

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВО-ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕЧНЫХ ШЛАКОВ КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2017 г. Н.В. Немчинова, Т.А. Бузикова

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)

*Статья поступила в редакцию 15.02.16 г., доработана 01.03.16 г., подписана в печать 03.03.16 г.*

При получении металлургического кремния в рудно-термических печах (РТП) образуется незначительное количество печного шлака, ухудшающего качество выплавляемого ценного продукта. Цель работы состояла в анализе причин формирования печного шлака, переходящего при выпуске из РТП в кремний, а также изучении химического состава образцов. Разработана компьютерная программа, позволяющая прогнозировать выход продуктов плавки (чернового кремния, пылегазовой смеси, печного шлака) в зависимости от количества и химического состава загружаемых шихтовых материалов – кремнеземсодержащего рудного сырья и углеродистых восстановителей. Приведены результаты исследований образцов шлаков с РТП действующего производства металлографическим, рентгеноспектральным, рентгенофазовым методами анализа и рентгеноспектральным микроанализом. Показано, что в изучаемых образцах зафиксированы запутавшиеся корольки кремния с интерметаллическими включениями (Fe(Ti)Si, CaSi<sub>2</sub>), карборунд SiC, недовосстановленные  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>-кристобалит и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и образованные комплексные оксиды элементов-примесей (CaO·SiO<sub>2</sub>). Установлено, что количество образующегося печного шлака и, следовательно, химический состав выплавляемого кремния зависят от оптимального избытка твердого углерода (в диапазоне 103–111 %) в шихте и стабильного электрического режима работы РТП.

**Ключевые слова:** металлургический кремний, рудно-термическая печь, печной шлак, карботермия, металлографический анализ, рентгенофазовый анализ, рентгеноспектральный микроанализ.

**Немчинова Н.В.** – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой металлургии цветных металлов ИРНИТУ (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83). E-mail: ninavn@yandex.ru.

**Бузикова Т.А.** – магистрант этой кафедры. E-mail: buzik2009@mail.ru.

**Для цитирования:** Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевого производства // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 1. С. 31–39.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39.

*Nemchinova N.V., Buzikova T.A.*

### Study of the phase-and-chemical composition of silicon production furnace slags

Metallurgical grade silicon produced in ore-smelting furnaces (OSF) generates a negligible amount of a furnace slag compromising the valuable smelted product quality. The purpose of the study was to analyze the factors of furnace slag formation with its further passing into silicon when released from the ore-smelting furnace, as well as to study the chemical composition of samples. The computer program was developed to forecast the yield of smelting products (crude silicon, dust-gas mixture, furnace slag) depending on the amount and chemical composition of loaded charge material, i.e. siliceous raw ore and carbonaceous reductants. The paper provides the results of studying OSF slag samples from the existing plant by metallographic, X-ray, and X-ray diffraction methods and electron probe microanalysis. The study showed the presence of entrapped silicon prills with intermetallic inclusions (Fe(Ti)Si, CaSi<sub>2</sub>), silicon carbide SiC, incompletely reduced  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>-cristobalite and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and formed complex oxides of impurity elements (CaO·SiO<sub>2</sub>). It was found that the amount of formed furnace slag and thus the chemical composition of smelted silicon depend on the optimal excess of solid carbon in charge (within 103–111 %) and stable electrical operation of the ore-smelting furnace.

**Keywords:** metallurgical grade silicon, ore-smelting furnace, furnace slag, carbothermic process, metallographic analysis, X-ray diffraction analysis, electron probe microanalysis.

**Nemchinova N.V.** – Dr. Sci. (Tech.), prof., head of Department «Metallurgy of non-ferrous metals», Irkutsk National Research Technical University (INRTU) (664074, Russia, Irkutsk, Lermontov str., 83). E-mail: ninavn@yandex.ru.

**Buzikova T.A.** – master student, Department «Metallurgy of non-ferrous metals», INRTU. E-mail: buzik2009@mail.ru.

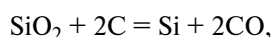
**Citation:** Nemchinova N.V., Buzikova T.A. Issledovanie fazovo-khimicheskogo sostava pechnykh shlakov kremnievogo proizvodstva. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 1. P. 31–39.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39.

## Введение

Кремний металлургических марок, получаемый электротермическим (карботермическим) способом, используется в цветной металлургии для производства литейных сплавов, в химической промышленности, черной металлургии для раскисления и легирования сталей и сплавов с целью придания им специальных свойств. Качество кремния, выплавляемого из шихты, состоящей из кварца (или кварцита), смеси различных углеродистых восстановителей (каменного угля, нефтекокса, древесного угля), древесной щепы, в основном удовлетворяет требованиям различных отраслей промышленности. Однако в последние годы увеличилось потребление металлургического кремния в химической промышленности, в том числе и для получения кремния, пригодного для изготовления солнечных элементов [1, 2]. В связи с этим проблема повышения извлечения и качества кремния металлургических марок при рациональном использовании материальных и энергетических ресурсов является актуальной.

