

УДК 669.168

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОСИЛИЦИЯ ПРИ
ЭЛЕКТРОПЛАВКЕ ЦИНКСОДЕРЖАЮЩЕЙ РУДЫ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ЖАЙРЕМ»**

Б.А. Капсаямов, А.С. Колесников*

ТОО «Производственное объединение литейных заводов»
*РГП на ПХВ «Южно-Казахстанский государственный
университет им. М. Ауэзова»
E-mail: kas164@yandex.ru

Колесников Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент Южно-Казахстанского государственного университета им. М. Ауэзова.

E-mail: kas164@yandex.ru

Область научных интересов: металлургия, электротермия, комплексная переработка техногенного и минерального сырья, промышленная экология, нефтегазовое дело.

Капсаямов Бауыржан Ауесханович, д-р техн. наук, доцент, директор по развитию ТОО «Производственное объединение литейных заводов».

E-mail: 19575859@rambler.ru

Область научных интересов: металлургия, электротермия, комплексная переработка техногенного и минерального сырья, промышленная экология.

Актуальность работы обусловлена необходимостью промышленной переработки труднообогатимых цинксоодержащих руд с целью вовлечения их в технологический цикл получения ферросилиция марок ФС20 и ФС45 и коллективных свинцово-цинковых возгонов. Цель работы – развитие, с позиции единого технологического сырья, физико-химических основ совместного восстановления Zn, Pb, Fe, Si, из поликомпонентных систем и разработка на этой основе технологий извлечения цветных металлов и получения ферросплавов из полиметаллического сырья. Основные экспериментальные данные получены с привлечением современных методов физико-химического анализа: химико-аналитического, масс-спектрометрического с индуктивно связанной плазмой. Определение оптимальных технологических параметров электроплавки проводилось с использованием математического моделирования методом рототабельного планирования экспериментов второго порядка. В результате определены оптимальные технологические параметры электроплавки цинксоодержащих руд Жайремского полиметаллического бассейна с получением ферросилиция марок ФС20 и ФС45 и одновременным извлечением в возгоны до 99,8 % Zn и 98,6 % Pb.

Ключевые слова:

Цинксоодержащие полиметаллические руды, ферросилиций, цветные металлы, математическое моделирование, оптимальные параметры, кремний, железо, электроплавка.

В настоящее время, несмотря на то что успехи фундаментальных наук открыли широкие возможности развития металлургии, реальная степень рационального использования сырья остается довольно низкой (не более 7–10 % извлечение сырья в продукцию). Во многом это связано с несовершенством современных технологий применительно к бедному, некондиционному и сложному нефлотурующему сырью, с недостаточно высоким уровнем режима экономии природных ресурсов, а также с тем, что в научно-производственной сфере преимущественно превалирует отраслевая идеология использования сырья, которая подчинена максимальному извлечению основного компонента. В условиях ускоряющейся тенденции добычи минерального сырья потребности мирового сообщества не могут быть удовлетворены только за счет природного минерального сырья, т. к. они не беспредельны. В связи с этим становится объективной необходимостью комплексное использование в качестве сырья отходов производств, которых в мире накопилось более 300 млрд т. К таким отходам производств относятся и труднообогатимые полиметаллические цинк-олигонитовые руды месторождения Жайрем (Республика Казахстан).

В виду отсутствия технологии их переработки не находят применение 612,2 млн т. труднообогатимых руд, содержащих 380 тыс. т Zn, 200 тыс. т Pb, 2,8 млн т Si, 0,8 млн т Fe [1].

В обобщенной работе [2] авторы обосновывают широкие перспективы использования электротермических методов при переработке сложных, трудноперерабатываемых продуктов в

производстве цветных металлов, что позволяет на современном этапе по-новому организовать процессы обогащения руд с получением промышленных продуктов с суммарным извлечением ценного металла. Основным преимуществом электротермии по сравнению с другими наиболее распространенными в мировой практике огневыми плавильными процессами являются малые объемы отходящих газов, определяющие возможность достижения норм предельно допустимых выбросов вредных веществ, и получение бедных шлаков, не содержащих растворимых соединений металлов, которые пригодны для использования в стройиндустрии.

