

УДК 669.782; 669.054.82

Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Савченко Е.И.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАФИНИРОВОЧНОГО ШЛАКА КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Аннотация.** Проблема образования и накопления рафинировочного шлака кремниевого производства является актуальной для отрасли. Исследуемые шлаки содержат до 70% элементного кремния, что снижает эффективность производства Si за счет низкого извлечения целевого продукта в целом. Поэтому одним из возможных путей утилизации шлаков является их переработка с целью доизвлечения Si с получением алюмокремниевых сплавов. Показано, что основными компонентами шлака являются карбид кремния, кварц и кристобалит, аморфный кремнезем, оксиды кальция, алюминия, включения углерода и элементного кремния. Предложена методика переработки шлака, включающая плавку шихты, состоящую из шлака, металлического алюминия и флюсов, при температуре 1250-1350°C. В качестве флюсов применялись оксид и фторид кальция. Изучено влияние различных факторов процесса переработки кремнийсодержащего шлака (температуры плавки, содержания CaF<sub>2</sub> в составе флюсовой смеси CaF<sub>2</sub> и CaO и крупности частиц шлака) на извлечение кремния в сплав. Получено уравнение математической модели, описывающей процесс извлечения кремния из рафинировочного шлака в виде сплава с алюминием, и установлено, что данная математическая модель является адекватной. Максимальное извлечение кремния из шлака в сплав составило в среднем 51,43% и было достигнуто при температуре 1350°C, содержании CaF<sub>2</sub> в составе (CaF<sub>2</sub>+CaO) 20% и крупности частиц шлака 1,21 мм.

**Ключевые слова:** производство кремния, рафинировочный шлак, переработка шлака, извлечение кремния, Al-Si-сплавы

### Введение

Ресурсо- и энергосбережение является одной из основных стратегических целей развития металлургической отрасли нашей страны на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года\*. В настоящее время продвижение технологических инноваций и расширение сырьевой базы за счет вовлечения новых месторождений и отходов производства является определяющим фактором в поддержании конкурентоспособности отечественной металлургии на мировом рынке [1–8].

Согласно данным [9], мировой объем рынка кремния увеличился до 10,2 млрд долл. в 2021 году, что было на 4,1% больше по сравнению с предыдущим годом. В 2021 году объем производства кремния сократился на 4,7% до 3,4 млн т, прервав семилетнюю тенденцию роста. За рассматриваемый период общий объем производства увеличивался с 2007 по 2021 годы: он рос в среднем на +3,8% в год за последние четырнадцать лет. Китай, Бразилия, Норвегия, Франция и США являются крупнейшими в мире производителями кремния, на долю которых приходится более 90% мирового объема производства.

Россия также относится к крупным производителям кремния металлургических марок. В нашей стране кремний производится в АО «Кремний», входящее в компанию «РУСАЛ».

Получение кремния осуществляется в руднотермических печах (РТП) его восстановлением из кремнеземсодержащего сырья углеродными восстановителями (смесью нефтехкокса, древесного и камен-

ного углей) [10–12]. В качестве рудного сырья используется кварцит Черемшанского рудника, входящего в состав завода.

После плавки расплав кремния направляется в ковш для рафинирования. В промышленных условиях применяют окислительный способ – продувкой воздухом при использовании кварцевого песка в качестве флюса. Данная технологическая операция предназначена в основном для очистки кремния от кальция и алюминия. Основной продукцией предприятия является рафинированный кремний, соответствующий ТУ 1711-004-49421724-16. Отходом рафинирования является рафинировочный шлак, который явился объектом наших исследований

### Объект исследований

Количество образующегося рафинировочного шлака в АО «Кремний» составляет приблизительно 10% от массы кремния (при этом учитывается и масса вводимого флюса – кварцевого песка). Общий объем шлака составляет ~ 3900 т в год. Рафинировочный шлак относится к довольно плотным материалам с характерными включениями кремния и карборунда (стекловидной с зеленоватым оттенком фазой) (рис. 1).

Согласно проведенному рентгенофазовому анализу, выполненному на дифрактометре ДРОН-7 (Россия), образцов рафинировочного шлака [13], основными компонентами шлака являются карбид кремния, кварц и кристобалит, аморфный кремнезем, оксиды кальция, алюминия, включения углерода и элементного кремния, а также сложные оксиды как продукты недовосстановления карботермического процесса (в частности, анортит [14]).