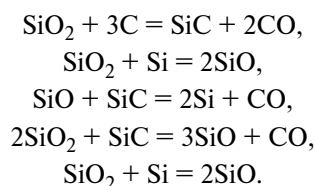
## Выплавка технического (металлургического) кремния

Выплавка кремния осуществляется в рудно-термических печах (РТП) на двух российских предприятиях, входящих в ОК РУСАЛ: ЗАО «Кремний» (г. Шелехов, Иркутская обл.) и ООО «СУАЛ-Кремний-Урал» (г. Каменск-Уральский, Свердловская обл.). Как известно, основная реакция, описывающая процесс получения кремния:



отражает лишь общую суть карботермического восстановления кремнезема [3, 4].

Анализ же литературных данных показывает, что процесс восстановления Si из рудного сырья углеродом протекает через стадию образования обязательных промежуточных продуктов (газообразного SiO и тугоплавкого SiC) [5, 6]:



Извлечение кремния зависит не только от протекающих в РТП сложных физико-химических

превращений и ведения технологии, но и от химического состава исходных шихтовых материалов. Поскольку кремнезем в процессе плавки претерпевает фазовые превращения, то, согласно исследованиям авторов [7], плавка кварца и кварцитов с замедленным превращением  $\beta$ -кварца в кристобалит предотвращает образование большого количества мелочи, улучшает газопроницаемость колошника и повышает извлечение кремния. Печи, работающие на таком сырье, как правило, имеют лучшие показатели производительности, расхода шихты, электроэнергии, электродов. А качество кварцита в этом случае зависит от содержания вредных примесей, которые снижают температуру плавления кварца и ускоряют переход кварца в кристобалит, уменьшая, таким образом, скорость его восстановления [3].

Производство кремния относится к бесшлаковым процессам, но незначительное количество данного обязательного продукта любого пирометаллургического процесса образуется при карботермической плавке (до 5 % в мощных РТП, 2–3 % — в печах малой и средней мощности), что снижает извлечение кремния в среднем на 2,2 и 1,2 % соответственно [3].

Шлаки кремниевого производства значительно отличаются от обычных металлургических шлаков [5, 8]. Одной из их особенностей является большая плотность по сравнению с выплавляемым целевым продуктом: 2,84–2,9 г/см<sup>3</sup> (в зависимости от вида его шлакообразующих компонентов) против 2,33 г/см<sup>3</sup> у кремния. Следовательно, при отклонениях работы РТП от нормального хода данный шлак опускается на подину печи, образуя подовую настыл, температура которой может достигать 1600 °С; шлаки подовой настыли являются тугоплавкими и обладают значительной вязкостью (порядка 3–5 Па·с), а по степени кислотности (равной в среднем 2,8) данный шлак относится к так называемым «длинным шлакам», которые являются особо вязкими [9].

При выпуске кремния примеси из подовой настыли нижней части РТП могут захватываться потоком расплава, вызывая повышение содержания шлака в нем и, соответственно, ухудшение качества выплавляемого продукта. В отдельных случаях при скоплении шлака в печи его удаляют при помощи известняка, который поступает в процесс вместе с шихтой (в количестве 4 кг) [3]. Однако введение флюсоющих добавок нежелательно, так как их избыток приводит к увеличению количества шлака и, следовательно, повышению удельного расхода электроэнергии.

При работе РТП в стабильном электрическом режиме при устойчивой посадке электродов и равномерном сходе шихты с небольшой выдержкой выпуск кремния из летки осуществляется в рафинировочный ковш в течение в среднем 3 ч горячей струей без затруднений совместно с образованным при плавке печным шлаком. Далее кремний подвергается окислительному рафинированию (поддувкой воздухом с добавкой кварцевого флюса) для формирования рафинировочного шлака [10].

В связи с повышением требований потребителей к качеству кремния необходимо детально проанализировать количество и состав образующихся печных шлаков, поэтому нами были изучены причины формирования основных примесных включений в кремнии и проведены исследования химического и фазового составов образцов печных шлаков действующего производства.

## Методика исследований

Согласно данным, полученным с ЗАО «Кремний», количество образующегося целевого продукта зависит от избытка твердого углерода ( $C_{ТВ}$ ) в шихте. Кроме того, очень важно обеспечение стабильного электрического режима работы РТП, способствующего полноте протекания восстановительных процессов (табл. 1).

Из данных табл. 1 видно, что оптимальным для получения кремния является содержание  $C_{ТВ}$  в диапазоне 103,7–110,3 % при стабильной работе РТП-1. При повышенном содержании углерода в шихте наблюдается незначительная нестабильность работы РТП-2. Для прогнозирования выхода продуктов плавки, включая и печной шлак, нами была разработана компьютерная программа, позволяющая вводить в расчет материального баланса плавки любое количество элементов, поступающих в печь с сырьем и участвующих в карбо-термическом процессе [11].

С целью изучения химического состава печных шлаков объектами исследований служили образцы шлаков с двух печей (РТП-1, РТП-2) ЗАО «Кремний» мощностью 16,5 МВА, отключенных на капитальный ремонт. Образцы были изучены рентгеноспектральным, металлографическим, рентгенофазовыми методами анализа, а также рентгено-спектральным микроанализом (РСМА).

