

СТАТЬИ

УДК 669.15-198:669...3

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОСПЛАВА, КАРБИДА КАЛЬЦИЯ
ИЗ ДОМЕННОГО ШЛАКА С ЗАМЕНОЙ СТАЛЬНОЙ СТРУЖКИ
НА МАГНЕТИТОВЫЙ КОНЦЕНТРАТ**

Шевко В.М., Бадикова А.Д., Тулеев М.А., Аманов Д.Д., Капсальямов С.А.

*Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, Шымкент,
e-mail: shevkovm@mail.ru*

В статье приводятся результаты исследований по получению ферросплава и карбида кальция из шихты, содержащей доменный шлак (37,2%SiO₂, 34,4%CaO, 14%Al₂O₃), магнетитовый концентрат (83,9% Fe₂O₃, 9,4%SiO₂). Исследования проводились методом термодинамического моделирования и электроплавкой в руднотермической дуговой печи. Установлено, что в равновесных условиях для достижения степени перехода кремния и алюминия в сплав соответственно на 85,4–86,0 и 70–82,2%, кальция в карбид кальция на 45–51,7% процесс необходимо проводить в температурном интервале 2016–2075,5 °С в присутствии 51,7–54,0% углерода (при этом суммарная концентрация Si и Al в сплаве составляет 47,6–49,1%; процесс электроплавки необходимо проводить в течение 30–50 минут, при этом степень перехода кремния и алюминия в сплав составляет соответственно 60–84% и 70–79%, кальция в карбид кальция 72–77% (суммарная концентрация Si и Al – 34–49%), а литраж карбида кальция 236–250 дм³/кг; на укрупнено-лабораторной установке при электроплавке шихты, состоящей из 47% шлака, 34% коксика и 19% магнетитового концентрата со сливом продуктов плавки получен ферросплав, содержащий 47–60% Σ Si и Al, карбид кальция литражом 230–270 дм³/кг, при этом из шихты в сплав перешло 83,3%Si и 76,8%Al, Ca в карбид кальция – 72,6%, Zn и Pb в возгоны соответственно 98,0 и 92,2%.

Ключевые слова: доменный шлак, углетермическое восстановление, термодинамическое моделирование, электроплавка, карбид кальция, ферросплав

**THERMODYNAMIC EXPLANATION AND TECHNOLOGY FOR PRODUCING
FERROALLOY, CALCIUM CARBIDE FROM BLAST FURNACE SLAG
WITH REPLACEMENT OF STEEL SHAVINGS TO MAGNETITE CONCENTRATE**

Shevko V.M., Badikova A.D., Tuleev M.A., Amanov D.D., Kapsalyamov S.A.

*M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent,
e-mail: shevkovm@mail.ru*

The article presents the results of research on the production of ferroalloy and calcium carbide from a mixture containing blast furnace slag (37.2% SiO₂, 34.4% CaO, 14% Al₂O₃), magnetite concentrate (83.9% Fe₂O₃, 9.4% SiO₂). The researches were conducted out by thermodynamic modeling and electric smelting in an ore-thermal arc furnace. It was found that under equilibrium conditions, in order to achieve the degree of transition of silicon and aluminum to alloy by 85.4-86.0 and 70-82.2%, respectively, calcium to calcium carbide by 45-51.7%, the process must be carried out in the temperature range 2016 -2075.5 °C in the presence of 51.7-54.0% carbon (the total concentration of Si and Al in the alloy is 47.6-49.1%; the electric melting process must be carried out for 30-50 minutes, while the degree the transition of silicon and aluminum to the alloy is 60-84% and 70-79%, respectively, of calcium to calcium carbide 72-77% (the total concentration of Si and Al is 34-49%), and calcium carbide runoff 236-250 dm³/kg; in an enlarged laboratory installation, the mixture was electrically melted, consisting of 47% slag, 34% coke and 19% magnetite concentrate with the discharge of melting products, a ferroalloy containing 47-60% Σ Si and Al was obtained calcium carbide with a displacement of 230-270 dm³/kg, while 83.3% Si and 76.8%Al went from charge to alloy, Ca to 72.6% calcium carbide, Zn and Pb 98.0 and 92.2% respectively.

