

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i2.01>

## Production of ferroalloys from carbonaceous rock with replacement of steel chips with magnetite

V.M. Shevko<sup>1\*</sup>, A.M. Mambetali<sup>1</sup>, G.E. Karataeva<sup>1</sup>, B.A. Lavrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

<sup>2</sup>Saint Petersburg state technological institute, St. Petersburg, Russia

\*Corresponding author: [karataevage@mail.ru](mailto:karataevage@mail.ru)

**Abstract.** The article presents the results of studies on the production of ferrosilicon, ferrosilicoaluminium and Fe-Si-Al ligatures when replacing steel chips with magnetite. The object of research was the carbonaceous rock of the Borly deposit. Thermodynamic modeling was carried out using the HSC-5.1, Chemistry software package of the Finnish metallurgical company Outokumpu, based on the principle of minimizing Gibbs energy, and experimental studies-electric melting in an arc furnace at 1000-1400°C begin to form. It was found that under equilibrium conditions, the interaction of Borly ash components with magnetite and carbon in the presence of silicon oxide with silicon-containing reduction products - Si, SiO, FeSi<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>Si, FeSi, SiC; with an increase in the amount of carbon, the degree of silicon extraction in SiC increases. in the elemental state and decreases- in Fe<sub>3</sub>Si, FeSi; the degree of silicon extraction into the alloy increases, amounting to at 2000°C and 51% carbon, and the degree of silicon transition into the alloy also increases, amounting to 76.4% at 2100°C and 51% carbon. It is determined that, from Borly ash under equilibrium conditions, it is possible to obtain ferrosilicon grades FeSi15, FeSi25, FeSi45 and FeSi50 in the temperature range 1260-1860°C and ferrosilicoaluminium grades FS45A10 and FS45A15 in the temperature range 1930-2100°C. It has been experimentally established that ferrosilicon of the FeSi60 brand (68.7% Si, 1.3% Al) is formed from the conclusions of the electric melting of coal waste together with magnetite concentrate, quartzite and coke.

**Keywords:** carbonaceous rocks, magnetite, coal thermal reduction, thermodynamic modeling, electric melting, ferrosilicon, ferrosilicoaluminium, ligature.

### 1. Введение

В Казахстане впервые в мировой практике стали использовать углистые породы для выплавки комплексного ферросплава - ферросиликоалюминия, содержащего от 42.5 до 57.5% кремния и от 7.5 до 22.5% алюминия [1-5]. Несмотря на положительные стороны технологии, она имеет ряд недостатков, в частности, невысокие значения электросопротивления, связанными с использованием в шихте стальной стружки, обладающий высокой проводимостью.

При высокой проводимости ванны электропечи электроды не заглубляются в ванну, а перемещается в верхние горизонты. Это приводит к вскрытию колошника и увеличению потерь кремния с газовой фазой в виде монооксида кремния (SiO). Для уменьшения потерь кремния с газами необходимо увеличить сопротивление ванны, например заменой стальной стружки на другой железосодержащий материал, например магнетитовый концентрат. Замена стальной стружки магнетитом позволяет сократить потребление этого дефицитного материала. В статье приводятся результаты исследований по влиянию температуры и углерода на возможность получения ферросплавов, содержащих Si и Al из углистой породы с заменой стальной стружки на магнетит.

### 2. Методы исследования

Исследования проводили методом термодинамического моделирования с использованием программного ком-

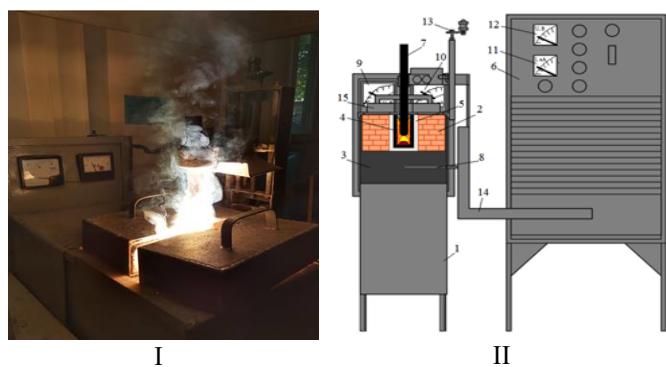
плекса HSC-6.0 [6], а также электроплавкой углистой породы в дуговой печи.

