

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ СПЛАВА МАНГАНОФЕРРОСИЛИКОХРОМА ИЗ ПЫЛЕЙ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Шевко В.М., Бадикова А.Д., Тулеев М.А.

Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, e-mail: sunstroke_91@mail.ru

В статье приводятся результаты исследований получения сплава, содержащего марганец, кремний, железо и хром, – манганферросиликохрома – из пылей производства ферросиликомарганца и пылей производства углеродистого феррохрома. Приводятся результаты термодинамического моделирования исследований по влиянию температуры, количества углерода и железа на получение из смеси пылей сплава манганферросиликохрома. Исследования проведены с использованием программного комплекса HSC-6.0 (Outokumpu), основанного на принципе минимума энергии Гиббса, методом рототабельного планирования второго порядка (планы Бокса–Хантера). На основании полученных результатов установлено, что при температуре 1700–1900 °С в присутствии 20% железа увеличение количества углерода от 48% до 64% повышает извлечение Si и Mn в сплав, что составляет 64,1% по кремнию и 93,6% по марганцу. Хром полностью переходит в сплав при 1400 °С; в интервале 1700–1900 °С при 48% углерода C_{Mn} составляет 22,9–24,1%, при 64% углерода C_{Mn} – 23,8–24,1%. Сплав при 1900 °С и 64% углерода содержал 28,1% Cr, 23,8% Mn, 21,5% Fe, 19,5% Si. В температурном интервале 1873–1900 °С в присутствии 47,5–50% железа содержание C_{Si} изменяется от 18% до 18,5%, C_{Mn} – от 18,8% до 19,4%, и C_{Cr} – от 20,2% до 21%. Выплавка сплава манганферросиликохрома должна проводиться в температурной области 1873–1900 °С в присутствии 47,5–50% железа и 64% углерода от массы смесей пыли.

Ключевые слова: пыль, феррохром, ферросиликомарганец, термодинамическое моделирование, манганферросиликохром

POSSIBILITY OF PRODUCING MANGANOFERROSILICOCHROME ALLOY FROM FERROALLOY DUST

Shevko V.M., Badikova A.D., Tuleev M.A.

M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, e-mail: sunstroke_91@mail.ru

The results of studies of obtaining an alloy containing manganese, silicon, iron, and chromium-manganoferrrosilicochromium from dusts of ferrosilicomanganese production and dusts of carbon ferrochrome production are presented in the article. The results of thermodynamic modeling of studies on the effect of temperature, the amount of carbon and iron on the production of a manganoferrrosilicochrome alloy from a dust mixture are presented. The studies were carried out using the HSC-6.0 (Outokumpu) software package based on the Gibbs minimum energy principle and the second order rotatable planning method (Box–Hunter plans). Based on the results obtained, it was found that at the temperature of 1700–1900 °C in the presence of 20% iron, an increase in the amount of carbon from 48% to 64% increases the extraction of Si and Mn into the alloy, amounting to 64.1% for silicon and 93.6% for manganese. Chromium completely transforms into an alloy at 1400 °C; in the range 1700–1900 °C at 48% carbon C_{Mn} is 22.9–24.1%, at 64% carbon C_{Mn} – 23.8–24.1%. The alloy at 1900 °C and 64% carbon contained 28.1% Cr, 23.8% Mn, 21.5% Fe, 19.5% Si. In the temperature range 1885–1900 °C in the presence of 47.5–50% iron, C_{Si} changes from 18% to 18.4%, C_{Mn} – from 18.8% to 19.4%, and C_{Cr} – from 20.2% to 21%. Smelting of an alloy – manganoferrrosilicochrome should be carried out in the temperature range 1873–1900 °C in the presence of 47.5–50% iron and 64% carbon by weight of dust mixtures.

Keywords: dust, ferrochrome, ferrosilicomanganese, thermodynamic modeling, manganoferrrosilicochrome

В машиностроении применяются многочисленные детали и изделия из стали марки 30ХГСА. Для выплавки этой стали, содержащей по [1] 0,8–1,1% Mn, 0,9–1,2% Si, 0,8–1,0% Cr, используются несколько видов ферросплавов и металлы, например ферросплавы ФСХ33, СМn17, ФХ800, ФС75, марганец Мр1 [2]. Легирующие добавки предварительно измельчаются и вводятся в ковш в определенной последовательности с учетом углерода (например, 10–20% Mn, 15–25% Si). Упростить процесс легирования можно, если сократить количество вводимых добавок за счет ферросплава, содержащего несколько легирующих элементов. В статье приводятся результаты исследова-