Содержание элементного кремния в шлаке после рафинирования составляет от 40 до 70%. Кремний из-за значительной вязкости шлака запутывается в нем, что ведет к снижению общего извлечения кремния

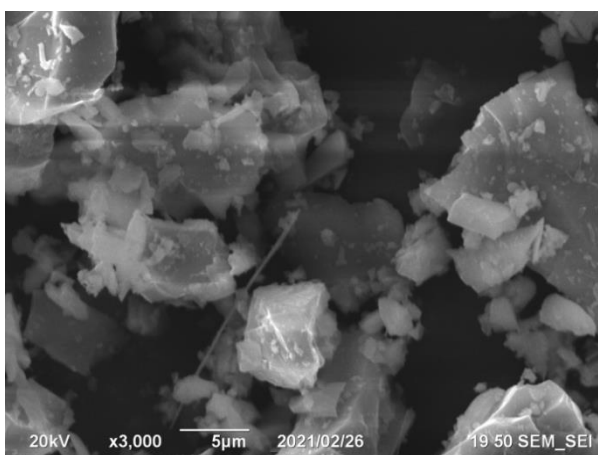
© Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Савченко Е.И., 2022

\*Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839 «Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года»

при плавке. В связи с этим нами проведены исследования по извлечению кремния из данного техногенного продукта.



а



б

Рис. 1. Рафинировочный шлак АО «Кремний»: а – общий вид; б – фото измельченного образца шлака (сканирующая электронная микроскопия, увеличение  $\times 3000$ , микроскоп JIB-Z4500 («Jeol», Япония))

#### Эксперименты по извлечению кремния из рафинировочного шлака

Нами предложен способ переработки рафинировочного шлака с извлечением кремния в виде сплава с алюминием – силумина (заявка на изобретение № 2022112286 от 06.05.2022). Для определения оптимального температурного режима переработки шихты на основе кремнийсодержащего шлака необходимо учитывать температуру его плавления и вязкость. Поэтому для получения шлака с оптимальной вязкостью в шихту необходимо вводить шлакообразующие компоненты (флюсы):  $\text{CaO}$  и  $\text{CaF}_2$  [15].

Для снижения потерь алюминия в результате окисления кислородом воздуха применяется покровный флюс, состоящий из смеси  $\text{KCl}$  и  $\text{NaCl}$  [16, 17]. Крупность частиц шлака варьировалась от 0,5 до 2,5 мм. В качестве источника алюминия использовалась алюминиевая катанка марки А5Е, порезанная на

прутки длиной 20 мм. Температура переработки шлака была принята в диапазоне  $1250\text{--}1350^\circ\text{C}$ . Был проведен ряд поисковых экспериментов переработки шлака в высокотемпературной печи Nabertherm («Nabertherm GmbH», Германия) (рис. 2) с целью доизвлечения кремния в виде Al-Si-сплавов и подбора оптимальных параметров переработки.



а



б

Рис. 2. Высокотемпературная печь (а) и тигли с шихтой (б)

Химический состав полученных Al-Si-сплавов изучали спектральным методом анализа в центральной заводской лаборатории филиала ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов (Иркутском алюминиевом заводе) компании «РУСАЛ».

Спектральный анализ проводится в соответствии с нормативными документами: ГОСТ 3221-85 «Алюминий первичный. Методы спектрального анализа»; СТО 06-2016, разработанный центральной заводской лабораторией ПАО «РУСАЛ Братск». Спектральный анализ проводился на атомно-эмиссионном спектрометре Spectrolab (Spectrolab, Германия). Согласно полученным данным, в 4-х образцах силумина содержа-

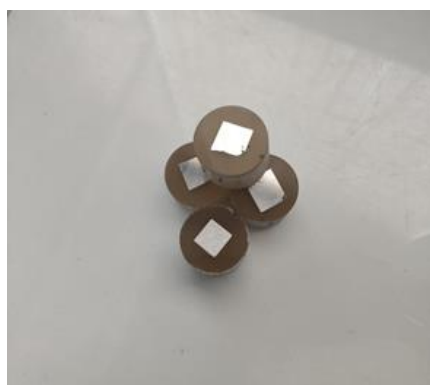
ние кремния составило соответственно, мас. %: 6,69, 5,13, 4,86 и 4,02.

Структура экспериментальных образцов Al-Si-сплавов была изучена металлографическим методом анализа в научно-исследовательской лаборатории кафедры металлургии цветных металлов ИРНТУ.

Для определения микроструктуры полученных экспериментальных образцов Al-Si-сплавов были подготовлены шлифы (рис. 3) и проведены металлографические исследования.