В настоящей работе нами были проведены поисковые эксперименты по получению ферросилиция из труднообогатимых цинк-олигонитовых руд методом электротермической плавки с нахождением оптимальных условий получения ферросилиция методом математического моделирования рототабельного плана второго порядка с использованием системы Mathcad-14 [3].

В качестве независимых факторов служили: количество кокса (от 0 до 25 % от массы руды – К) количество стальной стружки (от 10 до 50 % от массы руды – Ст) и количество Шубаркульского угля (от 0 до 50 % от массы руды – У). Опыты проводили с рудой, содержащей: PbO – 0,33 %, ZnO – 3,01 %, Al₂O₃ – 8,5 %, SiO₂ – 44,5 %, CaO – 1,8 %, S – 0,03 %, MgO – 0,5 %, H₂O – 3,8 %, Fe_{о6} – 5,7 %. Количество руды во всех опытах было неизменным и составляло 3 кг.

В качестве целевой выходной переменной выбрано содержание кремния в ферросилиции – Si_ф, %.

На основе предварительных исследований выбраны следующие диапазоны изменения факторов (табл. 1).

Таблица 1. Исходные данные для планирования экспериментов.

	Кодированный вид			Натуральный вид		
	X ₁	X ₂	X ₃	Ст	К	У
Нижний уровень	–1	–1	–1	18	5	10
Верхний уровень	+1	+1	+1	42	10	40
Нулевой уровень	0	0	0	30	7,5	25
Интервал варьирования	Δ	Δ	Δ	12	2,5	15
Плечо +α	+1,68	+1,68	+1,68	50,184	11,705	50
Плечо –α	–1,68	–1,68	–1,68	9,816	3,295	0

В соответствии с матрицей планирования (табл. 1) было проведено 20 плавов с массой шихты 3,5–6,5 кг. Причем шесть плавов провели (в соответствии с матрицей планирования) с одинаковой шихтой для определения ошибки опытов.

Методика обработки результатов экспериментов была использована общепринятая [4–6]. Для автоматизации обработки результатов разработана специальная программа для персонального компьютера на базе систем MsExcel и Mathcad-14, используемая в среде системы MS Windows XP. Это позволило в ходе диалога практически мгновенно получать все необходимые результаты расчетов и обеспечить поиск оптимальных режимов проведения процесса.

Лабораторные опыты по электроплавке труднообогатимых цинк-олигонитовых руд проводили на установке, схема которой приведена на рис. 1