Рентгеноспектральный анализ образцов шлака выполняли с помощью рентгеновского спектрометра ARL 9900 (Thermo Fisher Scientific, США).

Для определения фазовых включений в исследуемых образцах шлаков были использованы металлографический метод анализа [12] и РСМА [13]. Анализ образцов шлака проводили с помощью металлографического микроскопа «Olympus GX-51»

Таблица 1  
Показатели работы печей ЗАО «Кремний»

$C_{ТВ}$ , %	Коэффициент мощности (cos φ)	Количество полученного кремния, кг/сут	Ведение технологии (работа печи)	
			РТП-1	РТП-2
105,5/118,13	0,77/0,767	18,500/16,460	Стабильная	Удовлетворительная работа печи, выпуск Si переменной струей
103,7/114,23	0,77/0,765	17,850/16,840	Выпуск Si переменной струей с большим количеством шлака	Стабильная
106,16/108,9	0,77/0,764	17,660/16,370	Стабильная	Стабильная
105,5/119,4	0,78/0,759	18,350/17,700	Стабильная	Нестабильная
109,0/14,8	0,78/0,764	18,850/18,210	Стабильная	Стабильная
105,56/113,8	0,79/0,763	21,0/18,240	Стабильная	Стабильная
106,6/115,73	0,79/0,770	18,610/18,470	Стабильная	Стабильная
102,8/120,5	0,78/0,770	17,670/17,890	Стабильная	Выход Si нестабильный
105,8/119,73	0,79/0,770	19,930/18,250	Стабильная	Печь работает нестабильно, посадка электродов плавает, металл горячий переменной струей со шлаком
110,3/121,7	0,77/0,77	17,890/17,240	Стабильная	Шихта временами спекается, посадка электродов неустойчивая; дальнейшая стабилизация работы печи, выход Si горячей тонкой струей
Примечание. Данные по двум печам (РТП-1 и РТП-2) указаны через дробь.				

(Olympus, Япония), оснащенного цифровой камерой «Altera 20» и предназначенного для получения в отраженном свете светопольных и темнопольных изображений, изображений дифференциального контраста (DIC), изображений в поляризованном свете. Предельное увеличение микроскопа составляло  $1000\times$  (имелись также сменные объективы).

Для получения достоверных результатов поверхность анализируемого образца должна быть ровной и гладкой [13]. Кусочки шлака отрезались на станке «Labotom-15» (Struers, Дания) и заливались акриловой смолой марки «VersoCit-2 kit». Далее образцы шлифовали, полировали до достижения гладкой и ровной поверхности алмазными пастами PD-lubricant на шлифовально-полировальном станке «Tegramin-25» (Дания). На рис. 1 представлено фото подготовленной пробы для проведения металлографического анализа и РСМА.

Рентгенофазовый анализ образцов шлака был выполнен при помощи аппарата ДРОН-3,0 (Россия) с  $\text{CuK}_\alpha$ -излучением на никелевом фильтре; условия съемки:  $U = 25$  кВ,  $I = 20$  мА,  $2\theta = 3\div 55^\circ$ , скорость измерения —  $1^\circ/\text{мин}$ .

РСМА образцов осуществляли с использованием электронно-зондового микроанализатора «Superprobe JXA-8200» (Jeol Ltd., Япония). Данный прибор укомплектован растровым электронным микроскопом высокого разрешения, энергодисперсионным спектрометром (EDS) с кремнийлитиевым детектором (EX-84055MU) с разрешением 133 эВ и 5 спектрометрами с волновой дисперсией. Так как образцы шлака полировались, то при проведении анализа они являлись диэлектриками; для снятия заряда электронов на их поверхность напылялся проводящий слой углерода [12]. Фото изображений исследуемых образцов в обратно

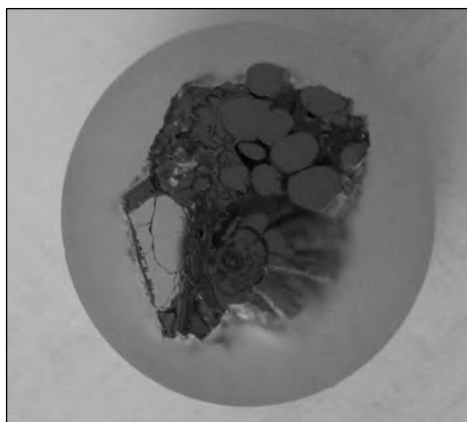


Рис. 1. Микрошлиф печного шлака

рассеянных электронах (СОМРО) выполнены на растровом электронном микроскопе; химический состав фаз определен на энергодисперсионном спектрометре. Условия возбуждения и регистрации аналитических сигналов следующие: ускоряющее напряжение — 20 кВ, ток пучка электронов — 20 нА, диаметр пучка электронов — 1 мкм.