а



б

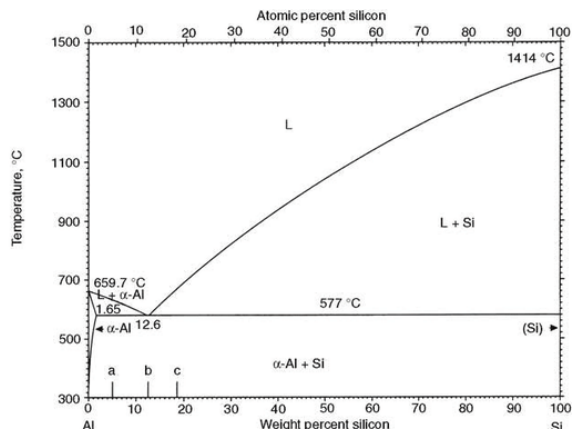
Рис. 3. Экспериментальные Al-Si-сплавы:  
а – общий вид сплава;

б – шлифы для металлографических исследований

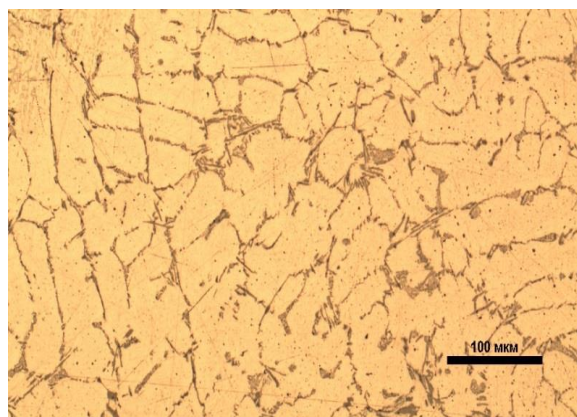
Для изучения микроструктуры экспериментальных сплавов пробоподготовка к металлографическим исследованиям включала в себя получение среза от общего куска сплава с помощью отрезного станка Labotom-15 фирмы «Struers» (Дания). Далее обрезанные по требуемым размерам куски сплава для последующей шлифовки заливались акриловой смолой DuroCit, обладающей коротким временем затвердевания и незначительной усадкой. Шлифование и полировка образцов сплава осуществлялась на шлифовально-полировальном станке Tegramin-25 («Struers», Дания). В наших исследованиях при шлифовании были использованы 3 режима работы с различными лубрикантами: Piano 220 – вода; Largo – DiaPro All/Lar (9 мкм); Mol – DiaDuo-2 (3 мкм).

Микроструктуру шлифов изучали с помощью микроскопа Olympus GX-51 («Olympus», Япония),

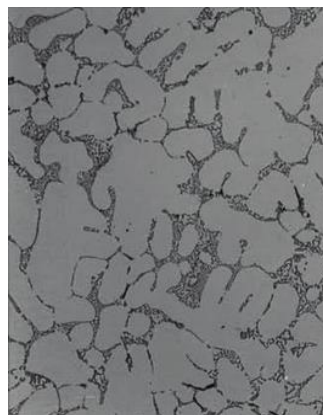
оснащенного цифровой камерой Altera20. Согласно известным литературным данным, данной структуре экспериментальных сплавов соответствует доэвтектический силумин (рис. 4).



а



б



в

Рис. 4. Микроструктура алюмо-кремниевых сплавов:  
а – диаграмма равновесия Al-Si;  
б – экспериментальный Al-Si-сплав (металлографическое исследование);  
в – промышленный литейный доэвтектический сплав (1,65–12,6 мас. % Si) [18]

**Математическая обработка экспериментальных данных по переработке кремнийсодержащего рафинировочного шлака**

Результаты эксперимента по переработке шлаков были обработаны с помощью компьютерной программы «PlanExp B-D13», разработанной в среде программирования Microsoft Visual Basic 6.0. Программа ориентирована на работу с трехфакторным планом эксперимента B-D13, который позволяет получать нелинейные квадратичные модели технологических процессов [19]. При построении математической модели эксперимента по извлечению кремния из рафинировочного шлака в виде сплава (силумина) в качестве основных параметров (факторов варьирования), которые влияют на извлечение кремния в сплав, были выбраны: температура проведения процесса ( $x_1$ ); содержание  $\text{CaF}_2$  в составе флюсовой смеси  $\text{CaF}_2$  и  $\text{CaO}$  ( $x_2$ ); крупность частиц кремниевое шлака ( $x_3$ ).

За основной уровень и интервалы варьирования были приняты: температура, °C – 1300 и 50; содержание  $\text{CaF}_2$  в составе флюсовой смеси фторида и оксида кальция ( $\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO})$ ), % – 15 и 5; крупность кремниевое шлака, мм – 1,5 и 1. За выходной параметр ( $y$ ) было принято извлечение кремния из шлака в Al-Si-сплав. Было проведено два параллельных измерения для определения воспроизводимости выходного параметра, составлена матрица планирования (табл. 1).