Keywords: blast furnace slag, carbon thermal reduction, thermodynamic modeling, electric smelting, calcium carbide, ferroalloy

В соответствии с [1, 2] удельный выход доменных шлаков составляет 455–481 кг на 1 т чугуна. Переработка шлаков организована несколькими методами [1, 3, 4] с получением цемента [5], пемзы, щебня [6], волокна, минеральной ваты [7], шлакоцисталлов, литых изделий, шлакобетонов [8–9], удобрений [10], ферросплавов [11, 12]. Однако доменный шлак используется не полностью, например в Российской Федера-

ции до 17% доменного шлака в середине 20-х гг. текущего столетия хранилась в отвалах. Исходя из того, что основная часть передельного и литейного доменного шлака состоит из CaO (34–50%), SiO₂ (32–42%), Al₂O₃ (6–15%) [1] нами разработан электро-термический метод совместного получения из доменного (передельного и литейного) шлака ферросплава (содержащего Si, Al, Fe) и карбида кальция [12]. обязательным ших-

товым компонентом этого способа является стальная стружка (13–16% от массы шлака). В виду наблюдаемого в настоящее время дефицита и сравнительной дороговизны (до 14000 руб/т [13]) стальной стружки возникает необходимость замены ее на другой железосодержащий материал, например на магнетитовый концентрат, получаемый на ТОО «Iron Concentrate Company» из хвостов флотации медьсодержащих руд [14]. Концентрат преимущественно (на 85–88%) состоит из Fe_3O_4 и из 8–10 SiO_2 %.

Цель исследования: определение возможности замены стальной стружки на магнетитовый концентрат при электроплавке доменного шлака с получением ферросплава и карбида кальция.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились методами термодинамического моделирования и электроплавкой в дуговой печи. Термодинамическое моделирование проводилось с использованием программного комплекса HSC-5.1 основанного на принципе минимума энергии Гиббса [15]. Электроплавку шихты проводили в графитовом тигле ($d = 6$ см, $h = 12$ см) одноэлектродной дуговой печи. Электроэнергия в печь подавалась от трансформатора ТДЖФ-1002. Необходимая мощность поддерживалась терристорным регулятором. После электроплавки горячий тигель извлекали из печи и охлаждали в течение 5–6 часов. Затем графитовый тигель разбивали. Карбид и ферросплав взвешивали и анализировали на Fe, Si, Ca и Al.

Анализ сырья и продуктов электроплавки проводился методом растровой электронной микроскопии (прибор JSM-6490LM (Япония)), атомно-адсорбционным методом (прибор AAS-1N, (Германия)). Концентрация Si + Al в сплаве определялась также пикнометрическим методом (через плотность) по уравнениям, опубликованными нами в [16].

Степень извлечения кремния и алюминия в сплав определялась отношением массы металла в сплаве к массе металла в шихте. Степень извлечения кальция в технический карбид кальция (α_{Ca} , %) определялась отношением массы Ca в карбиде кальция к массе кальция в шихте. Концентрация CaC_2 в техническом карбиде кальция, определяется из выражения:

$$C_{\text{CaC}_2} = L / 372, \quad (1)$$

в котором L – литраж карбида кальция, $\text{дм}^3/\text{кг}$ (определяется экспериментально по методике [17]).

В работе использовали: доменный шлак АО «Арселор Миталл Темиртау», содержащий 37,2% SiO_2 , 34,4% CaO , 14,0% Al_2O_3 , 11,8% MgO , 1,7% BaO , 0,6% FeO , 0,5% MnO ; кокс (85,65C, 4,6% SiO_2 , 1,4% CaO , 0,3% MgO , 2,0% Al_2O_3 , 2,3% Fe_2O_3 , 0,7% S, 1,2% H_2O , 1,2% – прочие); магнетитовый концентрат ТОО «Iron Concentrate Company» (83,9% Fe_3O_4 , 9,4% SiO_2 , 1,8% CaO , 1,2% Al_2O_3 , 0,2% ZnO , 0,4% PbO , 1,1% прочие (K_2O , Na_2O , MnO , SO_3 , S, H_2O)). При электроплавке отношение доменный шлак: магнетитовый концентрат составляло 2,8.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показано влияние температуры на равновесную степень распределения (α , %) некоторых элементов в системе доменный шлак (ДШ) – магнетитовый концентрат – углерод (ДШ-МК-У) при 48% углерода от массы $\Sigma_{\text{ДШ и МК}}$. Видно, что максимальная α_{Si} в FeSi (48,7%) отмечается при 2100 °С.

Температура начала формирования карбида кальция составляет 1800 °С. Максимально (37,1%) α_{Ca} в CaC_2 отмечается при 2000 °С, а алюминий в элементное конденсированное состояние (76,9%) – при 2100 °С. Цинк переходит практически полностью (98,7%) в возгоны при 1700 °С. Свинец переходит в газ хуже, чем цинк. Так, при 1800 °С α_{Pb} в газ составляет только 38,5%. Из табл. 1 следует, что при 1900–2000 °С концентрация Si и Al в сплаве составляет соответственно 37,7–36,9% и 4,6–9,5%. При этом $\Sigma C_{\text{Si и Al}} = 42,6–46,6\%$, а переход Si в сплав ($\alpha_{\text{Si}_{\text{спл}}}$) составляет 84,1–87,2%.