## Результаты исследований и их обсуждение

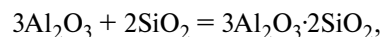
Неизбежной примесью в выплавляемом кремнии является карборунд. Образование конденсированной фазы SiC сопровождается блокированием реакционной поверхности восстановителя, что создает диффузионное сопротивление доставке газообразного монооксида кремния к поверхности углерода и вызывает потери кремния с отходящими печными газами [5, 6]. Взаимодействие кремния с углеродом интенсивно протекает при температуре  $1670^\circ\text{C}$ ; при этом происходит частичное разрушение карборунда с образованием промежуточной оксикарбидной фазы, переходящей в выплавляемый продукт (рис. 2).

В электропечи наряду с восстановлением кремнезема происходит частичное восстановление примесей из кварцита и золы восстановителей, сопровождающееся и обратным процессом — образованием оксидов (восстановление элементов и формирование новых сложных оксидов зависит от температуры их плавления и теплот образования) [14].

Так, при относительно низких температурах ( $t \approx 1200^\circ\text{C}$ ) возможно образование муллита (с вязкостью более 5 Па·с) из каолина, попадающего с рудным сырьем, по реакции



При недостатке углеродистых восстановителей и увеличении доли каменного угля в шихте, содержащего большее количество оксида алюминия по сравнению с другими углеродистыми материалами, подина печи начинает «зарастать» муллитом:



что приводит к потерям  $\text{SiO}_2$  и, следовательно, снижению извлечения целевого продукта.

Восстановление алюминия углеродом сопровождается образованием прочных оксикарбидов и карбида алюминия:  $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$ ,  $\text{Al}_2\text{OC}$ ,  $\text{Al}_4\text{C}_3$  [14].

Примесь железа может поступать в процесс с кварцитом в виде гематита  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , который в при-

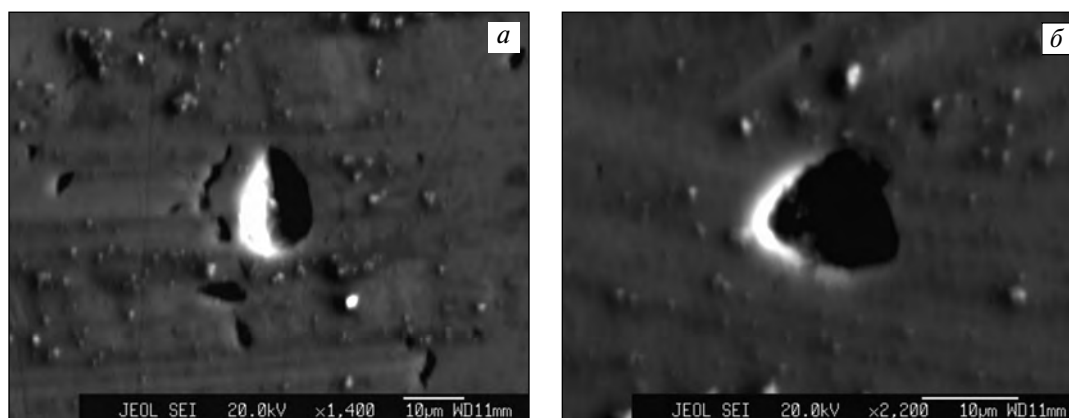
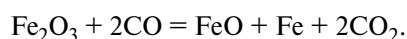


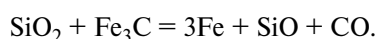
Рис. 2. Включения в выплавляемом кремнии (данные PCMA)

*a* – карбид кремния (SiC); *б* – оксикарбид кремния (SiOC)

сутствии CO переходит в FeO и образует элементное Fe:

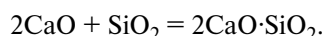


Учитывая наличие избытка углерода в шихте, железо, полученное по реакции восстановления, вновь связывается в карбид и вступает во взаимодействие с SiO<sub>2</sub> при  $t = 1600\div 1700$  °С и восстанавливается до Fe:

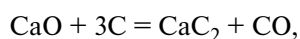


При высоких температурах железо будет растворяться в металлической фазе и накапливаться в конечном продукте.

Основу печных шлаков составляют силикаты кальция, образующиеся по реакции



При избытке в шихте углерода образуется карбид кальция:



который остается в шихте без изменения до полного расходования углерода, после чего сам расходуется на восстановление остатков кремнезема. Возможно также образование силицидов кальция, переходящих в выплавляемый кремний.

Недовосстановленный CaO совместно с глиноземом, кремнеземом образует сложные тугоплавкие комплексные оксиды (шлаковую фазу), ухудшающие сортность выплавляемого кремния. Оксид титана, имея высокую температуру плавления ( $\approx 1855$  °С) и обладая кислотными свойствами, с CaO образует прочное соединение CaTiO<sub>3</sub> [4]. При высокой температуре (свыше 1700 °С) образуются еще более сложные оксидные соединения на

основе CaO типа анортита (CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>), геленита (3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>), алита (8CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>), которые являются тугоплавкими, что приводит к запутыванию в них капелек кремния и, как следствие, снижению его общего извлечения при плавке [7].