Для того чтобы проверить значимость коэффициентов уравнения математической модели, использовался критерий Стьюдента (его значение – 2,23). Дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах составила 0,702. Уравнение математической модели, описывающей процесс извлечения кремния из кремниевое шлака в виде сплава с алюминием, имеет вид

$$y = 28,475 + 8,265x_1 + 10,301x_2 - 3,341x_3 + 3,802x_2^2 - 4,451x_3^2 - 2,578x_1x_3 + 2,266x_2x_3. \quad (1)$$

Адекватность математической модели оценивалась по критерию Фишера ( $F$ -критерию). Для этого в программе «PlanExp B-D13» были определены основные показатели для оценки адекватности математической модели (дисперсия воспроизводимости в парал-

лельных опытах, число степеней свободы, табличное значение критерия Стьюдента, дисперсия адекватности математической модели, число степеней свободы при значимых коэффициентах, табличное значение критерия Фишера ( $F_{\text{табл}}$ ), расчетное значение критерия Фишера ( $F_{\text{расч}}$ ).

Согласно расчетам выполняется условие

$$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}} = 1,63 < 4,1.$$

Следовательно, данная математическая модель является адекватной и применима для решения производственных задач.

Поскольку для графического представления функции трех переменных (см. уравнение (1)) требуется четырехмерное пространство, с целью визуального упрощения и удобства работы с математической моделью данную функцию трех переменных преобразовали в функцию двух переменных, поочередно принимая константой один из факторов. В результате преобразования получаются 3 варианта математической модели:  $y = f(x_2, x_3)$  при  $x_1 = \text{const}$ ,  $y = f(x_1, x_3)$  при  $x_2 = \text{const}$  и  $y = f(x_1, x_2)$  при  $x_3 = \text{const}$ . Для визуализации влияния факторов на выходной параметр с помощью программы были построены диаграммы линий равного уровня (изолиний), представляющие собой проекции трехмерных поверхностей на плоскости ( $x_2, x_3$ ), ( $x_1, x_3$ ) и ( $x_1, x_2$ ).

На рис. 5 представлены изолинии, характеризующие зависимость извлечения кремния в сплав от температуры процесса и крупности частиц шлака, а содержание  $\text{CaF}_2$  во флюсовой смеси ( $\text{CaF}_2+\text{CaO}$ ) принято в качестве постоянного фактора. Уравнения математической модели с учетом принятого данного постоянного фактора было преобразовано:

$$y = 21,976 + 8,265x_1 - 3,341x_3 - 4,451x_3^2 - 2,578x_1x_3 - 2,266x_3, \quad \text{при } x_2 = -1 \text{ (10 \%);}$$

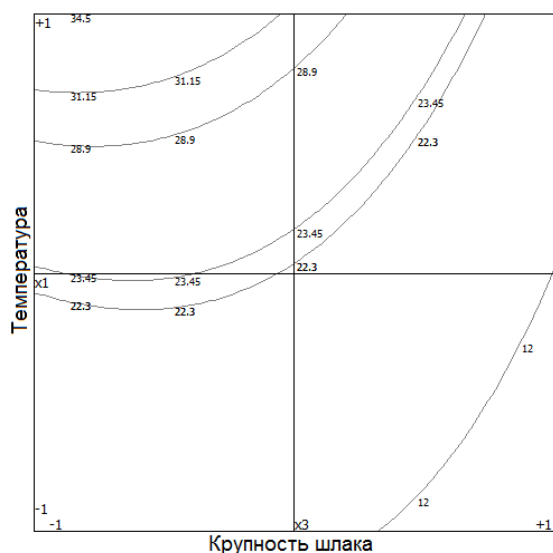
$$y = 28,475 + 8,265x_1 - 3,341x_3 - 4,451x_3^2 - 2,578x_1x_3, \quad \text{при } x_2 = 0 \text{ (15 \%);}$$

$$y = 42,578 + 8,265x_1 - 3,341x_3 - 4,451x_3^2 - 2,578x_1x_3 + 2,266x_3, \quad \text{при } x_2 = 1 \text{ (20 \%)}.$$