Из рис. 2 следует, что увеличение количества углерода от 42 до 54% позволяет повысить $\Sigma \alpha_{\text{Si}}$ от 83,4 до 88,8%, α_{Al} при 2100 °С – от 74,3 до 80,0% и Ca в CaC_2 при 2000 °С от 19,6 до 54,8%. При этом повышается литраж карбида кальция от 130 до 188 $\text{дм}^3/\text{кг}$. Наблюдаемое снижение $\alpha_{\text{Si}_{\text{спл}}}$, α_{Ca} в CaC_2 (при $T > 2000$ °С) и $\alpha_{\text{Al}} > 2100$ °С объясняется образованием газообразного SiO, разложением CaC_2 ($\text{CaC}_2 = \text{Ca}_r + 2\text{C}$) и испарением алюминия.

Найдено, что при увеличении температуры при 1800 °С независимо от количества углерода α_{Zn} в газ составляет 98,4–98,8%. При 2000 °С количество углерода также не влияет на α_{Pb} в газ, составляет 88,4–88,6%. Из рис. 3 следует, что изменение углерода от 42 до 54% позволяет при 2000 °С повысить концентрацию кремния и алюминия в сплаве от 44,9 до 47,1%, а при 2100 °С – от 47,0 до 49,6%.

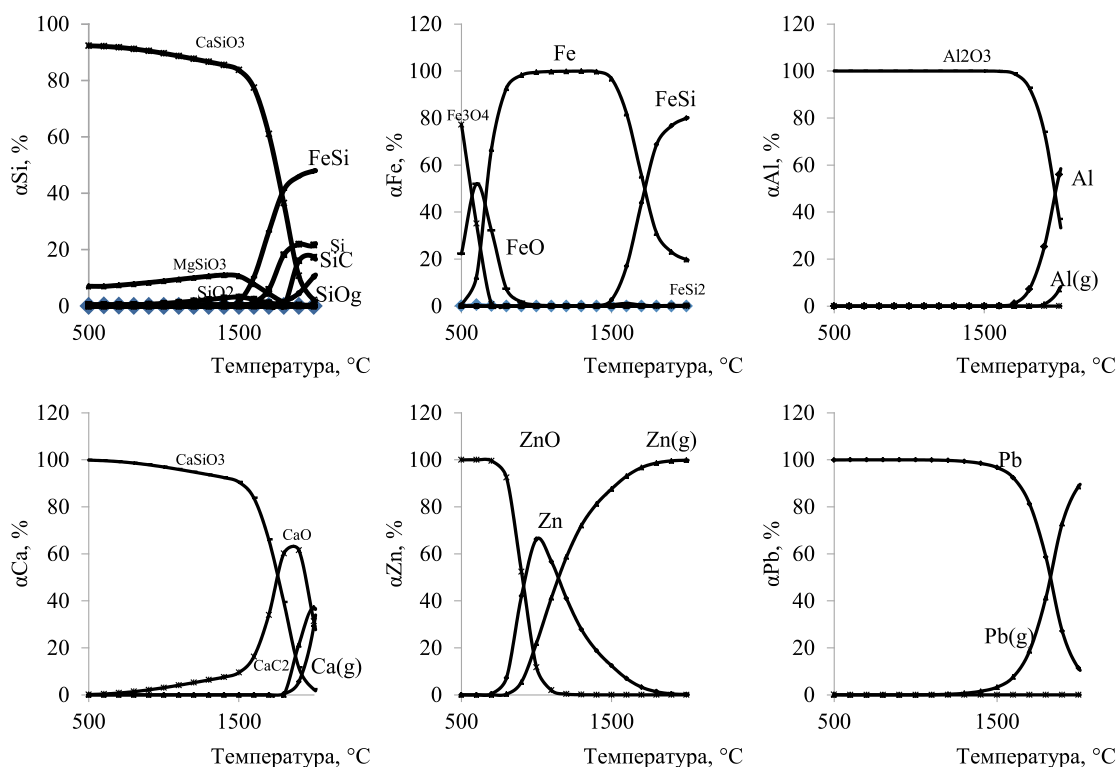
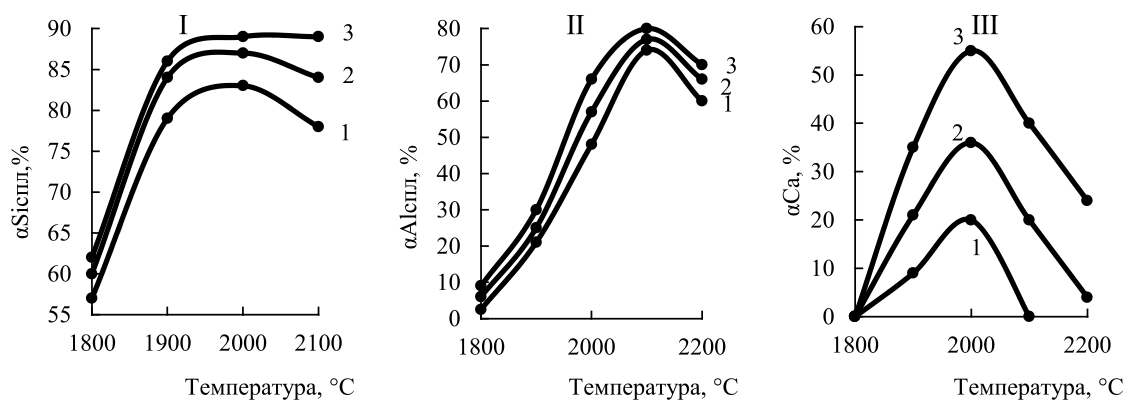