ний получения сплава, содержащего марганец, кремний, железо и хром, – манганферросиликохрома – из пылей производства ферросиликомарганца ТОО «Таразский металлургический завод» и пылей производства углеродистого феррохрома Актюбинского завода ферросплавов – филиала АО «ТНК «Казхром»». Результаты исследований подобной работы в литературе не описаны. Так, на Актюбинском заводе ферросплавов перерабатывают аспирационные пыли газоочисток путем брикетирования с получением брэксов (брикетов экструзионных) с последующим вовлечением их в производственный цикл (за 2020 г. из пыли с газоочистительных установок получено

63 тыс. т брэксов [3]). С целью переработки пыли аспирационных установок Актюбинского завода ферросплавов или реализации их как готового продукта на ТОО «НИИЦ ERG» проводят исследования повышения эффективности их окускования – брикетирования с применением микроармирования полипропиленовым волокном совместно с жидким стеклом [4]. Также на предприятии пыль феррохрома используют при изготовлении огнеупорных материалов с последующим применением их в качестве футеровки печей [5]. Перерабатывают пыль не только Актюбинского завода, но и пыль производства феррохрома Аксуского завода ферросплавов, которой образуется более 25 000 т в год [6]. Пыль газоочистных установок Аксуского завода ферросплавов содержит до 30% ведущего элемента и является сырьем для агломерационного цеха завода (в 2019 г. произведено около 250 тыс. т агломерата, который снова возвращается в технологический процесс [7]). Пыль сухих газоочисток от выплавки ферросиликомарганца Таразского металлургического завода на 98–99% представлена мелкой фракцией (0,063 мм), а содержание марганца в ней доходит до 20% [8]. Такую пыль возможно перерабатывать брикетированием совместно с некондиционной (мелкой по фракции) марганцевой рудой для дальнейшего использования при производстве стандартных марок ферросиликомарганца. В Химико-металлургическом институте им. Ж. Абишева (г. Караганда) проводятся исследования по переработке таких пылей гидроталлургическим методом, основанным на водном выщелачивании сернистым газом [9].

Цель исследования: определение влияния температуры, количества углерода и железа на получение из смеси пылей производства ферросиликомарганца и феррохрома сплава манганферросиликохрома.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены с использованием программного комплекса HSC-6.0 (Outokumpu)[10], основанного на принципе минимума энергии Гиббса, методом рототабельного планирования второго порядка (планы Бокса–Хантера). Для расчета равновесной степени распределения элементов между веществами ($\alpha_{э}$, %) нами был разработан алгоритм [11], в соответствии с которым при использовании данных о количественном распределении веществ, полученных при помощи программного модуля Equilibrium Compositions комплекса HSC-5.1, равновесная степень распределения элементов ($\alpha_{э}$, %) рассчитывается из от-

ношения массы элемента (кг) в продукте ($G_{Эл(пр)}$) к массе элемента (кг) в исходной системе ($G_{Эл(исх)}$) по формуле:

$$\alpha_{э} = \frac{G_{Эл(пр)}}{G_{Эл(исх)}} \cdot 100. \quad (1)$$

Расчет массы элемента (эл) в исходной смеси ($G_{Эл(исх)}$) производится по формуле:

$$G_{Эл(исх)} = \frac{x A_{эл}}{M_i} \cdot G_i, \quad (2)$$

где $A_{эл}$ – атомная масса элемента в исходном веществе, M_i – молекулярная масса исходного вещества, G_i – масса исходного вещества кг, x – число кило-атомов элемента в исходном веществе.

Масса элемента в продуктах взаимодействия, ($G_{Эл(пр)}$, кг) рассчитывалась по формуле:

$$G_{Эл(пр)} = \frac{n A_{эл}}{M_{i(пр)}} \cdot G_{i(пр)}, \quad (3)$$

где $A_{эл}$ – атомная масса элемента вещества в продукте, $M_{i(пр)}$ – молекулярная масса вещества продукта, $G_{i(пр)}$ – масса вещества в продукте, кг, n – число кило-атомов элемента вещества в продукте.

После нахождения $G_{Эл(пр)}$ и $G_{Эл(исх)}$ расчет равновесной степени распределения элемента по веществам проводится по формуле (3). Определялось влияние температуры, количества углерода, количества железа на образование ферросплава и содержание в нем кремния, хрома, марганца.

Объектом исследований явились пыль получения ферросиликомарганца ТОО «Таразский металлургический завод» электротермического с содержанием: 53,3% MnO, 24,0% SiO₂, 5,4% MgO, 9,6% CaO, 3,8% Al₂O₃, 1,5% Fe₂O₃, 1,8% ZnO, 0,6% PbO, и пыль производства феррохрома Актюбинского завода ферросплавов (филиала АО «ТНК «Казхром»») с содержанием 21–35% Cr₂O₃, 6–20% SiO₂, 14–31% MgO, 3,7–5,7% Al₂O₃, 7–9% FeO, 0,6–7,4% CaO, 3–6% C, 0,3–1% S. Массовое отношение пыли феррохрома к пыли ферросиликомарганца составляло 2:1.