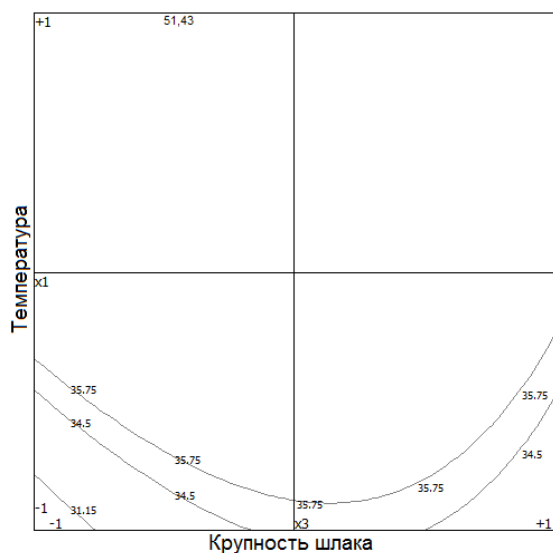
Таблица 1

План эксперимента и значение выходного параметра

Номер опыта (u)	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Извлечение Si в сплав ( $y$ – выходной параметр), %	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Температура, °C	$\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO})$ , %	Крупность частиц шлака, мм	$y(1)$	$y(2)$
1	-1	-1	-1	1250	10	0,5	12,2	11,8
2	+1	-1	-1	1350	10	0,5	33,7	35,3
3	-1	+1	-1	1250	20	0,5	28,2	29,6
4	-1	-1	+1	1250	10	2,5	5,9	5,8
5	-1	0,19	0,19	1250	15,95	1,69	23,1	21,5
6	0,19	-1	0,19	1309,5	10	1,69	22,4	22,2
7	0,19	0,19	-1	1309,5	15,95	0,5	31,2	31,1
8	-0,29	+1	+1	1285,5	20	2,5	35,8	35,7
9	+1	-0,29	+1	1350	13,55	2,5	23,8	23,1
10	+1	+1	-0,29	1350	20	1,21	50,2	52,7



а



б

Рис. 5. Зависимость извлечения кремния в сплав от температуры ( $x_1$ ) и крупности шлага ( $x_3$ ) при  $\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO})$  ( $x_2$ ) 10% (а) и 20% (б)

Как видно из рис. 5, в пределах варьирования переменных факторов  $x_1$  и  $x_3$  (температуры плавки и крупности частиц шлага) при принятом постоянном факторе  $x_2$  (содержании фторида кальция во флюсовой смеси) повышение температуры плавки оказывает положительное влияние на процесс извлечения кремния из шлага в сплав, при этом экстремум функции отклика отсутствует и смещен в область более высоких температур. Наибольшее значение извлечения кремния составило 51,45% при температуре 1350°C. Оптимальная крупность частиц шлага  $x_3$  из данных рис. 5, а, б находится в диапазоне от 0,6 до 1,7 мм.

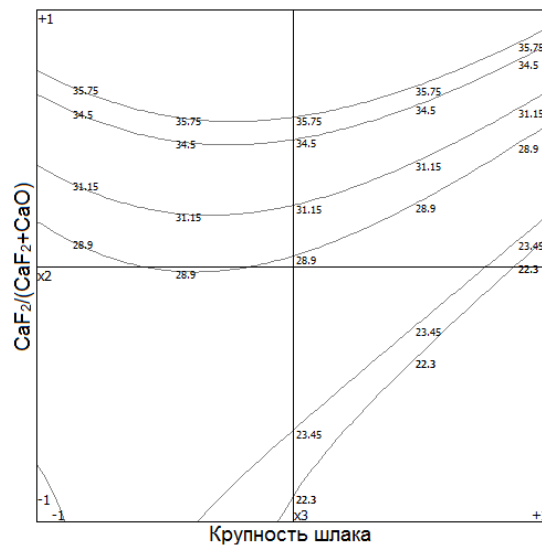
В результате анализа построенных диаграмм  $y = f(x_2, x_3)$  при  $x_1 = \text{const}$  (температура процесса) (рис. 6) уравнение математической модели с учетом приня-

того постоянного фактора было преобразовано и принято следующий вид:

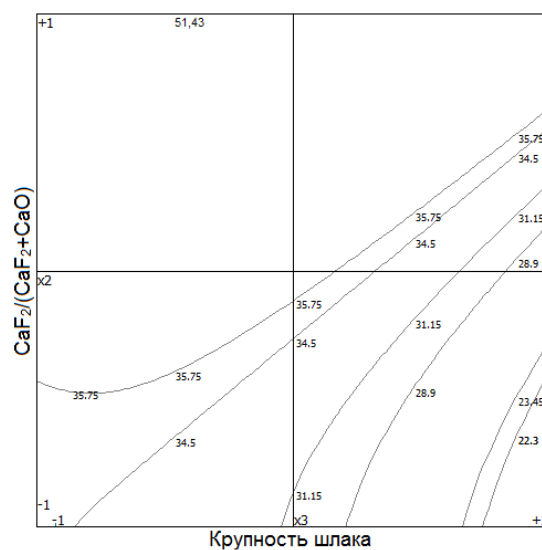
$$y = 20,210 + 10,301x_2 - 3,341x_3 + 3,802x_2^2 - 4,451x_3^2 + 2,578x_3 + 2,266x_2x_3, \text{ при } x_1 = -1 \text{ (1250°C);}$$