Разработчики программного комплекса HSC-6.0 Chemistry (OutokumpuResearchOy (Финляндия)) [6], основывались на идеологии консорциума SGTE (ScientificGroupThermodataEurope), которая занимается созданием, получением и распространением качественных баз термодинамических данных для расчетов равновесного состава химически реагирующих систем, а также объединением усилий исследователей с целью унификации термодинамических данных и методов их получения. В состав SGTE входят специализированные научные центры Германии, Канады, Франции, Швеции, Великобритании и США ([www.sgte.org](http://www.sgte.org)). Расчет равновесия основывается на принципе минимума энергии Гиббса. При работе с комплексом HSC-5.1 первоначальная информация получается в виде количественного (кг) распределения веществ в исследуемой системе. Определение равновесной степени распределения элементов ( $\alpha_{Me}$ , %) в исследуемой системе проводилось с использованием алгоритма, разработанного на кафедре "Металлургия" Южно-Казахстанского университета [7].

Термодинамическое исследование проводили, используя золу углистой породы Борлинского месторождения, содержащую масс. %: 65SiO<sub>2</sub>, 32Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.5Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, 0.5MgO. Количество углерода изменяли от 48 до 51% от массы золы, а количество магнетита оставалось постоян-

ным. В золе массовое отношение Si/Al составляет  $65 \cdot (28/60) / 32 \cdot 54 / 102 = 1.79$ , что меньше для ферросилико-алюминия, в котором это отношение составляет  $>1.9$ . Например для ФС45А10 оно равно 3.4-6.3, для ФС55А20 - 1.9-2.7 [8]. Поэтому в состав шихты при термодинамическом моделировании ввели 10% SiO<sub>2</sub> от массы зола. Рудная часть шихты содержала, кг: 75SiO<sub>2</sub>, 32Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.5Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1CaO, 0.5MgO и 34Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Элементное железо в шихте не использовалось. Вместо него использовали смесь Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и С.

Электроплавка углистой породы месторождения Борлы (37.8% SiO<sub>2</sub>, 19.5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2.4% CaO, 0.5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.3% MgO, 0.6% TiO<sub>2</sub>, 22.7% С, 1.3% Н<sub>2</sub>O, 14.9% летучие) проводилась в дуговой однофазной печи переменного тока. Фотография печи показана на рисунке 1.



**Рисунок 1. Одноэлектродная дуговая электропечь: I – общий вид; II – эскиз печи с конструктивными узлами: 1 - кожух печи, 2 - хромомагнетитовая футеровка, 3-углеграфитовая подина, 4-графитовый тигель, 5-углеграфитовая «подушка», 6-трансформатор ТДЖФ-1002, 7 - графитовый электрод, 8 - нижний токоподвод, 9-12 - контролируемые амперметры и вольтметры, 13 - механизм перемещения электрода, 14-гибкая часть короткой сети, 15 - крышка печи**

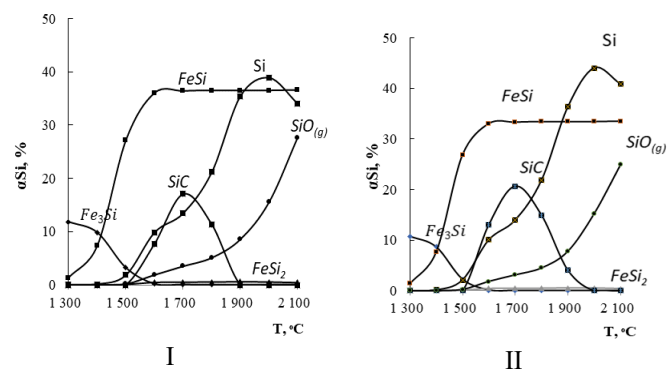
Плавку проводили в графитовом тигле диаметром 10 см и высотой 20 см. Тигель устанавливался на углеграфитовую подину, к которой была подведена нижняя шина от трансформатора. Пространство между тиглем и хромомагнетитовой футеровкой было заполнено графитовой крошкой. Верхний электрод - углеграфитовый диаметром 4.5 см. К нему была подведена верхняя шина от печного трансформатора ТДЖФ-1002 мощностью 45 кВ·А. Перед плавкой магнетитовый концентрат (ТОО "Iron Concentrate Company") (85.9% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 9.4% SiO<sub>2</sub>, 1.2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.8% CaO) окомковывался совместно с бентонитовой глиной (4% от массы углистых пород). Гранулы диаметром 1-1.5 см сушили при 150-170°С в течение 45-50 минут. Кокс (86.0% С, 4.9% SiO<sub>2</sub>, 2.2% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.8% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.5% CaO, 0.4% MgO, 0.8% S, 1.1% Н<sub>2</sub>O, 1.3% летучие) дробился до фракции 0.5-1 см. Масса шихты составляла 2.2-2.3 кг.