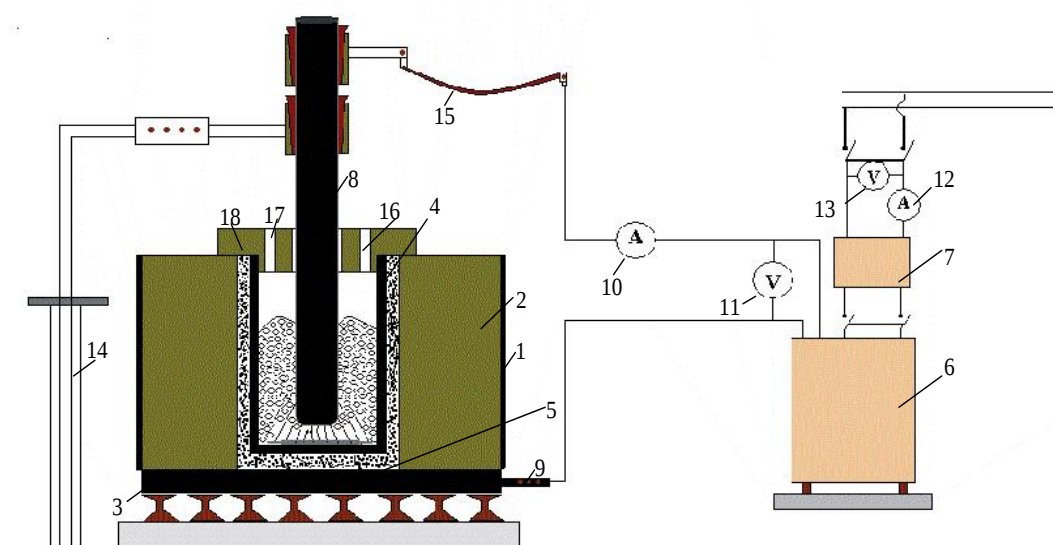


Рис. 1. Схема лабораторной установки для электротермической плавки труднообогатимых руд

Печным агрегатом, в котором происходил процесс переработки сырья, являлась однофазная электропечь, питающаяся от трансформатора ОСУ-80 (6). Футеровка электропечи (2) – хромомагнетитовая, подина (3) – углеграфитовая. Пространство между кожухом печи и футеровкой было заполнено листовым асбестом. На подине печи была уложена постель из углеграфитовой пыли (5) фракции < 1 мм, на которую устанавливался графитовый тигель внутренним диаметром 15 или 20 см (4). Толщина стенок тигля 1,0–1,5 см, толщина дна тигля 1,0–1,5 см, высота 28 см. Пространство между кожухом печи и футеровкой было заполнено листовым асбестом. Пространство между футеровкой и графитовым тиглем было заполнено графитовым боем фракций 1–5 см (5).

В верхней части футеровки была установлена крышка из огнеупорного материала (17) с отверстиями: для засыпки шихты – два отверстия, для ввода электрода и для отвода отходящих газов (16). Электрод использовали графитированный, диаметром 7,5 см (8). Нарастание электрода происходило при помощи графитовых ниппелей. Механизм поддержания электрода состоял из кольцеобразной опоры, в пространство между которой и электродом вставлялись железные конические клинья. Опора через изолятор соединялась со штангой механизма перемещения электрода (14). Выше кольцеобразной опоры находилось токоподводящее кольцо. В пространство между кольцом и электродом вводились медные конические клинья. Токоподводящее кольцо соединялось через гибкую короткую медную сеть с шиной, идущей от трансформатора ОСУ-80. Вторая шина от трансформатора через медную шпильку (9) соединялась с углеграфитовой подиной. Между трансформатором и электропечью было установлено теристорное устройство (7), позволяющее регулировать мощность от 0 до 40 кВт. Контролирующие устройства (амперметры и вольтметры) были установлены на входе и выходе из трансформатора (6). Газы из электропечи через коробчатый конденсатор – холодильник – отсасывались дымососом.

Перед проведением опытов кокс и кварцит дробились до фракции 0,5–0,8 см, а основное сырье – до 0,7–1,0 см. Шихта тщательно перемешивалась в противне. Розжиг печи осуществлялся при помощи дугового разряда между электродом и дном графитового тигля, на который предварительно засыпался коксик фракции 0,5–1,0 см. Розжиг печи осуществляли в течение 70–80 мин при силе тока 600–800 А и напряжении 40–45 В. После розжига печи в течение 12–17 мин через загрузочные отверстия загружали порциями шихту. Масса проплавленной шихты составляла 3,5–6,5 кг. Электроплавку проводили в течение 60 мин. При этом мощность, подаваемая в печь, регулировалась исходя из прогнозируемой марки ферросили-

ция. После плавки электрод поднимался из шихты. Тигель вместе с продуктами охлаждался естественным методом в течение 15–20 ч. Затем тигель извлекался из печи и разбивался. Продукты плавки взвешивались и подвергались анализу. Марка ферросилиция определялась стандартным пикнометрическим методом с пробой в 100г [7]. Кроме того, ферросилиций подвергался рентгенофазовому анализу на приборе ДРОН-3 и масс-спектрометрическому анализу.