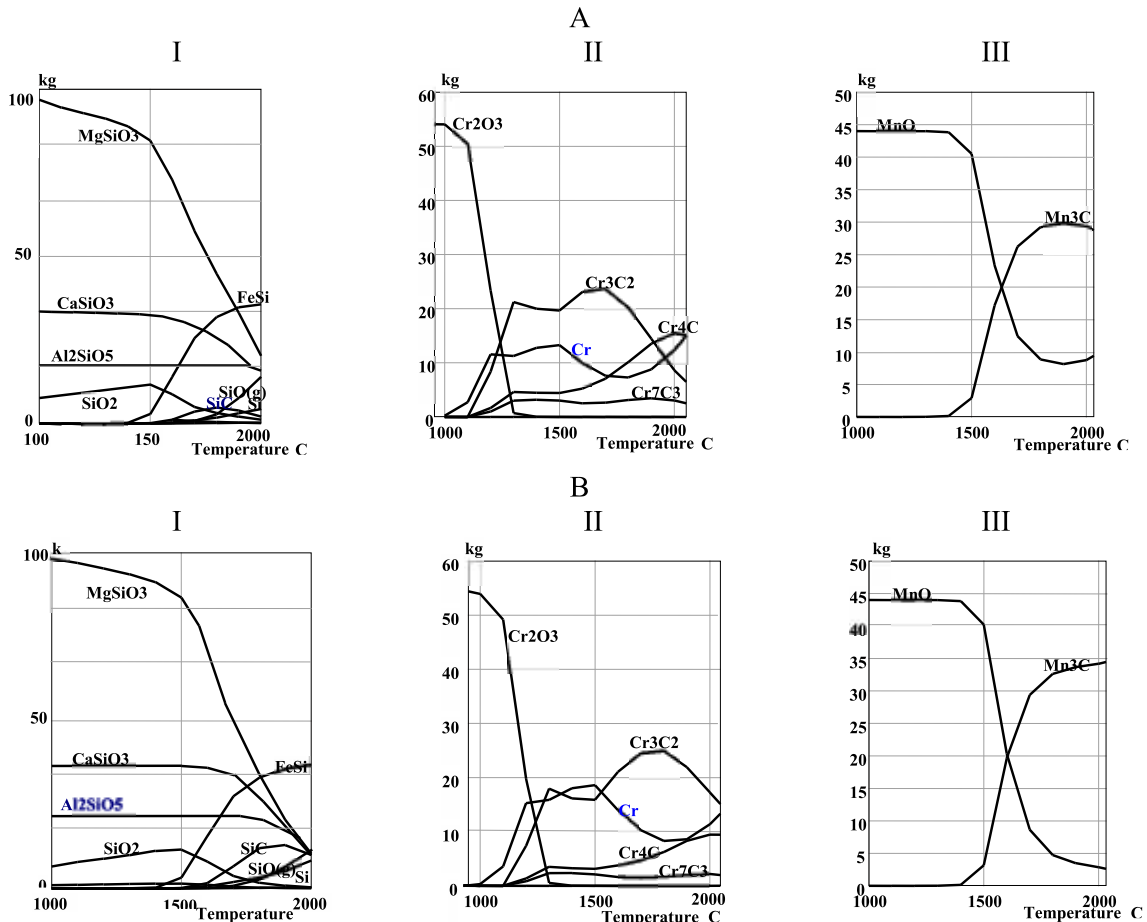
Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показано влияние температуры и углерода (при 48% и 64% от массы пыли) на количественное распределение Si, Mn и Cr при 20% Fe от массы пыли. Видно, что хром в системе присутствует в виде карбидов (Cr₇C₃, Cr₄C, Cr₃C₂) и элементного хрома. Начало восстановления Cr₂O₃ отмечается при 900 °С, а оконча-

ние – при 1400 °С. В технологической области 1700–1900 °С основными хромсодержащими веществами являются Cr_3C_2 , Cr и Cr_4C . Восстановление марганца начинается при 1400 °С. Основным продуктом восстановления служит Mn_3C . Продуктами восстановления SiO_2 являются FeSi , SiC , Si ($T \geq 1400$ °С) и SiO ($T \geq 1500$ °С).