Предварительно пыль разогревалась электрической дугой в течение 40-50 минут при напряжении 40-45В и силе тока 400-500А. Первая порция шихты (700-750г) проплавлялась в течение 4-6 минут при напряжении 20-30В и силе тока 450-550А. Затем последовательно проплавлялись еще две порции шихты. Общая продолжительность составила 45-55 минут. После плавки тигель охлаждался в печи в течение 4 часов, извлекался из печи и охлаждался на воздухе 3-4 часа. Затем тигель разбивался и его содержимое сортировалось на сплав и остаток.

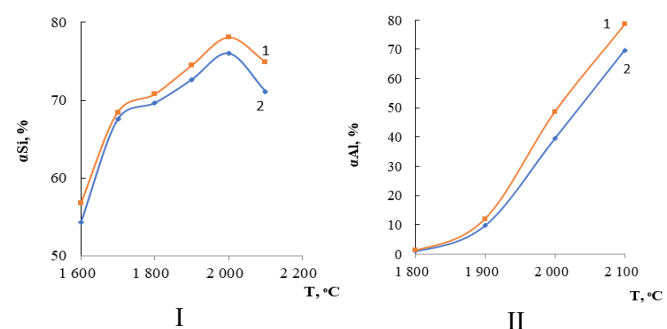
Содержание элементов в сплаве определялось на электронном микроскопе JSM-6490LV (Япония). Степень извлечения металлов в сплав (%) определялось отношением массы металла в сплаве к массе металла в шихте.

### 3. Результаты исследований

На рисунке 2 и 3 показано влияние температуры, углерода на равновесную степень распределения кремния (в Fe<sub>3</sub>Si, FeSi<sub>2</sub>, FeSi, Si, SiC и SiO(g)).



**Рисунок 2. Влияние температуры и количества углерода на равновесную степень распределения кремния в кремнийсодержащие вещества в системе зола Борлы-магнетит-углерод 10%SiO<sub>2</sub> при давлении 1бар: I-48% углерода, II-52% углерода**



**Рисунок 3. Влияние температуры и углерода на равновесную степень извлечения в сплав кремния(I) и алюминия (II) в системе зола Борлы-магнетит-углерод 10%SiO<sub>2</sub> при давлении 1бар: 1-48% углерода, 2-52% углерода**

Fe<sub>3</sub>Si начинается появляться при 1000°С и уже при 1300°С  $\alpha_{Si}(Fe_3Si)$  составляет 10.6%. Образование FeSi происходит в температурном интервале 1200-2100°С, кремния при 1400-2100°С. В этом температурном интервале формируется и нежелательное вещество SiO(g). FeSi<sub>2</sub> и SiC начинают появляться при T > 1500°С. Если при 1700°С равновесная степень распределения кремния образует ряд:  $\alpha_{Si}(FeSi) > \alpha_{Si}(SiC) > \alpha_{Si}(Si) > \alpha_{Si}(SiO)$ , то при 2000°С ряд имеет вид:  $\alpha_{Si}(Si) > \alpha_{Si}(FeSi) > \alpha_{Si}(SiO)$ . Увеличение количества углерода от 48 до 51% от массы зола Борлы приводит к возрастанию  $\alpha_{Si}(Si)$  на 5.1%,  $\alpha_{Si}(SiO)$  на 2.3%,  $\alpha_{Si}(SiC)$  на 3.6% и к уменьшению  $\alpha_{Si}(FeSi)$  на 3.1%. Из рисунка видно, что увеличение количества углерода приводит к возрастанию  $\sum Si(спл)$  на 2% в температурном интервале 1800-2100°С и алюминия в сплав при 2000-2100°С на 6-10%. Уменьшение степени перехода кремния в сплав при T > 2000°С связано с развитием процесса перехода его в газообразный монооксид (SiO(g)). Максимально на (78%) кремний переходит в сплав при 51% углероде и 2000°С, а алюминий (на 76.4%) при 2100°С.