Результаты плавки труднообогатимой цинк-олигонитовой руды Жайремского месторождения, проведенной по матрице планирования экспериментов, представлены в табл. 2.

Таблица 2. План и результаты экспериментов

№ опыта	Ст	К	У	Si(экс), %	Si(расч.), %
1	42	10,0	40	45,0	47,0
2	18	10,0	40	65,2	62,3
3	42	5,0	40	33,0	34,5
4	18	5,0	40	42,0	44,3
5	42	10,0	10	21,5	22,4
6	18	10,0	10	25,0	26,3
7	42	5,0	10	21,5	22,5
8	18	5,0	10	21,0	20,7
9	50	7,5	25	32,0	33,6
10	10	7,5	25	43,5	44,9
11	30	11,7	25	44,0	42,7
12	30	3,3	25	26,0	27,5
13	30	7,5	50	51,0	49,7
14	30	7,5	0	10,0	9,6
15	30	7,5	25	31,0	30,0
16	30	7,5	25	29,0	30,0
17	30	7,5	25	31,0	30,0
18	30	7,5	25	29,0	30,0
19	30	7,5	25	31,5	30,0
20	30	7,5	25	31,7	30,0

На основании данных таблицы получили следующие уравнения регрессии содержания кремния в получаемом ферросплаве, которые в кодированном и натуральном виде выглядят следующим образом.

Кодированный вид:

$$\begin{aligned} Si_{(ф)} = 30,6 - 3,14 \cdot x_1 + 4,78 \cdot x_2 + 12,06 \cdot x_3 + 3,4 \cdot x_1^2 + 1,88 \cdot x_2^2 - \\ - 0,08 \cdot x_3^2 - 1,43 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2,91 \cdot x_1 \cdot x_3 + 3,13 \cdot x_2 \cdot x_3. \end{aligned} \quad (1)$$

Натуральный вид:

$$\begin{aligned} Si_{(ф)} = 34,51 - 0,91 \cdot Ст - 3,21 \cdot К + 0,69 \cdot У + 0,023 \cdot Ст^2 + 0,29 \cdot К^2 - \\ - 0,00061 \cdot У^2 - 0,047 \cdot Ст \cdot К - 0,016 \cdot Ст \cdot У + 0,083 \cdot К \cdot У. \end{aligned} \quad (2)$$