На рис. 2 (I, II) показано влияние температуры и количества углерода на равновесную степень извлечения в ферросплав кремния (в виде суммы FeSi , SiC , Si), хрома (в виде суммы Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Cr_4C , Cr) и марганца (в виде Mn_3C). Видно, что в технологической области 1700–1900 °С в присутствии 20% железа увеличение количества углерода от 48% до 64% повышает извлечение Si и Mn в сплав, составляя 64,1% по крем-

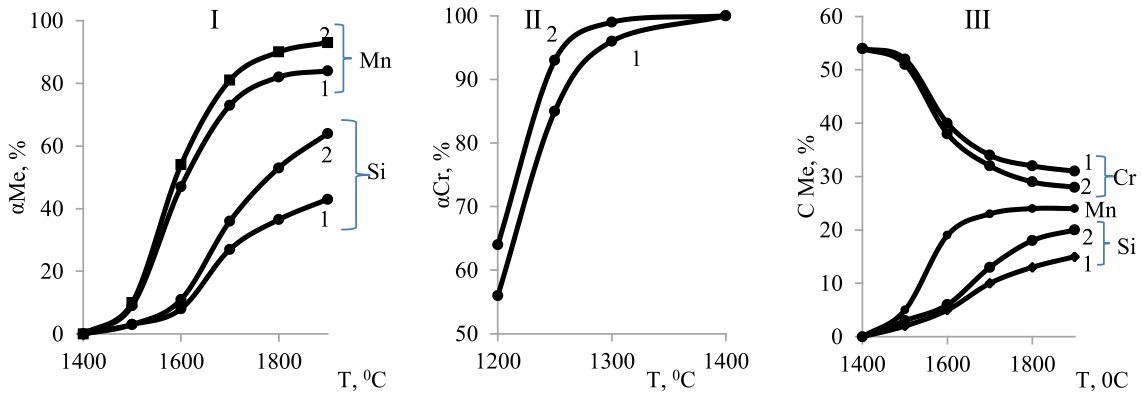
нию и 93,6% по марганцу. Хром полностью переходит в сплав при 1400 °С. Причем при $T > 1300$ °С количество углерода практически не влияет на этот процесс. Из рисунка 2(III) следует, что увеличение температуры от 1400 °С до 1900 °С и содержания углерода от 48% до 64% приводит к повышению концентрации кремния и уменьшению содержания хрома в сплаве, что связано с развитием кремневосстановительных процессов. На концентрацию марганца в сплаве количество углерода практически не влияет. Например, в температурном интервале 1700–1900 °С при 48% углерода она составляет 22,9–24,1%, при 64% углерода – 23,8–24,1%. Сплав при 1900 °С и 64% углерода содержал 28,1% Cr , 23,8% Mn , 21,5% Fe , 19,5% Si .



A – 48% углерода, B – 64% углерода

I – кремнийсодержащие вещества, II – хромсодержащие вещества,
III – марганецсодержащие вещества

Рис. 1. Влияние температуры и количества углерода на количественное распределение веществ в системе смесь пыли – C-Fe



1 – 48% углерода, 2 – 64% углерода

Рис. 2. Влияние температуры и количества углерода на равновесную степень извлечения металлов в сплавы (I, II) и на концентрацию металлов в сплаве (III)

Таблица 1

Матрица планирования и результаты исследований по влиянию температуры и количества углерода (% от массы смеси пылей) на степень извлечения в ферросплавы металлов и их содержание в сплаве

№	Переменные				$\alpha_{Si}, \%$	$\alpha_{Mn}, \%$	$C_{Si}, \%$	$C_{Cr}, \%$
	Кодированный вид		Натуральный вид					
	X1	X2	T, 0C	C, %				
1	+1	+1	1856	61,7	21,3	63,3	8,7	37,2
2	-1	+1	1644	61,7	25,0	85,2	15,4	31,5
3	+1	-1	1856	50,3	43,0	67,5	9,8	36,0
4	-1	-1	1644	50,3	55,3	89,0	17,8	29,1
5	+1,41	0	1900	56,0	45,0	88,8	19,6	30,0
6	-1,41	0	1600	56,0	32,0	51,3	7,1	39,7
7	0	+1,41	1750	64,0	52,5	85,0	15,7	30,4
8	0	-1,41	1750	48,0	14,0	77,4	12,0	33,8
9	0	0	1750	56,0	38,0	82,0	13,7	32,1
10	0	0	1750	56,0	38,1	81,0	13,4	31,9
11	0	0	1750	56,0	38,6	81,3	14,0	31,7
12	0	0	1750	56,0	37,9	82,8	14,1	32,1
13	0	0	1750	56,0	37,8	83,0	13,3	32,4

В табл. 1 приведена матрица проведенных дальнейших исследований с использованием рототабельного планирования второго порядка (планы Бокса-Хантера) [12] по влиянию температуры (T, 0C), количества углерода (C, % от массы пыли) на техноло-

гические параметры: степень извлечения металлов в сплав ($\alpha_{Me}, \%$) и содержание в нем Si, Mn, Cr.