Рис. 1. Влияние температуры на равновесную степень распределения элементов в системе ДШ-МК-У

Таблица 1

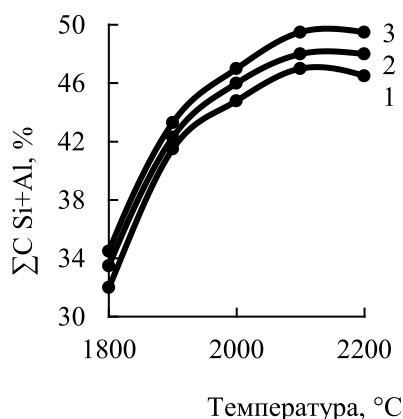
Влияние температуры на степень распределения кремния в ферросплаве ($\Sigma\alpha_{Si}$) и концентрацию в сплаве Si и Al (C_{Si} , C_{Al})

Параметр	Температура, °C					
	1600	1700	1800	1900	2000	2100
$\alpha_{Si_{спл}}$, %	11,7	32,4	59,5	84,1	87,2	84,3
C_{Si} , %	8,7	20,9	32,2	37,7	36,9	35,1
C_{Al} , %	<0,1	0,3	1,6	4,6	9,5	12,9
$C_{Si \text{ и } Al}$	8,7	21,2	33,8	42,3	46,6	48,0



1–42%С, 2–48%С, 3–54%С

Рис. 2. Влияние температуры и углерода на равновесную степень перехода кремния (I) и алюминия (II) в сплав кальция в CaC_2 (III)



1–42%С, 2–48%С, 3–54%С

Рис. 3. Влияние температуры и углерода на суммарную концентрацию кремния и алюминия в ферросплаве

Для определения оптимальных условий совместной переработки доменный шлаков и магнетитового концентрата дальнейшие исследования провели методом планирования с использованием рототабельных планов второго порядка (план Бокса-Хантера) [18]. Матрица планирования и результаты исследования приведены в табл. 2. Используя результаты исследования в соответствии с [19] получили следующие адекватные уравнения регрессии:

$$\begin{aligned} \alpha\text{Si}_{\text{спл}} = & -624,59 + 0,646 \cdot T + \\ & + 2,284 \cdot Y - 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - \\ & - 3,37 \cdot 10^{-2} \cdot Y^2 + 5,868 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot Y; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \alpha\text{Al}_{\text{спл}} = & -2773,44 + 2,447 \cdot T + \\ & + 3,472 \cdot Y - 5,09 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + \\ & + 3,85 \cdot 10^{-2} \cdot Y^2 - 2,93 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot Y; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \alpha\text{Ca} = & -6263,91 + 6,34 \cdot T - \\ & - 4,52 \cdot Y - 1,61 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + \\ & + 1,96 \cdot 10^{-2} \cdot Y^2 + 2,683 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot Y; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Sigma C_{\text{Si и Al}} = & -224,716 + 0,213 \cdot T + \\ & + 0,975 \cdot Y - 5,009 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - \\ & - 1,43 \cdot 10^{-2} \cdot Y^2 + 3,353 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot Y; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \alpha\text{Zn} = & -235,12 + 0,274 \cdot T + \\ & + 3,294 \cdot Y - 4,383 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - \\ & - 6,179 \cdot 10^{-3} \cdot Y^2 - 1,844 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot Y. \end{aligned} \quad (6)$$

По методике [18, 19] нами были построены объемные изображения поверхностей откликов и их горизонтальные разрезы (рис. 4–6).