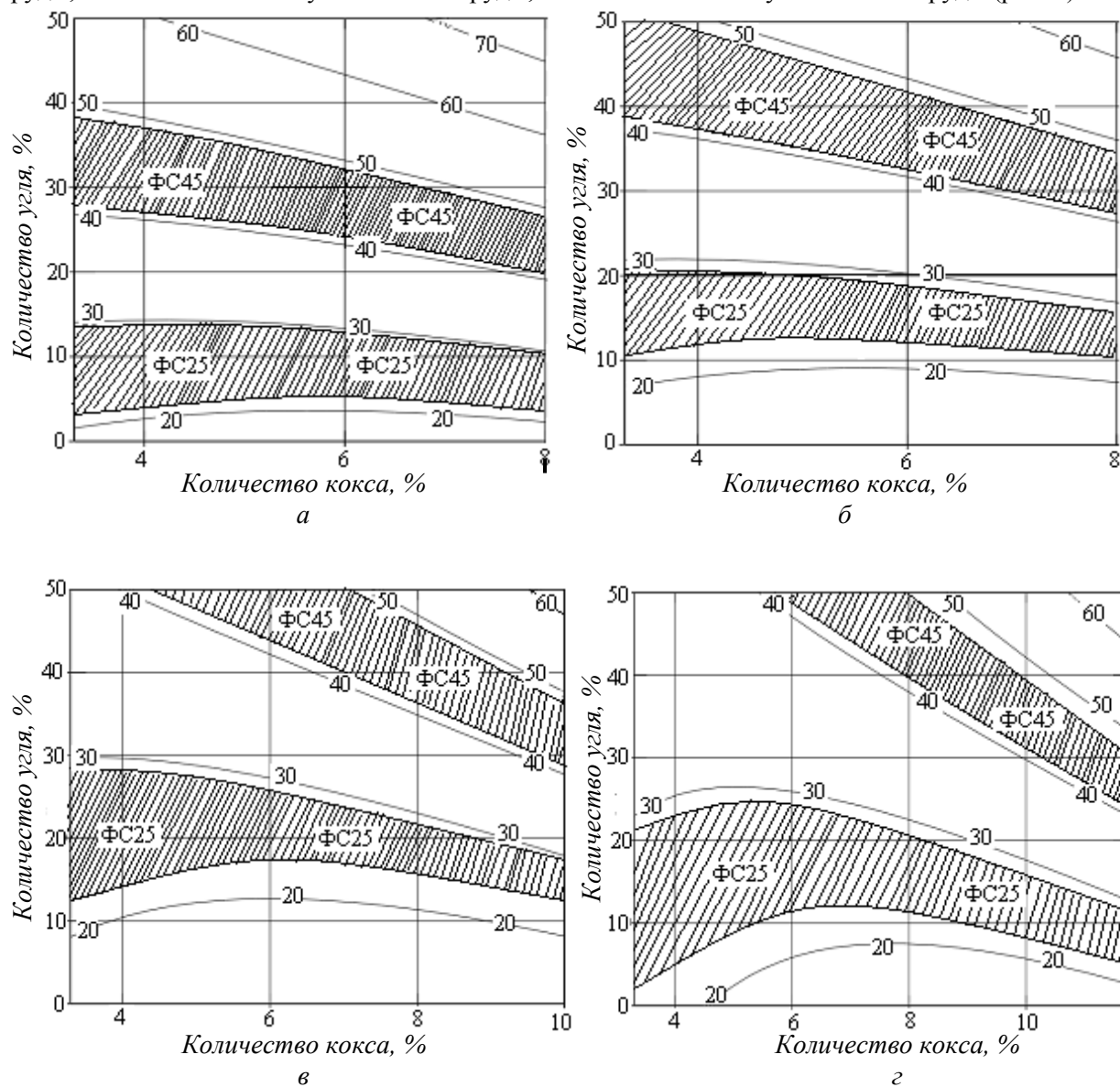
Полученные уравнения регрессии в кодированном и натуральном видах содержания кремния в сплаве путем подстановки значений натуральных коэффициентов способствуют определению оптимальных параметров процесса.

На основании результатов опытов по матрице планирования экспериментов и полученных уравнений регрессии процесса изучено влияние количества стальной стружки, кокса, угля и руды на содержание Si в выплавленном ферросилиции.

Для определения границ составов шихты на содержание кремния в ферросилиции с использованием системы Mathcad-14 были выполнены вертикальные сечения поверхности с полу-

чением изолиний содержания Si в ферросилиции с шагом в 10 %, с проекцией линий на горизонтальную плоскость. Полученные результаты приведены на рис. 2, из которого следует, что при содержании стальной стружки в шихте 10 % возможно получение ферросилиция марки ФС65 в области составов 8 % кокса и 50 % угля от массы руды. ФС45 может быть получен в области составов 8 % кокса и 30 % угля от массы руды и в области составов 8 % кокса и 15 % угля от массы руды возможно получить ФС25.

Увеличение содержания стальной стружки до 18 % позволяет получать ферросилиций марок ФС20, ФС25, ФС45 соответственно при составах шихты 1–10 % кокса и 10% угля от массы руды, 2–8 % кокса и 15 % угля от массы руды, 3–6 % кокса и 42 % угля от массы руды (рис. 2).