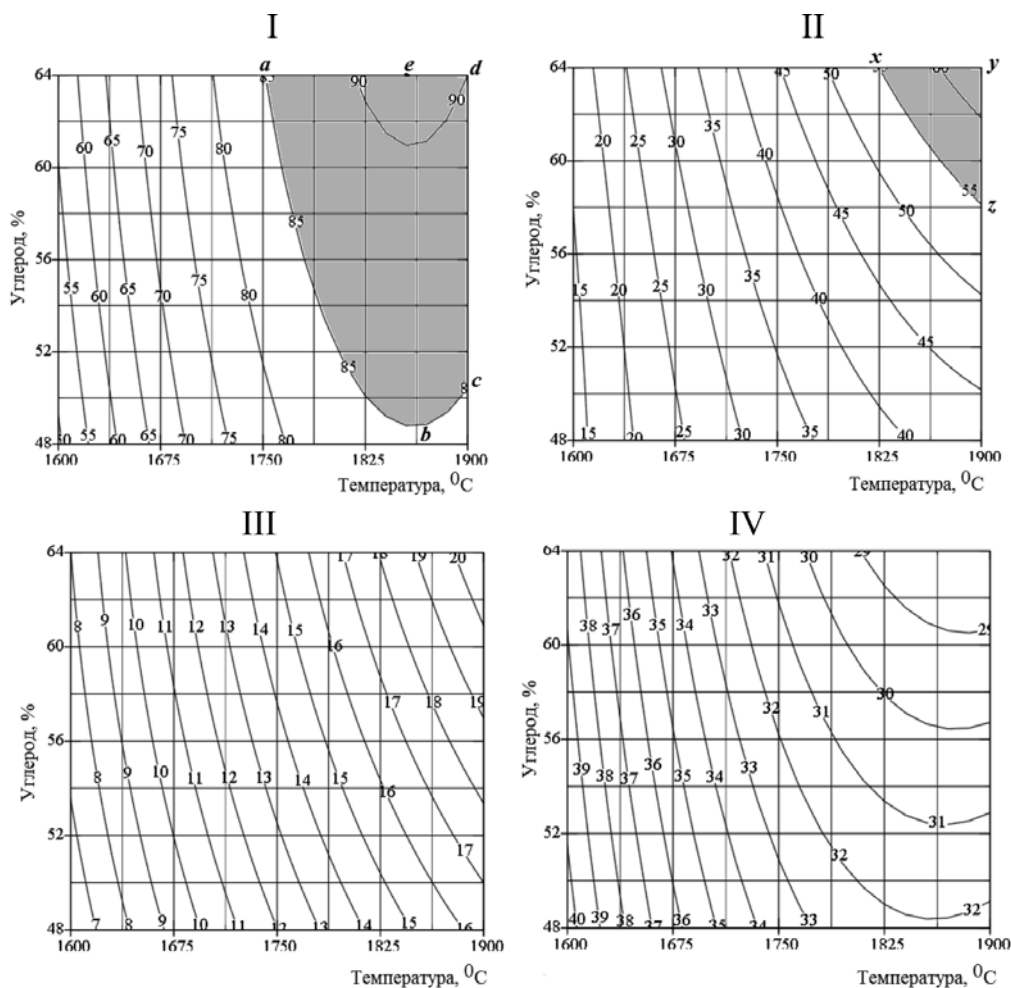
На основании результатов, показанных в табл. 1 по методике [12], получили следующие адекватные уравнения регрессии:

$$\alpha_{Si} = -487,69 + 0,657 \cdot T - 6,43 \cdot Y - 2,088 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 8,556 \cdot 10^{-3} \cdot Y^2 + 3,558 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot Y; \quad (4)$$

$$\alpha_{Mn} = -1769,418 + 1,938 \cdot T + 1,576 \cdot Y - 5,187 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 7,817 \cdot 10^{-3} \cdot Y^2 - 1,656 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot Y; \quad (5)$$

$$C_{Si} = -113,86 + 11,511 \cdot 10^{-2} \cdot T - 42,606 \cdot 10^{-2} \cdot Y - 3,058 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 2,893 \cdot 10^{-3} \cdot Y^2 + 5,379 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot Y; \quad (6)$$

$$C_{Cr} = -431,565 - 43,892 \cdot 10^{-2} \cdot T + 60,179 \cdot 10^{-2} \cdot Y + 1,244 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 7,386 \cdot 10^{-4} \cdot Y^2 - 4,965 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot Y. \quad (7)$$



Цифры на линиях – технологические параметры, %

Рис. 3. Влияние температуры и количества углерода на степень извлечения марганца в ферросплав (I), кремния в ферросплав (II), концентрацию в сплаве кремния (III), хрома (IV)

На основании уравнений по [13] построены плоскостные изображения зависимости $\alpha_{Si} = f(T, Y)$, $\alpha_{Mn} = f(T, Y)$, $C_{Si} = f(T, Y)$, $C_{Cr} = f(T, Y)$ (рис. 3).