Из рис. 4 следует, что $\alpha\text{Si}_{\text{спл}}$ от 85 до 86% (точка А) располагается в температурной области 1940–2100 °С и 47,5–54% углерода. Для $\alpha\text{Al}_{\text{спл}}$ от 60 до 86% необходима температура 1975–2100 °С и 42–54% углерода. Переход кальция из шихты в CaS_2 от 45 до 52,2% отмечается в температурной области 1930–2075 °С в присутствии 51–54% углерода. Цинк от 90 до 99,6% возгоняется при 1520–1700 °С. Ферросплав с $\Sigma C_{\text{Si и Al}}$ от 45 до 49,7% формируется в температурной области 1930–2100 °С в присутствии 42–54% углерода.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты исследования электроплавки смеси доменного шлака и магнетитового концентрата

№	Переменные				$\alpha\text{Si}_{\text{спл}}, \%$	$\alpha\text{Al}_{\text{спл}}, \%$	$\alpha\text{Ca}, \%$	$\Sigma C_{\text{SiAl}}, \%$
	Кодированный вид		Натуральный вид					
	X_1	X_2	T, °C	Y, %				
1	+	+	2071	52.2	85,5	78	39,3	48.8
2	–	+	1929	52.2	84,3	40,1	36,5	44.6
3	+	–	2071	43.8	83	72,4	16,4	46.8
4	–	–	1929	43.8	82,5	31	16,8	43.0
5	+1,41	0	2100	48	84,5	77,3	19,8	48.0
6	–1,41	0	1900	48	84	25,5	21,3	42.3
7	0	+1,41	2000	54	85,9	68,2	54,8	47.1
8	0	–1,41	2000	42	83,6	47,6	20,3	43.2
9	0	0	2000	48	85,4	57	36,1	46.0
10	0	0	2000	48	86	57,4	37	46.2
11	0	0	2000	48	85,2	56,6	35	45.8
12	0	0	2000	48	85,8	56,3	35,2	45.9
13	0	0	2000	48	85.6	57.2	36.5	46.1

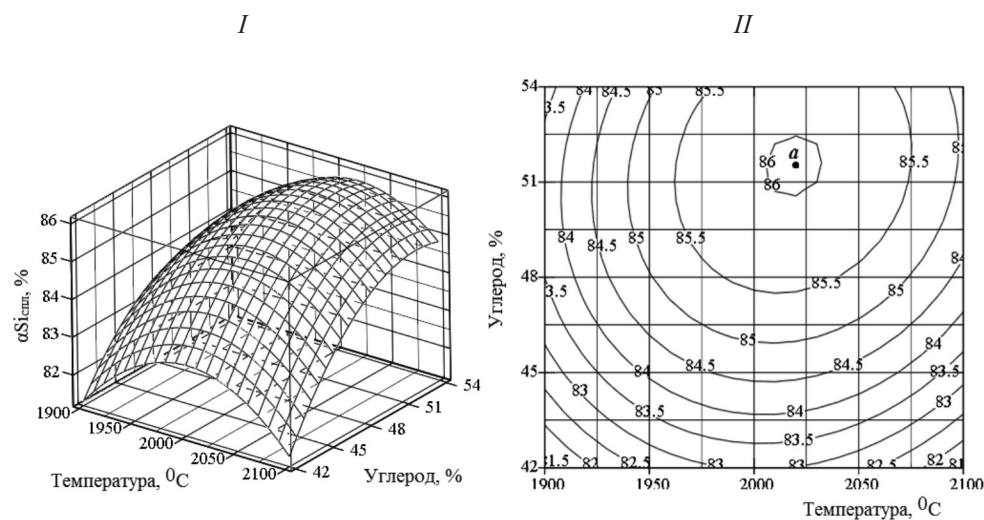


Рис. 4. Влияние температуры и углерода на степень перехода Si в ферросплав:
I – объемное изображение, II – горизонтальные разрезы поверхности отклика

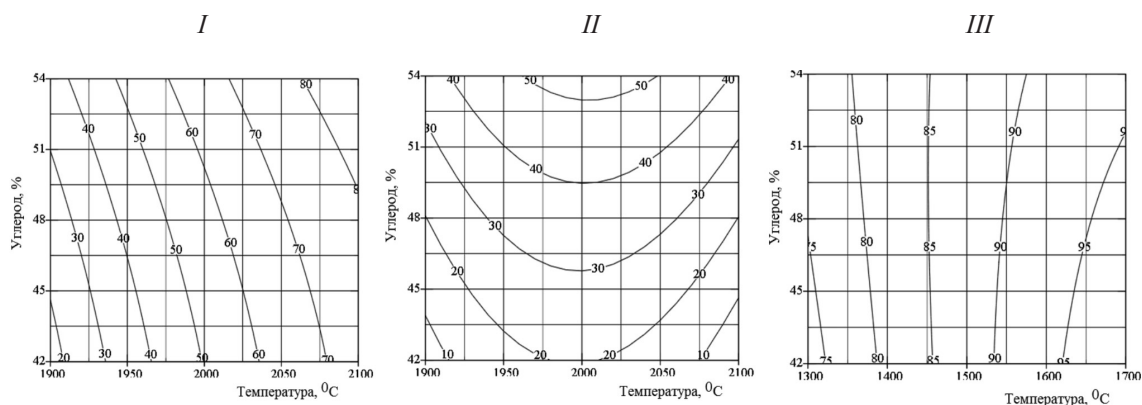


Рис. 5. Влияние температуры и количества углерода на степень перехода Al в сплав (I),
Ca в CaC_2 (II), Zn в возгоны (III) (горизонтальные разрезы поверхностей отклика)