Для определения марки формируемого ферросплава был построен рисунок 4, из которого видно, что в зависимости от температуры из золы углистой породы Борлы может быть образованы ферросилиций марок FeSi15, FeSi25, FeSi45 и FeSi50 [9], а также ферросиликоалюминий марок ФС45А10, ФС45А15 [7] и Fe-Si-Al лигатура [10].

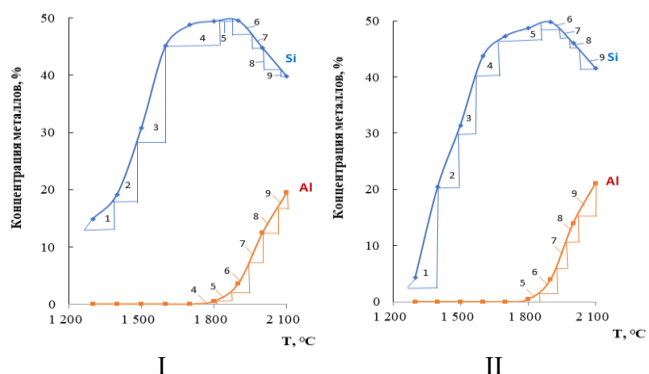


Рисунок 4. Влияние температуры и углерода на концентрацию металлов в сплаве: I-48% углерода, II-52% углерода

В таблицах 1 и 2 показаны температурные области формирования ферросплавов из золы Борлы, а также степень извлечения Si и Al в сплав и концентрацию в нем металлов при 48 и 52% углерода от массы золы.

Таблица 1. Технологические параметры образования ферросплавов из золы Борлы при замене железа на магнетит в присутствии 48% углерода

| Область на рисунке 4 | Температура, °С | Содержание в сплаве, % |           | Степень извлечения в сплав, % |           | Марка сплава                                  |
|----------------------|-----------------|------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|---|
|                      |                 | Si                     | Al        | Si                            | Al        |   |
| 1                    | 1290-1390       | 14-20                  | М         | 11,3-17,4                     | М*        | FeSi15  |
| 2                    | 1390-1480       | 20-30                  | М         | 17,4-32,3                     | М         | FeSi25  |
| 3                    | 1480-1600       | 30-41                  | М         | 32,3-53,5                     | М         | Немарочный ферросилиций                       |
| 4                    | 1600-1820       | 41-48                  | 0-0,5     | 53,5-65,4                     | 0,0-2,9   | FeSi45  |
| 5                    | 1820-1880       | 48-49                  | 0,5-2,0   | 65,4-70,7                     | 2,9-8,3   | FeSi50  |
| 6                    | 1880-1950       | 48-49                  | 2,0-7,5   | 70,7-74,2                     | 8,3-27,3  | Fe-Si-Al лигатура с пониженным содержанием Al |
| 7                    | 1950-2000       | 48-45                  | 7,5-12,5  | 74,2-76,2                     | 27,3-38,0 | Фс45А10                                       |
| 8                    | 2000-2075       | 45-42,5                | 12,5-17,5 | 76,2-72,0                     | 38,0-63,4 | ФС45А15                                       |
| 9                    | 2075-2100       | 42,5-40,0              | 17,5-19,8 | 72,0-70,0                     | 63,4-68,8 | Fe-Si-Al лигатура с повышенным содержанием Al |

\*М-<0.1%

Из приведенного материала следует, что в зависимости от температуры из золы углистой породы месторождения Борлы возможно получение ферросилиция, ферросиликоалюминия и лигатура, содержащий кремний и алюминий. Ферросилиций марок FeSi15, FeSi25, FeSi45 и FeSi50 образуется в температурной области от 1260-1290°C до 1860-1880°C. Затем в температурной области от 1860-

1880°C до 1910-1950°C образуется лигатура, содержащая от 2 до 7.5% Al и 48-49.9% кремния.