Исследования по извлечению Cr в сплав и концентрации металлов в сплаве при 1600–1900 °C не проводились ввиду того, что при температуре ≥ 1400 °C хром полностью переходит в сплав, а концентрация Mn в сплаве практически не зависит от количества углерода. Из приведенного на рисунке 4 материала следует, что степени извлечения Mn в сплав от 85% до 91,6% можно достичь в области abcde, Si в сплав от 55% до 63,3% – в области xuz. В температурном интервале 1825–1900 °C в присутствии 60–64% углерода концентрация хрома будет составлять 29,6–28,4%, кремния – 18–20,4% марганца – 24%. Видно, что разница концентраций Cr и Si составля-

ет 11,6–10,2%, а хрома с марганцем – 6,0–3,6%. Поэтому такой сплав не является моносплавом (по Si, Mn, Cr). Для получения легированной стали марки 30ХГСА, в которой концентрация кремния, марганца, хрома примерно равна и составляет 0,9–1,2% Si, 0,8–1,1% Mn, 0,8–1,1% Cr. Следовательно, к полученному сплаву необходима подшихтовка кремнийсодержащего ферросплава, например ФС75 или ФС90.

Дальнейшие исследования были проведены для определения возможности получения из смеси пылей ферросплава с небольшой разницей концентрации Si, Mn и Cr. Было исследовано влияние температуры и количества железа на извлечение металлов в сплав и содержание в нем Si, Mn, Cr при 64% углерода от массы смеси пылей. В табл. 2 приведены матрица и результаты исследований.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты исследований по влиянию температуры и количества железа (% от массы смеси пылей) на степень извлечения в ферросплав металлов и содержание их в сплаве

№	Переменные				$\alpha_{Si}, \%$	$\alpha_{Mn}, \%$	$C_{Si}, \%$	$C_{Mn}, \%$	$C_{Cr}, \%$
	Кодированный вид		Натуральный вид						
	X1	X2	T, °C	Fe, %					
1	+1	+1	1856	45,6	25,6	65,2	9,5	20,4	34,2
2	-1	+1	1644	45,6	59,6	91,8	18,6	23,0	27,0
3	+1	-1	1856	24,4	28,3	58,3	8,8	16,0	25,3
4	-1	-1	1644	24,4	63,0	87,5	17,5	19,4	21,6
5	+1,41	0	1900	35,0	66,6	91,4	18,5	21,6	24,0
6	-1,41	0	1600	35,0	17,5	47,5	6,8	15,7	32,6
7	0	+1,41	1750	50,0	48,0	78,0	14,6	18,1	21,0
8	0	-1,41	1750	20,0	43,1	86,2	15,2	23,5	31,1
9	0	0	1750	35,0	45,3	81,6	13,8	19,8	25,5
10	0	0	1750	35,0	45,8	82,0	14,0	20,3	26,0
11	0	0	1750	35,0	46,0	82,5	14,2	20,7	26,2
12	0	0	1750	35,0	46,6	82,7	14,6	21,4	26,8
13	0	0	1750	35,0	46,9	83,3	14,9	21,5	27,3

Уравнения регрессии, полученные на основании данных табл. 2, имеют вид:

$$\alpha_{Si} = -764,78 + 76,08 \cdot 10^{-2} \cdot T + 0,914 \cdot 10^{-2} \cdot Fe - 1,725 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 1,816 \cdot 10^{-3} \cdot Fe^2 + 1,55 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot Fe; \quad (8)$$

$$\alpha_{Mn} = -1876,549 + 2,129 \cdot T - 1,166 \cdot Fe - 5,74 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 1,59 \cdot 10^{-3} \cdot Fe^2 + 5,76 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot Fe; \quad (9)$$

$$C_{Si} = -292,852 + 31,21 \cdot 10^{-2} \cdot T - 35,55 \cdot 10^{-3} \cdot Fe - 76,73 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 22,78 \cdot 10^{-4} \cdot Fe^2 + 88,66 \cdot 10^{-6} \cdot T \cdot Fe; \quad (10)$$

$$C_{Mn} = -275,58 + 33,56 \cdot 10^{-2} \cdot T - 50,96 \cdot 10^{-2} \cdot Fe - 92,85 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 21,36 \cdot 10^{-5} \cdot Fe^2 + 17,73 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot Fe; \quad (11)$$

$$C_{Cr} = -382,969 - 34,23 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1,566 \cdot Fe - 17,17 \cdot 10^{-4} \cdot Fe^2 + 8,24 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 7,714 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot Fe. \quad (12)$$