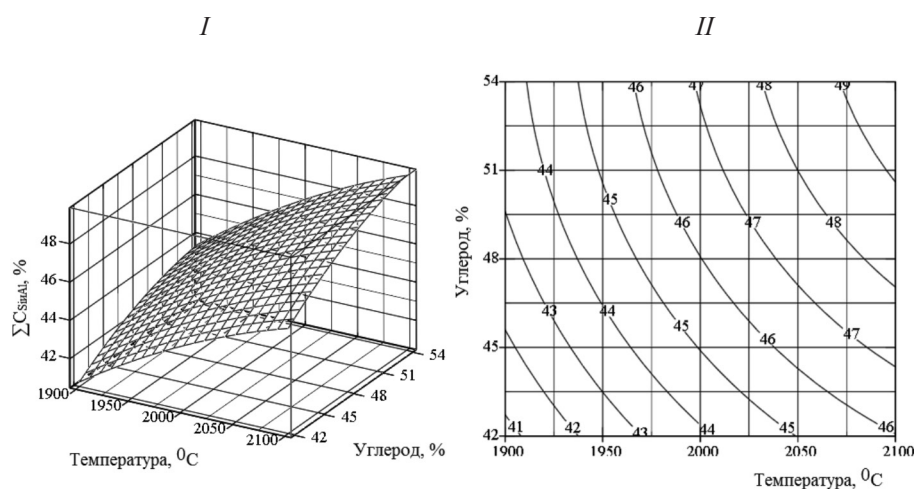
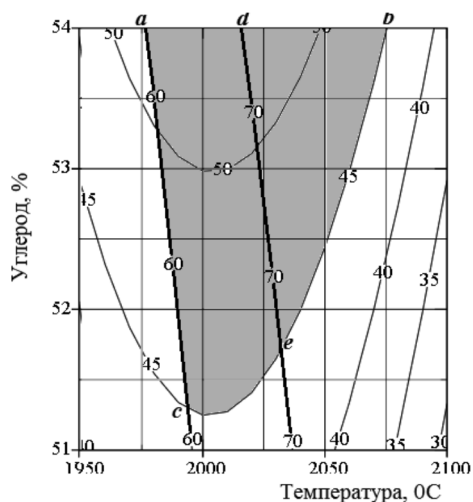


Рис. 6. Влияние температуры и количества углерода на концентрацию Si и Al в ферросплаве:
I – объемное изображение, II – горизонтальные разрезы поверхности отклика

Исходя из полученного материала следует, что оптимальные параметры (температура, количество углерода) должны быть ориентированы на извлечение Ca в CaC_2 , так как αCa в $\text{CaC}_2 < \alpha\text{Al}_{\text{спл}}$ и $\alpha\text{Si}_{\text{спл}}$. На рис. 7 показано влияние температуры и углерода на αCa в $\text{CaC}_2 \geq 45\%$ с наложением на разрез $\alpha\text{Al}_{\text{спл}} \geq 60\%$ (область abc рис. 7).

Для достижения в области abc (табл. 3) αCa в CaC_2 от 45 до 51,7% (точка а), $\alpha\text{Al}_{\text{спл}}$ – от 70 до 82,2%, $\alpha\text{Si}_{\text{спл}}$ – от 85,4–86,0% (точка е), процесс необходимо проводить в температурном интервале 2016–2075,5°C в присутствии 51,7–54,0% углерода. В этих условиях суммарная концентрация кремния и алюминия в ферросплаве составляет 47,6–49,1%.