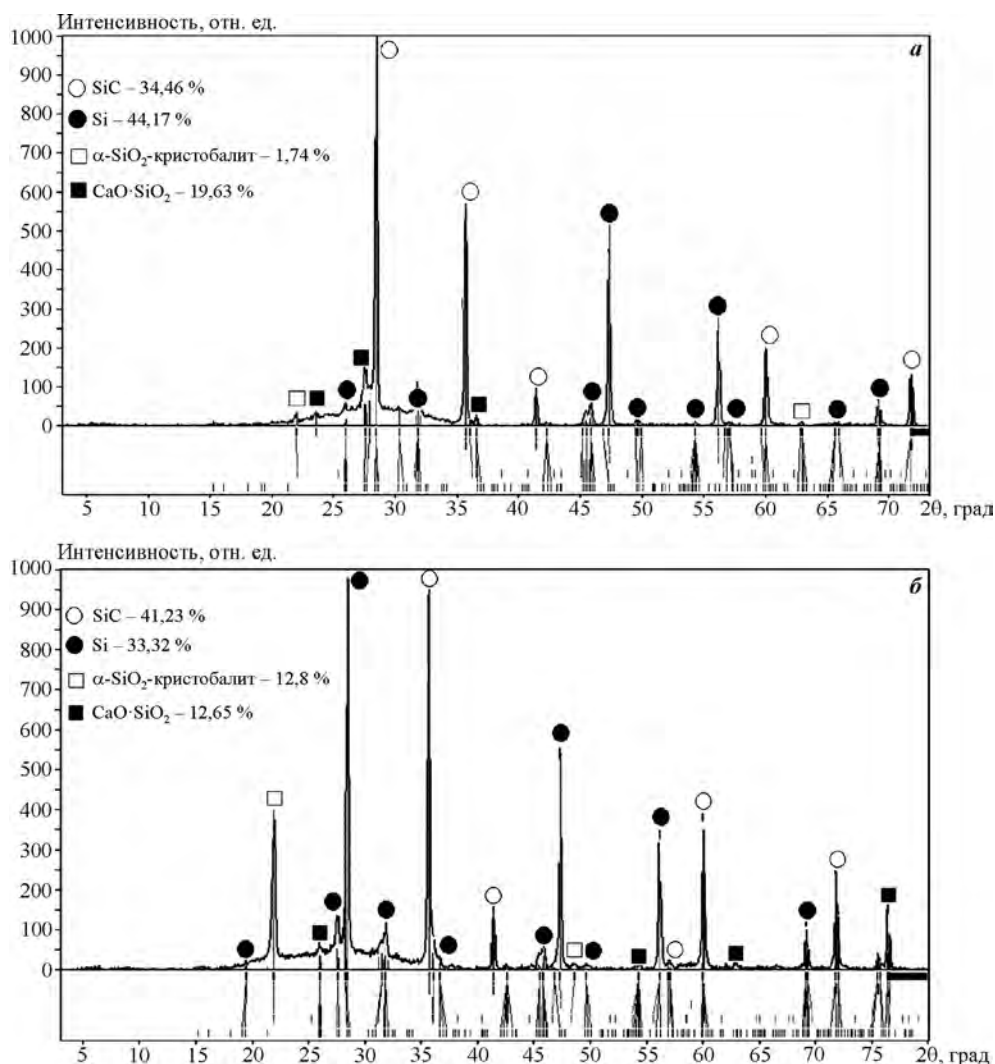
В отдельных случаях при восстановлении примесей углеродом могут образовываться карбиды соответствующих элементов, которые затем разрушаются железом или кремнием. Однако восстановление примесей часто осуществляется за счет кремния, возможно также и образование силицидов металлов (переходящих в кремний) в результате взаимодействия их карбидов и кремнезема.

Согласно данным, полученным с помощью рентгеноспектрального метода анализа, исследуемые образцы печных шлаков содержат в основном непрореагировавшие SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO. Причем содержание кремнезема в шлаке РТП-1 оказалось на 16,2 % меньше, чем в образце с РТП-2, что может свидетельствовать о нестабильной работе второй печи.

Результаты рентгенофазового анализа образцов шлака представлены на рис. 3.

Видно, что в образцах шлаков обеих РТП зафиксирован метасиликат кальция (CaO·SiO<sub>2</sub>), составляющий, как указывалось выше, основу печного шлака. Количество α-SiO<sub>2</sub>-кristобалита и карборунда в образце шлака с РТП-1 значительно меньше, что свидетельствует о стабильной работе этой печи.

При металлографическом исследовании образцы шлака изучались в светлом и темном полях (рис. 4): в образцах зафиксированы корольки кремния в основной массе неметаллической основы шлаков.