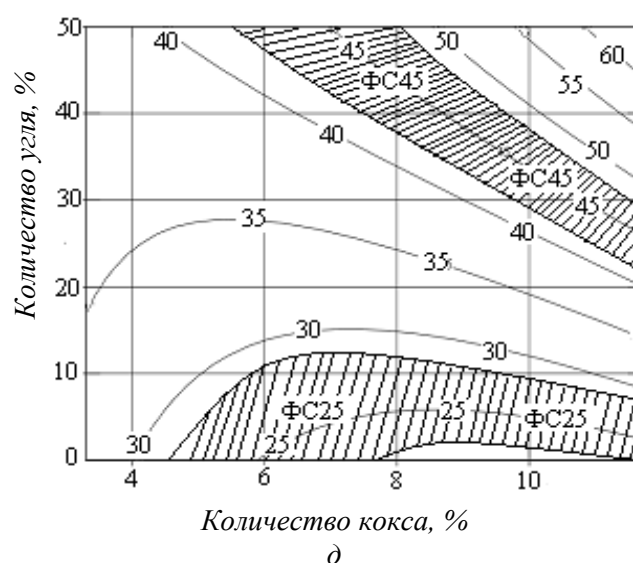


Рис. 2. Влияние количества стальной стружки, кокса и угля на форму изолиний содержания Si в ферросилиции: цифры на линиях – содержание Si (%) в ферросплаве; *а* – содержание стальной стружки 10 %; *б* – содержание стальной стружки 18 %; *в* – содержание стальной стружки 30 %; *г* – содержание стальной стружки 42 %; *д* – содержание стальной стружки 50 %

При 30%-м содержании стальной стружки в шихте от массы руды (рис. 2) ферросилиций марок ФС20, ФС25, ФС45 можно получать соответственно при составах шихты 1–10 % кокса и 15 % угля от массы руды, 2–6 % кокса и 25 % угля от массы руды, 3–8% кокса и 45 % угля от массы руды.

Дальнейшее повышение содержания железа до 42–50 % (рис. 2) снижает вероятность получения ферросилиция высоких марок. Здесь имеет место стабильное получение ферросилиция марок ФС20 и ФС25, причем большее содержание стальной стружки в шихте требует увеличения доли восстановителя в шихте в виде кокса

С экономической точки зрения необходимо выбрать такие составы шихт, которые содержали бы меньшее количество кокса и стальной стружки для получения ферросилиция большей марки. В связи с этим необходимо отметить, что наиболее оптимальной шихтой является шихта с содержанием 20–25 % железной стружки от массы руды, при плавке которой получается оптимальная марка ферросилиция с содержанием Si 45 %, что подтверждается рентгенофазовым анализом (рис. 3).