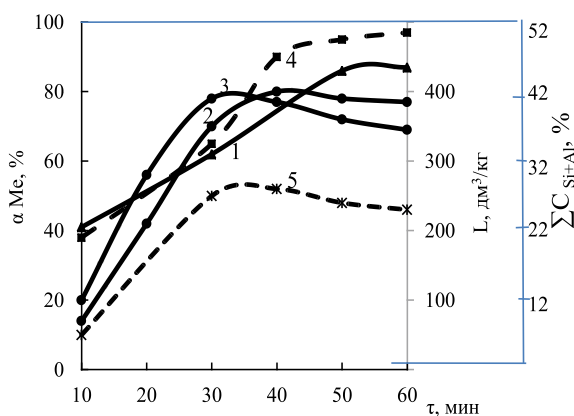


Линия: $ac - \alpha\text{Al}_{\text{спл}} = 60\%$,
 $de - \alpha\text{Al}_{\text{спл}} = 70\%$, $bc - \alpha\text{Ca}$ в $\text{CaC}_2 = 45\%$

Рис. 7. Совместная информация о влиянии температуры и углерода на технологические параметры взаимодействия в системе ДШ-МК-С

На рис. 8 приведены результаты экспериментов электроплавки смеси доменного шлака и магнетитового концентрата, из которого видно, что для максимального перехода Ca в CaC_2 (72–77%) процесс необходимо проводить в течение 30–50 минут. При этом степень перехода Si и Al в ферросплав составляет соответственно 60–84% и 70–79%, концентрация ΣSi и Al в сплаве 34–49%, а литраж карбида кальция – 236–250 $\text{дм}^3/\text{кг}$.

На укрупнено-лабораторной установке (рис. 9) было проплавлено 36 кг шихты (17 кг шлак, 6,8 кг магнетитовый концентрат, 12,2 кг коксик). На рис. 10 показаны фотографии продуктов плавки, а на рис. 11 – состав ферросплава. Электроплавка проводилась при напряжении 20–35 В и силе тока 600–900 А.



1 – $\alpha\text{Si}_{\text{спл}}$, 2 – $\alpha\text{Al}_{\text{спл}}$, %, 3 – αCa , %, 4 – $\Sigma C_{\text{Si и Al}}$, %, 5 – L , $\text{дм}^3/\text{кг}$

Рис. 8. Влияние продолжительности электроплавки смеси доменного шлака и магнетитового концентрата на технологические показатели процесса

Таблица 3

Значения технологических параметров в граничных точках области abc (рис. 7)

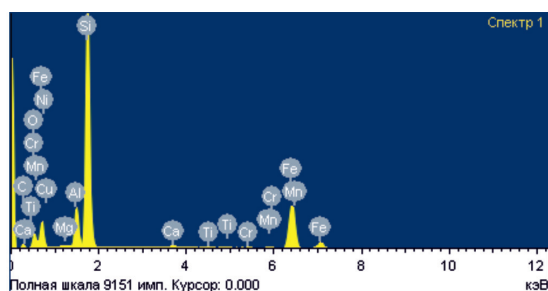
Точка на рис. 7	T, °C	Углерод, %	$\alpha\text{Si}_{\text{спл}}$, %	$\alpha\text{Al}_{\text{спл}}$, %	αCa , %	$\Sigma C \text{ Si и Al}$, %
a	1977,0	54,0	85,5	60,0	51,7	46,4
b	2075,5	54,0	85,4	82,2	45,0	49,1
c	1993,5	51,3	85,9	60,0	45,0	46,5
d	2016,0	54,0	85,8	70,0	52,8	47,6
e	2032,0	51,7	86,0	70,0	45,0	47,7



Рис. 9. Укрупнено-лабораторная электротермическая установка



Рис. 10. Продукты электроплавки: I – ферросплав, II – карбид кальция



Элемент	%	Элемент	%
Mg	0,09	Cr	0,17
Al	8,17	Mn	0,74
Si	50,46	Fe	39,00
Ca	0,67	Ni	0,27
Ti	0,49	Cu	0,00

Рис. 11. Растровая электронная микроскопия ферросплава

Основные показатели процесса:

Степень извлечения, %: кремния в ферросплав – 83,3; алюминия в ферросплав – 76,8; железа в ферросплав – 97,7; кальция в карбид кальция – 72,6; цинка в возгоны – 98,0; свинца в возгоны – 92,2.

Содержание в продуктах, %: кремния в сплаве – 41–51; алюминия в сплаве – 6–9; Са в техническом карбиде кальция – 67–70.

Литраж технического карбида кальция, $\text{дм}^3/\text{кг}$ – 230–270.

Количество ферросплава на 1 т шлака – 590–610 кг.

Количество карбида кальция на 1 т шлака – 430–450 кг.

Расход эл.энергии, кВт·час: на 1 т суммарного продукта – 4400–4500.