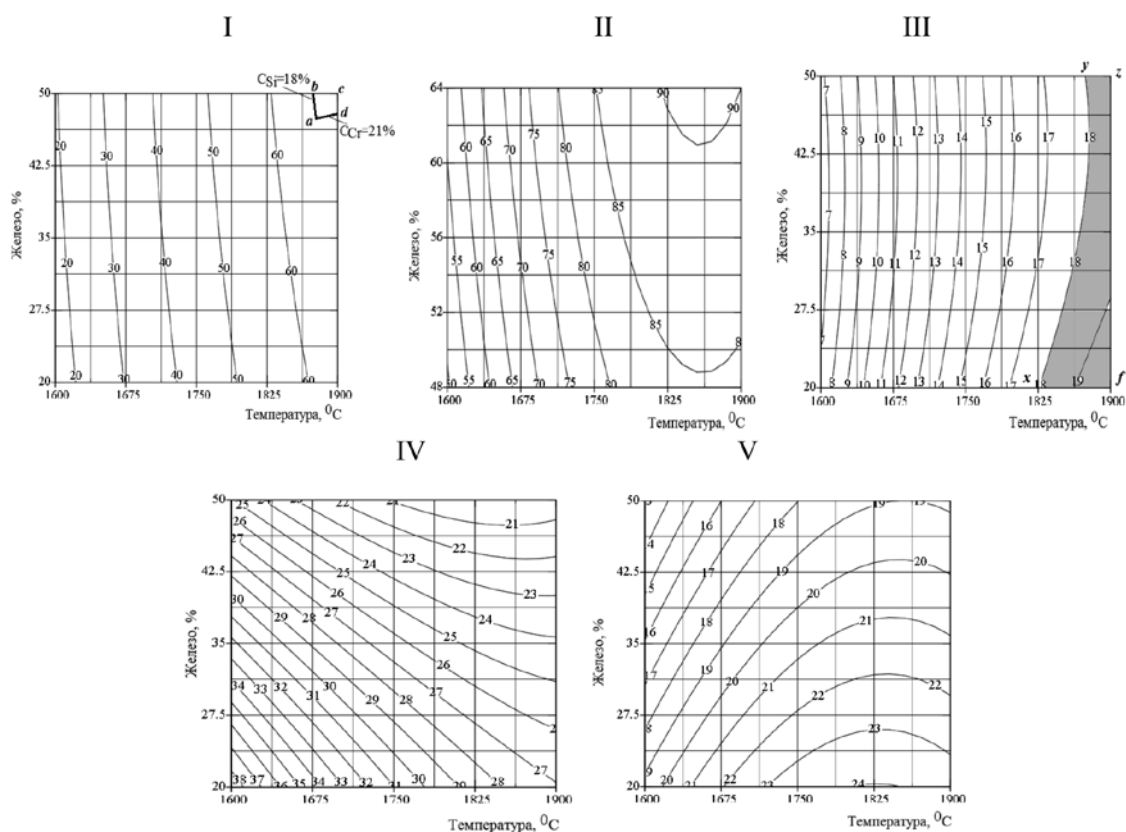
На рис. 4 показано влияние температуры и количества железа на степень извлечения металлов и концентрацию кремния, марганца, хрома в сплаве.

Из рис. 4 видно, что по мере увеличения степени извлечения в сплав металлы образуют ряд: Si, Mn, Cr (извлечение Cr в сплав при 1500 °C составляет $\geq 99,6\%$). Поэтому оптимизацию процесса необходимо проводить с учетом максимального извлечения Si в сплав (т.е. при $\alpha_{Si} \geq 60\%$). При постоянном количестве железа повышение температуры приводит к увеличению концентрации Si, Mn и к уменьшению концентрации Cr. При постоянной температуре концентрация Mn и Cr снижается при повышении количества железа. Концентрация Si в сплаве $> 18\%$ ($18-19,7\%$) отмечается в температурной области 1825–1900 °C и 20–50% Fe (область *хузф*).