Таблица 2. Технологические параметры образования ферросплавов из золы Борлы при замене железа на магнетит в присутствии 51% углерода

| Область на рисунке 4 | Температура, °С | Содержание в сплаве, % |           | Степень извлечения в сплав, % |           | Марка сплава                                  |
|----------------------|-----------------|------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|---|
|                      |                 | Si                     | Al        | Si                            | Al        |   |
| 1                    | 1260-1400       | 14-20                  | М         | 10,9-16,5                     | М*        | FeSi15  |
| 2                    | 1400-1490       | 20-30                  | М         | 16,5-31,8                     | М         | FeSi25  |
| 3                    | 1490-1570       | 30-41                  | М         | 31,8-50,8                     | М         | Немарочный ферросилиций                       |
| 4                    | 1570-1680       | 41-48                  | М         | 50,8-69,7                     | М         | FeSi45  |
| 5                    | 1680-1860       | 48-49,9                | 0,0-2,0   | 69,7-72,3                     | 0,0-6,3   | FeSi50  |
| 6                    | 1860-1930       | 49,9-49,0              | 2,0-7,5   | 72,3-74,6                     | 6,3-24,7  | Fe-Si-Al лигатура с пониженным содержанием Al |
| 7                    | 1930-1970       | 49-47,5                | 7,5-12,5  | 74,6-77,1                     | 24,7-36,6 | Фс45А10                                       |
| 8                    | 1970-2050       | 47,5-44,0              | 12,5-17,5 | 77,1-78,0                     | 36,6-64,2 | ФС45А15                                       |
| 9                    | 2050-2100       | 44,0-41,4              | 17,6-21,1 | 78,0-74,4                     | 64,2-76,4 | Fe-Si-Al лигатура с повышенным содержанием Al |

\*М-<0.1%

Целевой продукт технологии – ферросиликоалюминий образуется в температурной области от 1930-1950°C до 2050-2075°C. Ферросиликоалюминий марки ФС45А10 содержит 7.5-12.5% Al и 47.5-49.0% Si, а ФС45А15-12.5-17.5% Al и 44-47.5% Si. При более высоких температурах (> 2050-2075°C) из золы Борлы образуется сплав, содержащий 41.4-44.0% Si и 17.5-21.1% Al, который можно отнести к лигатуре с повышенным содержанием алюминия.

Необходимо отметить, что при получении марочного ферросиликоалюминия степень кремния составила 72-78%, алюминия 24.7-76.4%. Причем с увеличением количества углерода ферросиликоалюминий образуется с повышенным содержанием алюминия, что связанное с увеличением количества восстанавливаемого алюминия.

Электроплавка проводилась с двумя шихтами:

1. Углистая порода-1кг, кварцит-0.4кг, магнетитовый концентрат-0.6кг, кокс-0.25 кг.

2. Углистая порода-1кг, кварцит-0,4 кг, магнетитовый концентрат-0.6 кг, кокс-0.3 кг.

Первая шихта была составлена для получения ферросилиция марки FeSi65, а вторая- ферросиликоалюминия марки ФС45А10.

На рисунке 5 показаны РЭМ-анализы полученных ферросплавов.

Из рисунка 5 видно, что выплавленные сплавы содержат углерод и кислород. Присутствие этих элементов объясняется тем, что при тигельной электроплавке шихты происходило неполное разделение сплава от шлаковых и шихтовых включений. В производственных условиях непрерывной плавки шихты и отработанного режима охлаждения сплава шлаковые включения в нем практически отсутствуют [10].