Заключение

На основании полученных результатов по совместной переработке доменного шла-

ка и магнетитового концентрата можно сделать следующие выводы:

– в равновесных условиях для достижения степени перехода кремния и алюминия в сплав соответственно на 85,4–86,0 и 70–82,2%, кальция в карбид кальция на 45–51,7% процесс необходимо проводить в температурном интервале 2016–2075,5 °С в присутствии 51,7–54,0% углерода (при этом суммарная концентрация Si и Al в сплаве составляет 47,6–49,1%);

– процесс электроплавки необходимо проводить в течение 30–50 минут, при этом степень перехода кремния и алюминия в сплав составляет соответственно 60–84% и 70–79%, кальция в карбид кальция 72–77% (суммарная концентрация Si и Al – 34–49%), а литраж карбида кальция 236–250 $\text{дм}^3/\text{кг}$;

– на укрупнено-лабораторной установке при электроплавке шихты, состоящей

из 47% шлака, 34% коксика и 19% магнетитового концентрата со сливом продуктов плавки получен ферросплав, содержащий 47–60% Σ Si и Al, карбид кальция литражом 230–270 дм³/кг, при этом из шихты в сплав перешло 83,3% Si и 76,8% Al, Ca в карбид кальция – 72,6%, Zn и Pb в возгоны соответственно 98,0 и 92,2%

Список литературы

1. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Обшая металлургия. М.: Академкнига, 2002. 786 с.
2. Барышников В.Г., Горелов А.М., Папков Г.И. Вторичные ресурсы черной металлургии. Т. 2. М.: Экономика, 1986. 344 с.
3. Утилизация – переработка доменных шлаков. [Электронный ресурс]. URL: http://emchezgia.ru/ekologiya/13.2_Utilizatsiya_domennykh_shlakov.php (дата обращения: 13.02.2020).
4. Коробейников А.П., Филин А.Н., Барыльников В.В. Способ переработки доменного и мартеновского шлака // Патент РФ № 2448172. Патентообладатель Коробейников А.П. 2012, Бюл. № 11.
5. Шогенов О.М., Рамадан А., Эдоков Р.А., Тапов А.А.. Опыт применения доменного шлака в качестве искусственного основания фундамента здания // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4 (55). URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_52_Shogenov_N.pdf_d69df8a052.pdf (дата обращения: 13.02.2020).
6. Валуев Д.В., Гизатулин Р.А. Технологии переработки металлургических отходов. Томск: Томский политехнический университет, 2012. 196 с.
7. Русских В.П., Кравченко В.П. Производство шлаковой ваты из доменных шлаков // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2016. № 32. С. 20–25.
8. Ву Ким Зиен, Танг Ван Лам, Баженова С. И., Нгуен Зуен Фонг. Возможность использования доменных шлаков в производстве бетонов и растворов во Вьетнаме // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 17–24.
9. Монтаев С.А., Шингужиева А.Б., Монтаева Н.С., Досов К.Ж., Есмухан Б.О. Использование гранулированного доменного шлака в составе керамической массы для получения керамического заполнителя (керамдора) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 10–1. С. 164–168.
10. Шаповалов Н.А., Загороднюк Л.Х., Тикунова И.В., Шекина А.Ю. Рациональные пути использования сталеплавильных шлаков // Фундаментальные исследования. 2013. № 1–2. С. 439–443.
11. Takayuki M., Koichi T., Kenichi A., Sachiko H. Production and Use of Blast Furnace Slag Aggregate for Concrete. Nippon steel & Sumitomo metal technical report. 2015. no. 109. P. 102–108.
12. Шевко В.М., Бадинова А.Д., Аманов Д.Д., Каратаева Г.Е. Способ переработки твердого доменного шлака // Решение о выдаче патента Республики Казахстан на полезную модель № 40647 от 11.10.2019.
13. Стальная стружка цена // Информационное агентство MetalTorg.Ru. Новости, аналитика, цены, статистика рынка черных, цветных и драгоценных металлов. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metaltorg.ru/stalnaya-struzhka-tsena.htm> (дата обращения: 13.02.2020).
14. Продукция Iron Concentrate Company // Iron Concentrate Company [Электронный ресурс]. URL: <http://icckaz.com/ru/node/39> (дата обращения: 13.02.2020).
15. Antti Roine, Jarkko-Mansikka-aho, Tuukka Kotiranta, Peter Bjorklund, Pertti Lamberg. HSC Chemistry 6.0 User's Guide. Outotec Research Oy. 2006. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hsc-chemistry.net/pdf/40%20Sim%20Flow-sheet.pdf> (дата обращения: 13.02.2020).
16. Шевко В.М., Аманов Д.Д., Каратаева Г.Е., Айткулов Д.К. Кинетика получения комплексного ферросплава из кремний-алюминийсодержащей опоки // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 10–2. С. 194–196.
17. Козлов К.Б., Лавров Б.А. Получение карбида кальция в дуговой печи и его анализ. СПб.: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 2011. 24 с.
18. Ахназарова С.А., Кафаров Б.В. Методы оптимизации эксперимента в химической промышленности. М.: Высшая школа, 1978. 319 с.
19. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.