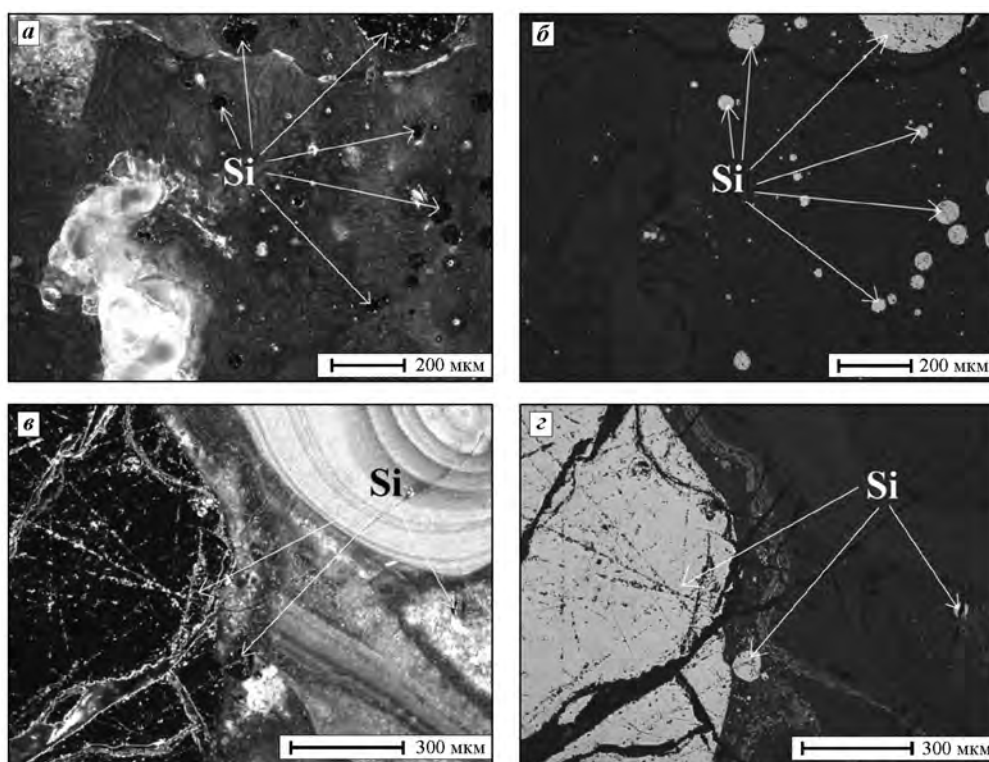
**Рис. 3. Рентгенограммы образцов печного шлака**  
**a** – RTP-1; **б** – RTP-2

На рис. 5 (фото в режиме СОМРО) приведены изображения образцов шлаков с различными включениями, химический состав которых был изучен с помощью РСМА (табл. 2).

Анализируя химический состав образца печного шлака с RTP-1 в точке 1 (см. рис. 5, а), можно сделать вывод, что в этом месте фиксируется фаза CaO·SiO<sub>2</sub> с примесью Al. Включение в т. 2 по химическому составу отвечает карбиду кремния (визуально поле в данной точке более темное — см. рис. 5, а), что характерно именно для фазы карборунда. Во включении 3 зафиксирован кремний. При увеличении 500<sup>х</sup> было обнаружено, что в капле Si по границам зерен расположены интерметаллические включения, которые соответствуют т. 4 и т. 5 на рис. 5, а. По данным РСМА можно также предположить наличие фазы силицида железа

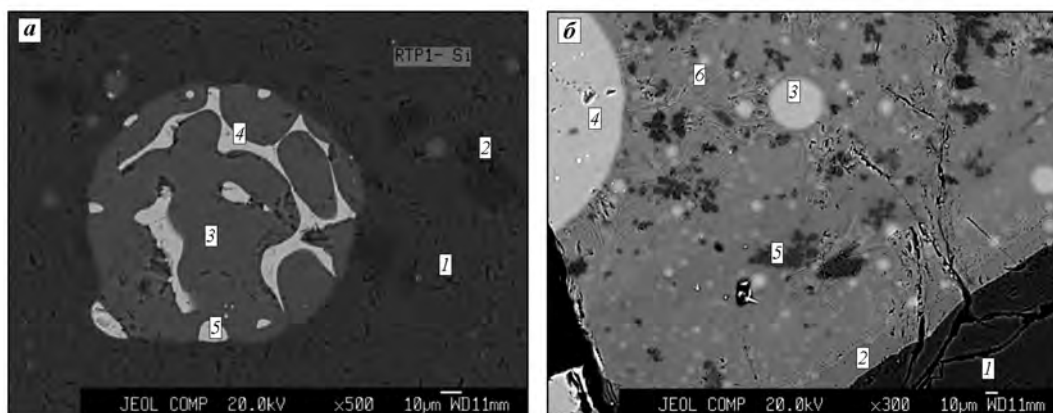
(FeSi), а присутствие Ti в незначительном количестве (см. табл. 2) объясняется тем, что данный элемент может частично замещать Fe; следовательно, более точно данное соединение может быть записано в виде Fe(Ti)Si.

В ходе анализа химического состава образца шлака с RTP-2 (см. рис. 5, б) было обнаружено, что в т. 1 зафиксирован SiO<sub>2</sub>. В т. 2 присутствуют O, Ca и незначительное количество Al, а более светлый фон исследуемого образца отвечает основе — кремнию. Возможно, примеси образуют соединение CaO·SiO<sub>2</sub> с примесью Al; аналогичное соединение встречалось и в шлаке с RTP-1. Точки 3 и 4 отвечают основному элементу — кремнию. Обнаружено несколько включений в т. 5: SiC и CaO·SiO<sub>2</sub> с примесью Al. Зафиксированное во включении 6 соединение по химическому составу соответствует



**Рис. 4.** Фотографии поверхности шлифа печного шлака

*a* – РТП-1 (светлое поле); *б* – РТП-1 (темное поле); *в* – РТП-2 (светлое поле); *г* – РТП-2 (темное поле)



**Рис. 5.** Фотографии поверхности образцов печных шлаков

*a* – РТП-1 (интерметаллические включения в корольке кремния, запутавшегося в шлаке)

*б* – РТП-2 (крупные и мелкие включения кремния в шлаке)

силициду кальция ( $\text{CaSi}_2$ ), хотя и наблюдается завышенный результат содержания Si (см. табл. 2), — это объясняется тем, что пучок зонда в данной точке мог захватить данный элемент из отдельных его корольков, расположенных рядом (см. рис. 5, б).

