of prebaked anode production in silicon metallurgy. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;411:012052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012052>
- Ringdalen E, Tangstad M. Reaction mechanisms in carbothermic production of silicon, study of selected reactions. In: *International Smelting Technology Symposium (Incorporating the 6th Advances in Sulfide Smelting Symposium)*. 11–15 March 2012, Orlando. Orlando: John Wiley & Sons; 2012, p. 195–203. <https://doi.org/10.1002/9781118364765.ch24>
- Vangskåsen J. Metal-producing mechanisms in the carbothermic silicon process, NTNU-Trondheim, 2012. Available from: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/249099> zavedeniya [Accessed 20th December 2020].
- Gasik M. *Handbook of ferroalloys: theory and technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013, 536 p.
- Tyutrin AA, Fereferova TT. Using modern analysis methods to study silicon production slags. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(9):139–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-139-146>
- Nemchinova NV, Buzikova TA. Study of the phase-and-chemical composition of silicon production furnace slags. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(1):31–39. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39>
- Nemchinova NV, Hoang VV, Tyutrin AA. Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;969:012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012038>
- Valyavin GG, Zaporin VP, Gabbasov RG. Delayed coking process and specialized petroleum coke production. *Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory*. 2011;8:44–48.
- Anisovich AG. Modern metallography – the basis of foundry material science. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. 2019;2:99–108. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-99-108>
- Nemchinova NV, Tyutrin AA. Metallographic investigation of aluminum rondol samples. *Fundamental'nyye issledovaniya = Fundamental research*. 2015;3:124–128. Available from: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10006363 [Accessed 20th December 2020].
- Rozhikhina ID, Nokhrina OI, Khodosov IE, Prorovskij AV, Karlina AI, Elkin KS. *Method of extracting metallic silicon from technical grade slag*. Patent RF, no. 2690877; 2019. (In Russ.)
- Arabei AV, Rafalski IV. Synthesis of aluminium-siliceous alloys by means of silicon direct revivification using of alumina-matrix composition alloys. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. 2011;3:19–25.
- Arabei AV, Rafalski IV, Nemenenok BM. The synthesis of alloys of system Al-Si of aluminium-matrix compositions on the basis from waste aluminum and quartz materials. *Metall i lit'ye Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*. 2013;4(239):3–7.

27. Rafalski IV, Arabei AV, Nemenenok BM. *Physico-chemical foundations of silumin synthesis using quartz-containing materials: monograph*. Minsk: BNTU; 2015, 140 p.

28. Antonov PN, Fedosenko VA, Fedorov YuO, Katser IU. *Sorting method for silicon production slags*. Patent RF, no. 2209683; 2003. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Немчинова Нина Владимировна,
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой металлургии цветных
металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: ninavn@yandex.ru

Nina V. Nemchinova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous Metals
Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: ninavn@yandex.ru

Хоанг Ван Виен,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: hoangvanvien01121994@mail.ru

Vien V. Hoang,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: hoangvanvien01121994@mail.ru

Апончук Ирина Игоревна,
старший преподаватель,
кафедра рекламы и журналистики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: aponchuk55@inbox.ru

Irina I. Aponchuk,
Senior Lecturer,
Department of Advertising and Journalism,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: aponchuk55@inbox.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.12.2020; одобрена после рецензирования 11.01.2021; принята к публикации 29.04.2021.

Information about the article

The article was submitted 12.12.2020; approved after reviewing 11.01.2021; accepted for publication 29.04.2021.