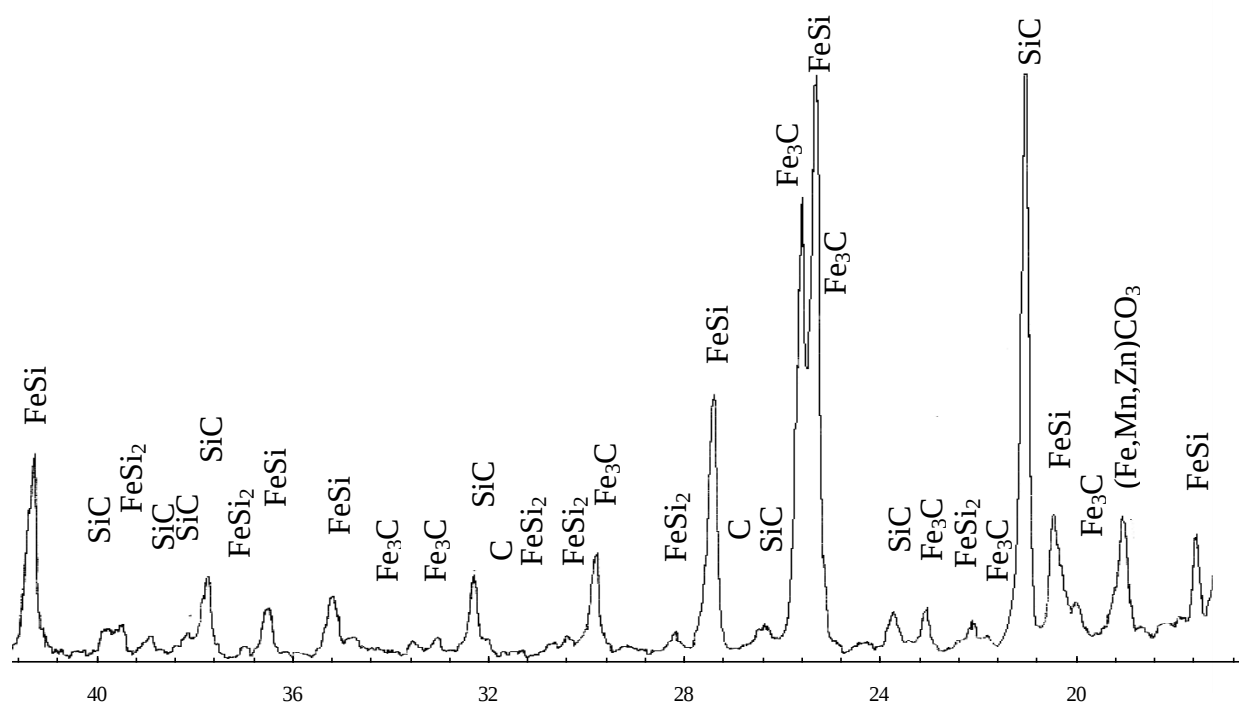


Рис. 3. Рентгенограмма ферросилиция, полученного из цинк-олигонитовой руды

Полный химический состав полученного сплава, проведенный на АО «Алюминий Казахстана» методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, приведен в табл. 3.

Таблица 3. Химический состав полученного ферросплава

Элементы	%	Элементы	%	Элементы	%	Элементы	%
Si	45,0000	Ge	0,01	La	0,0002	W	0,0122
Fe	44,9021	Se	0,0021	Ce	0,0001	Re	0,0051
Ti	0,15820	Sr	0,0021	Pr	0,0001	Os	0,0001
V	0,97820	Y	0,0004	Hf	0,0010	Ir	0,0001
Cr	3,49890	Zn	0,006	Cs	0,1218	Bi	0,0001
Co	0,17520	Pb	0,002	Ga	0,0031	C	0,5131
Ni	3,59440	Cd	0,0003	Ta	0,0020	Прочие	0,6297

Из табл. 3 видно, что содержание кремния составляет 45 % в полученном сплаве, что соответствует марке ферросилиция ФС45.

Таким образом, лабораторные исследования в виде тигельных плавок в дуговой рудно-термической печи показали, что при переработке труднообогатимых цинк-содержащих руд месторождения «Жайрем» методом электротермической плавки в руднотермической дуговой печи возможно получение ферросплава в виде ферросилиция марок от ФС20 до ФС45 и коллективных свинцово-цинковых возгонов. Необходимо отметить, что при электроплавке практически весь цинк на 99,1–99,8 % перешел в возгоны. Содержание его в ферросилиции составило 0,005–0,007 %. Свинец на 98,3–98,6 % переходит в возгоны. Концентрация его в ферросилиции не превышает 0,002 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алшанов Р.А. Казахстан на мировом минерально-сырьевом рынке: Проблемы и их решение. – Алматы, 2004. – 220с.

2. Современные тенденции применения электротермии в цветной металлургии / В.М. Парецкий, А.Д. Бессер, Б.Н. Ковалев, Б.А. Апарин // Электromеталлургия. – 2008. – № 5. – С. 6–12.
3. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. – СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2009. – 512 с.
4. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 327с.
5. Рузинов Л.П. Статистические методы оптимизации химических процессов. – М.: Химия, 1972.
6. Рузинов Л.П., Слободчикова Р.И. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1980.
7. Дымов А.М. Технический анализ руд и металлов. – М.: Металлургия, 1949. – 483 с.

Поступила 06.05.2014 г.