$$y = 28,475 + 10,301x_2 - 3,341x_3 + 3,802x_2^2 - 4,451x_3^2 + 2,266x_2x_3, \text{ при } x_1 = 0 \text{ (1300°C);}$$

$$y = 36,740 + 10,301x_2 - 3,341x_3 + 3,802x_2^2 - 4,451x_3^2 - 2,578x_3 + 2,266x_2x_3, \text{ при } x_1 = 1 \text{ (1350°C).}$$



а



б

Рис. 6. Зависимость извлечения кремния в сплав от содержания  $\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO})$  ( $x_2$ ) и крупности шлага ( $x_3$ ) при температуре ( $x_1$ ) 1300°C (а) и 1350°C (б)

Оптимальная крупность частиц шлага из данных рис. 6 находится в области 1,3 мм при температуре 1300°C и 0,8 мм при температуре 1350°C. Добавка  $\text{CaF}_2$  способствует повышению извлечения кремния в Al-Si-сплав, однако оптимальное ее содержание не

определено и выходит за пределы варьирования переменных факторов.

В третьем случае в результате построения изолиний (рис. 7) и определения  $y = f(x_1, x_2)$  при  $x_3$  (крупность частиц шлака) = const экстремум функции отсутствует (в пределах варьирования факторов – температуры процесса и содержания  $\text{CaF}_2$  в шихте). С учетом данного выбранного постоянного фактора уравнение математической модели было преобразовано:

$$y = 27,365 + 8,265x_1 + 10,301x_2 + 3,802x_2^2 + 2,578x_1 - 2,266x_2, \\ \text{при } x_3 = -1 \text{ (0,5 мм);}$$

$$y = 28,475 + 8,265x_1 + 10,301x_2 + 3,802x_2^2, \\ \text{при } x_3 = 0 \text{ (1,5 мм),}$$

$$y = 20,683 + 8,265x_1 + 10,301x_2 + 3,802x_2^2 - 2,578x_1 + 2,266x_2, \\ \text{при } x_3 = 1 \text{ (2,5 мм).}$$

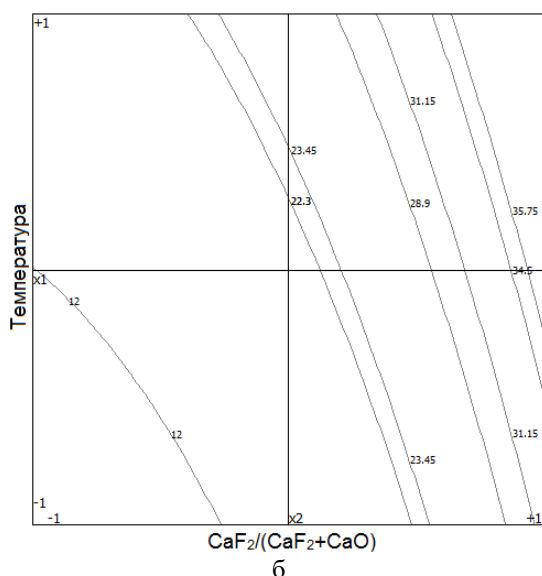
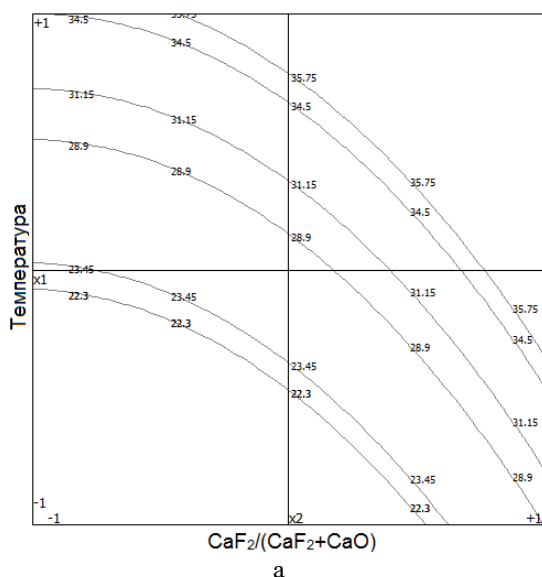


Рис. 7. Зависимость извлечения кремния в сплав от температуры ( $x_1$ ) и содержания  $\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO})$  ( $x_2$ ) при крупности шлака ( $x_3$ ) 0,5 мм (а) и 2,5 мм (б)

Полученные зависимости также подтверждают положительное влияние температуры процесса и содержания  $\text{CaF}_2$  во флюсовой смеси с  $\text{CaO}$  на извлечение кремния, оптимальное их значение не определено.