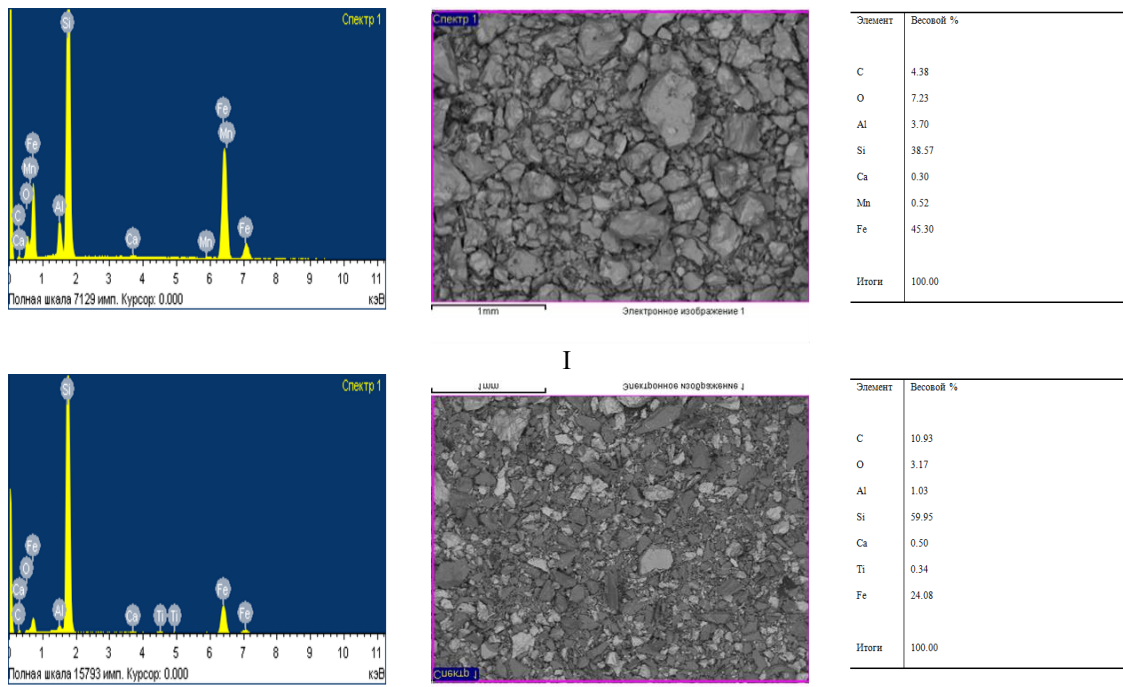


Рисунок 5. РЭМ-анализы сплавов: I-Сплав из первой шихты, II-Сплав из второй шихты

Промышленный ферросплав содержит не более 1,0% углерода [11]. Поэтому для установления истинного содержания Si и Al в сплавах необходимо провести перерасчет их содержаний по РЭМ-анализу без учета кислорода и углерода. Перерасчет проведенными по формулам для ферросилиция при низком содержании алюминия:  $A_{Si}/M_{O_2}$

$$C_{Si} = \frac{C_{Si(p)} - C_{O(p)} * \frac{A_{Si}}{M_{O_2}}}{100 - C_{O(p)} - C_{C(p)} - C_{O(p)} * \frac{A_{Si}}{M_{O_2}}} \quad (1)$$

$$C_{Al} = \frac{C_{Al(p)}}{100 - C_{O(p)} - C_{C(p)} - C_{O(p)} * \frac{A_{Si}}{M_{O_2}}} \quad (2)$$

Для сплавов, содержащих кремний и алюминий:

$$C_{Si} = \frac{C_{Si(p)} - C_{O(p)} * 0,9 * \frac{A_{Si}}{M_{O_2}}}{100 - C_{O(p)} - C_{C(p)} - C_{O(p)} * 0,9 * \frac{A_{Si}}{M_{O_2}} - C_{O(p)} * \frac{2A_{Al}}{1,5M_{O_2}}} \quad (3)$$

$$C_{Al} = \frac{C_{Al(p)} - C_{O(p)} * 0,1 * \frac{2A_{Al}}{1,5M_{O_2}}}{100 - C_{O(p)} - C_{C(p)} - C_{O(p)} * 0,9 * \frac{A_{Si}}{M_{O_2}} - C_{O(p)} * \frac{2A_{Al}}{1,5M_{O_2}}} \quad (4)$$

Исходя из выражений 3 и 4 концентрация кремния и алюминия в первом сплаве составляет соответственно 68.7% и 1.3%, а для второго концентрация кремния 40.1% и алюминия 3.5%.

Из полученных расчетов видно, что в первом сплаве по содержанию кремния (68.7%) и алюминия (1.3%) он составляет ферросилицию марки FeSi65 [9]. Второй сплав можно отнести к Fe-Si-Al лигатуре [10], в которой  $\Sigma Si$  и Al составляет 43.6%. По всей вероятности, такое содержание металлов во втором сплаве, связанное тем,

что при плавке второй шихты в печи получил развитие дуговой режим с открытием колошника и потерями Si и Al в виде  $SiO_T$  и  $Al_T$ .

#### 4. Выводы

По результатам исследований по влиянию температуры и углерода на возможность получения ферросплавов, содержащих Si и Al из углистой породы с заменой стальной стружки на магнетит, можно сделать следующие выводы, что:

1. В равновесных условиях при взаимодействии золы углеотходов Борлы с магнетитом:

- кремнийсодержащими продуктами являются  $Fe_3Si$ ,  $FeSi_2$ ,  $FeSi$ ,  $Si$ ,  $SiO_T$ ,  $SiC$ .