Различными методами анализа нами было подтверждено наличие в печных шлаках при производстве кремния комплексных включений — силикатов кальция, составляющих основу подовой

настыли РТП. Также были обнаружены карбид кремния и недовосстановленный  $\alpha$ - $\text{SiO}_2$ -кристобалит, что указывает на незавершенность карботермического процесса. Присутствие карборунда с плотностью  $3,21 \text{ г/см}^3$  обуславливает повышенную плотность печных шлаков кремниевого производства. Как показывают данные табл. 1 и 2, превышение содержания  $C_{\text{ТВ}}$  в шихте ( $>110,3 \%$ ) приводит к нестабильной работе РТП и повышенному

Таблица 2  
**Результаты РСМА образцов шлака**

Точка на рис. 5	Концентрация элементов, мас.%							Соединения и элементы
	Si	O	C	Fe	Ti	Ca	Al	
РТП-1								
1	30,2	48,5	0	0	0	11,2	10	CaO·SiO <sub>2</sub> с примесью Al
2	79,3	0	20,6	0	0	0	0	SiC
3	100	0	0	0	0	0	0	Si
4	47,4	0	0	42,7	9,9	0	0	Fe(Ti)Si
5	35,8	0	0	42,2	9,9	0	0	Fe(Ti)Si
РТП-2								
1	45,9	54,1	0	0	0	0	0	SiO <sub>2</sub>
2	32,7	47,7	0	0	0	18,1	1,5	CaO·SiO <sub>2</sub> с примесью Al
3	100	0	0	0	0	0	0	Si
4	100	0	0	0	0	0	0	Si
5	60,6	16,7	14,8	0	0	6,9	1	CaO·SiO <sub>2</sub> SiC с примесью Al
6	94,8	0	0	0	0	5,2	0	CaSi <sub>2</sub>

содержанию недовосстановленных примесных элементов в печных шлаках. В исследуемых образцах было зафиксировано значительное количество вкраплений кремния, запутавшегося из-за значительной вязкости шлака, что, в свою очередь, приводит к потерям ценного компонента. Обычно в пирометаллургические процессы для формирования шлака необходимого состава вводят флюсы — в частности, добавки FeO придают шлаку большую жидкотекучесть [15, 16]. Но при производстве кремния вводить данный флюс нельзя, так как железо при плавке практически полностью переходит в конечный продукт, тем самым загрязняя его.

## Заключение

Образующийся в незначительном количестве при карботермической плавке печной шлак при нормальном технологическом режиме работы РТП выпускается совместно с расплавом кремния, который сразу подвергается окислительному рафинированию. При нарушениях технологии ведения плавки в шлаках увеличивается содержание непрореагировавших  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>-кristобалита и SiC. Установлено, что основным компонентом печных шлаков является метасиликат кальция CaO·SiO<sub>2</sub>.

Вследствие высокой вязкости печной шлак частично остается в печи, опускается на подину и вызывает «зарастание» ванны, так как оседает на

стенках леточного отверстия РТП. Все это приводит к снижению производительности печи, увеличению удельного расхода электроэнергии и сокращению продолжительности кампании металлургического агрегата. Поэтому следует добиваться полного удаления из печи образующегося при плавке печного шлака, что достигается при глубокой и устойчивой посадке электродов и достаточном количестве восстановителя в шихте.

Проведенные исследования химического состава печного шлака показали сходимость результатов и высокую информативность использованных методов анализа.

Основные меры борьбы со шлакообразованием при производстве кремния сводятся к строгому контролю за поступлением в РТП достаточного количества восстановителя (в диапазоне 103—111 %), ведением технологии в стабильном режиме и применением возможно более качественных по содержанию примесей сырьевых материалов, что ведет к ресурсосбережению и оптимальному расходу электроэнергии.

## Литература

1. *Елкин К.С.* Производство металлического кремния России — состояние и перспективы // Цветные металлы и минералы 2014: Сб. тезисов докл. 6-го междунар. конгресса (г. Красноярск, 15—18 сент. 2014 г.). Красноярск: ООО «Легкие металлы», 2014. С. 180.