По результатам проведенного трехфакторного эксперимента из полученных данных коэффициентов регрессии и уравнения математической модели следует, что температура проведения процесса и содержание  $\text{CaF}_2$  оказывают наибольшее положительное влияние на извлечение кремния из шлака в Al-Si-сплав. Наибольшее извлечение кремния из шлака было достигнуто при содержании  $\text{CaF}_2$  в смеси ( $\text{CaF}_2+\text{CaO}$ ) 20% и температуре 1350°C.

Крупность частиц шлака также является немаловажным параметром процесса переработки кремнийсодержащих шлаков с получением силуминов. Согласно уравнению математической модели увеличение крупности частиц шлака снижает извлечение кремния. Однако согласно данным рис. 5, 6 оптимальная крупность шлака находится в пределах от 0,6 до 1,7 мм и зависит от температуры процесса и содержания фторида кальция.

Таким образом, максимальное извлечение кремния из шлака в сплав составило 51,43 %, которое было достигнуто при температуре 1350°C, содержании  $\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO}) - 20$  % и крупности частиц кремниевых шлаков 1,21 мм. Однако полученные параметры не являются оптимальными, так как не были найдены экстремумы функций. Поэтому следует изменить диапазоны факторов: температуры и содержания  $\text{CaF}_2$  в составе флюсовой смеси ( $\text{CaF}_2+\text{CaO}$ ) в сторону увеличения значений до 1400°C и 25 %, соответственно.

### Заключение

В результате проведенных экспериментов по переработке рафинировочных кремнийсодержащих шлаков с целью извлечения кремния в виде Al-Si-сплавов были получены экспериментальные образцы, отвечающие по структуре доэвтектическому силумину.

При математической обработке экспериментальных данных 10-ти различных опытов при двух параллельных определениях (с помощью компьютерной программы «PlanExp B-D13»), было получено уравнение зависимости содержания кремния в сплаве (выходной параметр) от трех переменных факторов: температуры плавки (в интервале 1250–1300°C), содержание  $\text{CaF}_2$  в составе смеси  $\text{CaF}_2$  и  $\text{CaO}$  (в диапазоне 10–20 мас. %) и крупности частиц шлака (от 0,5 до 1,5 мм). Установлено, что данная математическая модель является адекватной.

При графическом изображении влияния на выходной параметр двух варьруемых факторов при принятом постоянном одном из трех оптимального значения не выявлено. Как правило, проблема может заключаться в том, что область оптимума определить невозможно. Это может происходить из-за недостаточного диапазона выбранных факторов. В связи с этим задачей наших дальнейших экспериментов будет

являться расширение диапазона принятых значений параметров и увеличение числа опытов: температуры и содержания  $\text{CaF}_2$  в составе флюсовой смеси ( $\text{CaF}_2 + \text{CaO}$ ) в сторону увеличения значений до  $1400^\circ\text{C}$  и 25% соответственно.