- формирование ферросилиция марок FeSi15, FeSi25, FeSi45 и FeSi50 происходит в температурном интервале 1260-1860°C и ферросиликоалюминия марок ФС45А10 и ФС45А15 при 1930-2100°C при извлечении Si в сплав на 72-78% и алюминия до 76.4%.

2. При электроплавке углеотходов Борлы совместно с магнетитовым концентратом, кварцитом и коксом образуется ферросилиций марки FeSi60 (68.7%Si, 1.3%Al) и лигатура, содержащая 40%Si и 3.5%Al.

#### Литература / References

[1] Abishev, D.N., Zharmenov, A.A., Baysanov, S.O., Tolymbekov, M.Zh. & Akhmetov, A.B. (2002). Razrabotka tekhnologii i osvoineniye proizvodstva ferrosilikoaliuminiya. *Complex use of mineral resources*, 370-372

[2] Baysanov, S.O., Tolymbekov, M.ZH., Akhmetov, A.B., Zhakibekov, T.B. & Chekimbayev, A.F. (2001). Polucheniye ferrosilikoaliuminiya iz vysokozol'nykh uglistykh porod. *Sovremennyye problemy metallurgii. Dnepropetrovsk: DNER «Sistemitekhologii»*, 2, 248-251

- [3] Chekimbayev, A.F., Baysanov, S.O., Tolymbekov, M.Zh., Akhmetov, A.B., Amurgalinov, B.A. & Zharmenov, A.A. (2003). Teoreticheskiye i tekhnologicheskkiye issledovaniya po razrabotke tekhnologii i osvoyeniya proizvodstva ferrosilikoaliuminiya. *Vestnik KarGTU*, 31-33
- [4] Baysanov, S.O., Tolymbekov, M.Zh., Zharmenov, A.A., Chekimbayev, A.F. & Terlikbayeva, A.Zh. (2008). Izyskaniye novykh vidov uglistykh porod dlya vyplavki ferrosilikoaliuminiya. *Stal'*, 8, 59-61
- [5] Adylkhanov, Zh.S., Tolymbekov, M.Zh., Baysanov, S.O. & Chekimbayev, A.F. Sovershenstvovaniye tekhnologii vyplavki ferrosilikoaliuminiya. *Vestnik KarGTU*, 1(30), 30-32
- [6] Udalov, Yu.P. (2012). Primeneniye programmnykh kompleksov vychislitel'noy i geometricheskoy termodinamiki v proyektirovaniy tekhnologicheskikh protsessov neorganicheskikh veshchestv. *SPb.: SPbGTI (TU)*
- [7] Shevko, V.M., Serzhanov, G.M., Karatayeva, G.Ye. & Amanov, D.D. (2019). Raschet ravnovesnogo raspredeleniya elementov primenitel'no k programmnomu kompleksu HSC-5.1. Svidetel'stvo o vnesenii svedeniy v gosudarstvennyy reyestr prav na ob'yekty, okhranyayemye avtorskim pravom. *Programma dlya EVM. RK №1501*
- [8] Ferrosilikoaliuminiy. TU 0820-011-14513884-2013. *Yekaterinburg: LLC «UIS»*
- [9] Ferrosilitsiy. Tekhnicheskkiye trebovaniya i usloviya postavki. (2011). *GOST 1415-93. M.: Standartinform*
- [10] Gasik, M.I., Lakishev, N.P. (1999). Teoriya i tekhnologiya elektrometallurgii ferrosplavov. *M.: SP Intermet Inzhiniring*
- [11] Yemlin, B.I., Gasik, M.I. (1978). Spravochnik po elektrotermicheskim protsessam. *M.: Metallurgiya*

## Болат жоңқаларды магнетитке ауыстыра отырып, көмірлі жыныстардан ферроқорытпалар алу

В.М. Шевко<sup>1\*</sup>, А.М. Мамбетали<sup>1</sup>, Г.Е. Каратаева<sup>1</sup>, Б.А. Лавров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

<sup>2</sup>Санкт-Петербург мемлекеттік технологиялық институты, Санкт Петербург, Ресей

\*Corresponding author: [karataevage@mail.ru](mailto:karataevage@mail.ru)