2. Hesse K., Schindlbeck E., Freiheit H.-C. Challenge of silicon production // Silicon for the chemical and solar industry IX: Proc. Intern. conf. (Oslo, 23—26 June 2008). Trondheim: NTNU, 2008. P. 61—67.
3. Катков О.М. Выплавка технического кремния. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999.
4. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011.
5. Gasik M. Handbook of ferroalloys: Theory and technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.
6. Andresen B. The metallurgical silicon process revisited // Silicon for the chemical and solar industry X: Proc. Intern. conf. (Alesund—Geiranger, 28 June—02 July 2010). Trondheim: NTNU, 2010. P. 11—23.
7. Рагулина Р.И., Емлин Р.И. Электротермия кремния и силумина. М.: Металлургия, 1972.
8. Saevarsdottir G., Bakken J.A. Current distribution in submerged arc furnaces for silicon metal // INFACON-XII: Proc. conf. (Helsinki, 6—9 June 2010). Helsinki, 2010. P. 717—728.
9. Минеев Г.Г., Mineeva T.C., Жучков И.А., Зелинская Е.В. Теория металлургических процессов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2010.
10. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бузикова Т.А. Исследование шлаков пирометаллургии кремния // Журн. СФУ. Техника и технологии. Т. 8. No. 4. 2015. С. 457—467.
11. Немчинова Н.В., Колодин А.А., Бузикова Т.А. Программа для изучения распределения примесей при рудно-термической выплавке кремния: Св-во о регистрации программы для ЭВМ 2015660202 (РФ). 2015.
12. Вашуль Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов. М.: Металлургия, 1988.
13. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997.
14. Немчинова Н.В., Яковлева А.А., Леонова М.С. Распределение примесей при рудно-термической выплавке кремния // Вестник Иркутского гос. технич. ун-та. 2013. No. 12. С. 230—236.
15. Рысс М.А. Производство ферросплавов. М.: Металлургия, 1985.
16. Гасик М.И., Лякишев Н.П. Физикохимия и технология электроферросплавов. Днепропетровск: ГНПП «Системные технологии», 2005.
- (Krasnoyarsk, 15—18 Sept. 2014). Krasnoyarsk: ООО «Legkie metally», 2014. P. 180.
2. Hesse K., Schindlbeck E., Freiheit H.-C. Challenge of silicon production. In: *Silicon for the chemical and solar industry IX*: Proc. Intern. conf. (Oslo, 23—26 June 2008). Trondheim: NTNU, 2008. P. 61—67.
3. Katkov O.M. Vyplavka tekhnicheskogo kremniya [Technical silicon smelting]. Irkutsk: IrGTU, 1999.
4. Gasik M.I., Gasik M.M. Elektrotermiya kremniya [Silicon electrothermie]. Dnepropetrovsk: Natsional'naya metallurgicheskaya akademiya Ukrainy, 2011.
5. Gasik M. Handbook of ferroalloys: Theory and technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.
6. Andresen B. The metallurgical silicon process revisited. In: *Silicon for the chemical and solar industry X*: Proc. Intern. conf. (Alesund—Geiranger, 28 June—02 July 2010). Trondheim: NTNU, 2010. P. 11—23.
7. Ragulina R.I., Emlin R.I. Elektrotermiya kremniya i silumina [Electrothermie of silicon and silumin]. Moscow: Metallurgiya, 1972.
8. Saevarsdottir G., Bakken J.A. Current distribution in submerged arc furnaces for silicon metal. In: *INFACON-XII*: Proc. conf. (Helsinki, 6—9 June 2010). Helsinki, 2010. P. 717—728.9.
9. Mineev G.G., Mineeva T.S., Zhuchkov I.A., Zelinskaya E.V. Teoriya metallurgicheskikh protsessov [Theory of metallurgical processes]. Irkutsk: IrGTU, 2010.
10. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Buzikova T.A. Issledovanie shlakov pirometallurgii kremniya [Investigation of pyrometallurgical silicon slags]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*. 2015. Vol. 8. No. 4. P. 457—467.
11. Nemchinova N.V., Kolodin A.A., Buzikova T.A. Programma dlya izucheniya raspredeleniya primesei pri rudno-termicheskoi vyplavke kremniya [The program for studying of impurity distribution during silicon ore-smelting]: Certificate 2015660202 (RF). 2015.
12. Vashul' Kh. Prakticheskaya metallografiya. Metody izgotovleniya obraztsov [Practical metallography. Methods of production of samples]. Moscow: Metallurgiya, 1988.
13. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997.
14. Nemchinova N.V., Yakovleva A.A., Leonova M.S. Raspredelenie primesei pri rudno-termicheskoi vyplavke kremniya [Distribution of impurity at ore and thermal smelting of silicon]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013. No. 12. P. 230—236.
15. Ryss M.A. Proizvodstvo ferrosplavov [Production of ferroalloys]. Moscow: Metallurgiya, 1985.
16. Gasik M.I., Lyakishev N.P. Fizikokhimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov [Physicochemistry and technology of electro-ferroalloys]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2005.

## References

1. Elkin K.S. Proizvodstvo metallicheskogo kremniya Rossii — sostoyanie i perspektivy [Production of metallurgical silicon of Russia: the state and prospects]. In: *Tsvetnye metally i mineraly 2014: Sbornik tezisev dokladov 6-go Mezhdunarodnogo kongressa [Non-ferrous metals and minerals 2014: Collection of abstracts of 6th Intern. Congress]*