#### Список литературы

1. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>.
2. Shatokhin I.M., Kuz'min A.L., Smirnov L.A., Leont'ev L.I., Bigeev V.A., Manashev I.R. New method for processing metallurgical wastes // Metallurgist. 2017. Т. 61. No. 7-8. P. 523–528. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4>.
3. 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>.
4. Шешуков О.Ю., Егизарьян Д.К., Лобанов Д.А. Безотходная переработка ковшевого и электропечного шлака // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 192–199. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-192-199>.
5. Утилизация отходов металлургического производства: монография / Панишев Н.В., Бигеев В.А., Потапова М.В., Макарова И.В., Гаврилова Т.О. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 69 с.
6. Перспективные способы утилизации и использования отходов газоочистных сооружений глиноземного производства / Шепелев И., Жуков Е., Еськова Е., Кирюшин Е., Пиляева О. // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 6. С. 4–9. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-6-4-9>.
7. Переработка глиноземсодержащего смета для использования в производстве первичного алюминия / Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Немчинова Н.В., Новиков Ю.В. // Цветные металлы. 2022. № 8. С. 15–22. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.08.02>.
2. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства / Бельский С.С., Зайцева А.А., Тютрин А.А., Исмоилов З.З., Баранов А.Н., Сокольников Ю.В. // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 782–794. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-782-794>.
3. Сергеева А. Мировой рынок кремния составил 10 млрд долл. URL: <https://www.indexbox.ru/news/Mirovoj-rynok-kremniya-> (дата обращения 19.09.2022)
4. Попов С.И. Металлургия кремния в трехфазных руднотермических печах. Иркутск: ЗАО «Кремний», 2004. 237 с.
5. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. 487 с.
6. 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 (USA), 11-15 march 2012). Orlando, 2012. P. 195–203.
7. 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>.
8. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бузикова Т.А. Исследование шлаков пирометаллургии кремния // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 4. С. 457–467.
9. Хоанг В.В. Подбор флюсов для переработки шлаков кремниевого производства // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 20–21 апреля 2022 г.). Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2022. С. 18–22.
10. Ракипов Д.Ф., Бардин Н.М., Жуков В.П. Физико-химические основы и технология переплава алюминиевого лома и сплавов в среде расплавленных хлоридов. Екатеринбург: Изд. дом «Изд-дтНаукаСервис», 2009. 194 с.
11. Фомин Б.А., Москвитин В.И., Махов С.В. Металлургия вторичного алюминия. М.: ЭКОМЕТ, 2004. 240 с.
12. Małgorzata W. Introduction to Aluminum-Silicon Casting Alloys. In: Alloys Aluminum-Silicon Casting Alloys: Atlas of Microfractographs. Ch. 1. ASM International, 2004. 124 p.
13. Ординарцева Н.П. Планирование эксперимента в измерениях. Заводская лаборатория // Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 3. С. 72–76.

#### Сведения об авторах

**Тютрин Андрей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры МЦМ, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия. E-mail: an.tu@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

**Немчинова Нина Владимировна** – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия. E-mail: [ninavn@yandex.ru](mailto:ninavn@yandex.ru). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

**Хоанг Ван Виен** – аспирант кафедры металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия. E-mail: [hoangvanvien01121994@mail.ru](mailto:hoangvanvien01121994@mail.ru)

**Савченко Екатерина Игоревна** – студентка кафедры металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия. E-mail: [katya0501200361@gmail.com](mailto:katya0501200361@gmail.com)

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**ANALYSING THE RESULTS OF SILICON PROCESSING REFINERY SLAG TREATMENT EXPERIMENT STATISTICALLY**

**Tyutrin Andrey A.** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metallurgy of Non-ferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: [an.tu@inbox.ru](mailto:an.tu@inbox.ru). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

**Nemchinova Nina V.** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Non-ferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: [ninavn@yandex.ru](mailto:ninavn@yandex.ru). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

**Hoang Vien V.** – Postgraduate Student of the Department of Metallurgy of Non-ferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: [hoangvanvien01121994@mail.ru](mailto:hoangvanvien01121994@mail.ru)

**Savchenko Ekaterina I.** – Student of the Department of Metallurgy of Non-ferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: [katya0501200361@gmail.com](mailto:katya0501200361@gmail.com)

**Abstract.** The generation and accumulation of refinery slag in silicon processing is a matter of high importance. The slags researched in the paper contain up to 70% of Si elements. This negatively affects the efficiency of Si production due to lower product recovery. Hence, one of the possible ways to dispose of the slags is to process them aiming to produce additional Si and aluminium-silicon alloys. The paper shows that the slag main components are carbon silicide, quartz and cristobalite, amorphous silica, calcium and aluminum oxides, carbon and element silicon inclusions. It suggests a slag processing method that includes melting the infeed that contains slag, metallic aluminum, and flux at 1250-1350 °C. The flux used was calcium oxide and calcium fluoride. The paper covers the influence of various factors of silicon-containing slag processing (melting temperature, CaF<sub>2</sub> content in the CaF<sub>2</sub> and CaO flux, the size of the slag particles) on the silicon extraction. The resulting mathematical model equation, proven to be accurate, describes the extraction of silicon in the form of Al-Si alloy from the refinery slag. The max silicon to alloy extraction rate equaled 51.43 % and was obtained at 1350 °C, the CaF<sub>2</sub> content in (CaF<sub>2</sub>+CaO) equaled 20% with the slag particle size of 1.21 mm.

**Key words:** silicon production, refining slag, slag processing, silicon extraction, Al-Si alloys

---

Ссылка на статью:

Математическая обработка результатов эксперимента по переработке рафинировочного шлака кремниевого производства / А.А. Тютрин, Н.В. Немчинова, В.В. Хоанг, Е.И. Савченко // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 15-22.  
Tyutrin A.A., Nemchinova N.V., Hoang V.V., Savchenko E.I. Analysing the results of silicon processing refinery slag treatment experiment statistically. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 15-22.