**Андатпа.** Мақалада болат жаңқаларын магнетитке ауыстыру кезінде ферросилиций, ферросиликоалюминий және Fe-Si-Al лигатурасын алу бойынша зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Зерттеу нысаны Борлы кен орнының көмірлі жынысы болды. Термодинамикалық модельдеу Гиббс энергиясын азайту принципіне негізделген Финдік Outokumpu металлургиялық компаниясының HSC-5.1 Chemistry бағдарламалық кешенін қолдану арқылы жүргізілді, ал 1000-1400°C кезінде доғалы пеште электрмен балқыту эксперименталды зерттеулер қалыптаса бастайды. Тепе-теңдік жағдайында Борлы күлі компоненттерінің магнетит пен көміртектің кремний оксидінің қатысуымен әрекеттесетіні анықталды. құрамында кремний бар тотықсыздану өнімдері - Si, SiO, FeSi<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>Si, FeSi, SiC; көміртегі мөлшерінің жоғарылауымен кремнийдің SiC-ға бөліну дәрежесі жоғарылайды. Элементарлық күйге түсіп, азаяды - Fe<sub>3</sub>Si, FeSi; бұл жағдайда кремнийдің қорытпаға бөліну дәрежесі артып, 2000°C және 51% көміртекті құрайды, сонымен қатар кремнийдің қорытпаға ауысу дәрежесі 2100°C және 51% көміртекте 76.4% құрайды. Тепе-теңдік жағдайында Борлы күлінен 1260-1860°C температуралық интервалда ферросилицидің FeSi15, FeSi25, FeSi45 және FeSi50 маркаларының және 1930-2100°C температуралық интервалда ферросиликоалюминийдің FC45A10 және FC45A15 маркаларының алуға болатындығы анықталды. Борлы көмір қалдықтарын магнетит концентратымен, кварцитпен және кокспен бірге электрмен балқыту кезінде FeSi60 маркалы ферросилиций (68.7% Si, 1.3% Al) түзілетіні тәжірибе жүзінде анықталды.

**Негізгі сөздер:** көмір жыныстары, магнетит, көмір термиялық қалпына келтіру, термодинамикалық модельдеу, электрмен балқыту, ферросилиций, ферросиликоалюминий, лигатура.

## Получение ферросплавов из углистой породы с заменой стальной стружки на магнетит

В.М. Шевко<sup>1\*</sup>, А.М. Мамбетали<sup>1</sup>, Г.Е. Каратаева<sup>1</sup>, Б.А. Лавров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт Петербург, Россия

\*Corresponding author: [karataevage@mail.ru](mailto:karataevage@mail.ru)

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследований получения ферросилиция, ферросиликоалюминия и Fe-Si-Al лигатуры при замене стальной стружки на магнетит. Объектом исследований явилась углистая порода Борлинского месторождения. Термодинамическое моделирование проводилось с использованием программного комплекса HSC-6.0, Chemistry финской металлургической компании Outokumpu, основанного на принципе минимизации энергии Гиббса, а экспериментальные исследования - электроплавкой в дуговой печи при 1000-1400°C начинают образовываться

ваться. Установлено, что в равновесных условиях взаимодействие компонентов золы Борлы с магнетитом и углерода в присутствии оксида кремния при кремнийсодержащих продуктах восстановления - Si, SiO, FeSi<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>Si, FeSi, SiC; с повышением количества углерода повышается степень извлечения кремния в SiC. В элементное состояние и уменьшается - в Fe<sub>3</sub>Si, FeSi; степень извлечения кремния в сплав при этом возрастает, составляя при 2000°C и 51% углерода, также и возрастает степень перехода кремния в сплав, составляя 76.4% при 2100°C и 51% углерода. Определено что, из золы Борлы в равновесных условиях, возможно получение ферросилиция марок FeSi15, FeSi25, FeSi45 и FeSi50 в температурном интервале 1260-1860°C и ферросиликоалюминия марок ФС45А10 и ФС45А15 в температурном интервале 1930-2100°C. Экспериментально установлено, что из выводов при электроплавке углеотходов Борлы совместно с магнетитовым концентратом, кварцитом и коксом образуется ферросилиций марки FeSi60(68.7%Si, 1.3% Al).

**Ключевые слова:** углистые породы, магнетит, углетермическое восстановление, термодинамическое моделирование, электроплавка, ферросилиций, ферросиликоалюминий, лигатура.