На рис. 5 показаны совмещенная информация о влиянии температуры и коли-

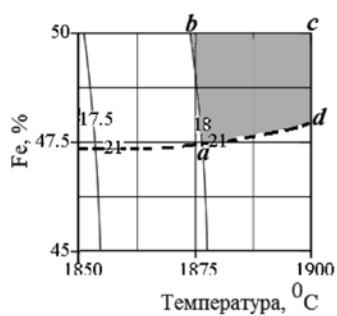
чества железа на концентрацию металлов в сплаве (при условии их приблизительного равенства) и степень извлечения Si в сплаве $\geq 60\%$. В табл. 3 приведены технологические параметры в области *abcd*. Из табл. 3 видно, что содержание C_{Si} изменяется от 18% до 18,5%, C_{Mn} – от 18,8% до 19,4%, и C_{Cr} – от 20,2% до 21%.

В соответствии с [1], сталь марки 30ХГСА содержит примерно одинаковое количество Mn, Si, Cr (соответственно 0,8–1,0%, 0,9–1,2%, 0,8–1,1%). При среднем содержании 0,9% Mn, 1,05% Si, 0,95% Cr относительная разница концентраций ($\Delta c, \%$) составляет: $(1,05 - 0,9) / 0,9 \cdot 100 = 16,6\%$. В нашем случае $\Delta c \leq 16,6\%$ находится в области *abcd* (10,8–16,6%). Поэтому выплавка мanganоферросиликохрома должна проводиться в температурной области 1873–1900 °C в присутствии 47,5–50% железа и 64% углерода от массы смесей пыли.



Цифры на линиях – технологические параметры, %

Рис. 4. Влияние температуры и количества железа на степень перехода кремния в ферросплав (I), марганца в ферросплав (II), концентрацию в сплаве кремния (III), хрома (IV) и марганца (V)



(—) – C_{Si} , %; (---) – C_{Cr} , %

Рис. 5. Совмещенная информация о влиянии температуры и железа на концентрацию металлов в сплаве

Таблица 3

Значения технологических параметров в крайних точках области abcd рис. 5

Точка на рис. 5	Параметры								
	T, °C	Fe, %	α_{Si} , %	α_{Cr} , %	α_{Mn} , %	C_{Si} , %	C_{Mn} , %	C_{Cr} , %	* Δc , %
a	1885	47,5	60,0	99,8	86,4	18,0	19,4	21,0	16,6
b	1873	50,0	60,0	99,7	85,6	18,0	19,0	20,2	12,2
c	1900	50,0	69,4	99,6	86,9	18,5	18,8	20,5	10,8
d	1900	48,0	69,0	99,8	87,8	18,4	19,2	21,0	14,1

*) Δc – относительная разница концентраций металлов в сплаве, %.

Заключение

На основании полученных результатов термодинамического моделирования по получению из смеси пылей производства ферросиликомарганца и феррохрома сплава манганферросиликохрома можно сделать следующие выводы:

– при температуре 1700–1900 °С в присутствии 20 % железа увеличение количества углерода от 48 % до 64 % повышает извлечение Si и Mn в сплав, что составляет 64,1 % по кремнию и 93,6 % по марганцу. Хром полностью переходит в сплав при 1400 °С; в интервале 1700–1900 °С при 48 % углерода содержание C_{Mn} составляет 22,9–24,1 %, при 64 % углерода C_{Mn} – 23,8–24,1 %. Сплав при 1900 °С и 64 % углерода содержал 28,1 % Cr, 23,8 % Mn, 21,5 % Fe, 19,5 % Si;

– в температурном интервале 1873–1900 °С в присутствии 47,5–50 % железа содержание C_{Si} изменяется от 18 % до 18,5 %, C_{Mn} – от 18,8 % до 19,4 % и C_{Cr} – от 20,2 % до 21 %. Выплавка сплава манганферросиликохрома должна проводиться в температурной области 1873–1900 °С в присутствии 47,5–50 % железа и 64 % углерода от массы смесей пыли.

Список литературы

1. ГОСТ 4543-2016.Metalлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 53 с.
2. Кохидзе В.Р., Ибрагимов Е.А. Особенности технологии выплавки стали марки 30ХГСА // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении : сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи (Юрга, 8–10 апреля 2021 г.). Томск: ТПУ, 2021. С. 22–24.

3. На Актюбинском заводе ферросплавов наращивают производство брикетов из пыли [Электронный ресурс]. URL: <https://exk.kz/news/4834/na-aktiubinskom-zavodie-ferrosplavov-narashchivaiut-proizvodstvo-brikietov-iz-pyli> (дата обращения: 04.05.2021).

4. Досекенов М. С., Алмагамбетов М.С., Улмаганбетов Н.А. Метод окускования пыли от производства феррохрома // Пылегазоочистка. 2019. № 18. С. 42–44.

5. Избембетов Д.Д., Амангельдиев Н.М., Зупаров Н.С. Разработка технологии производства огнеупорных изделий из рукавной пыли и шлаков высокоуглеродистого феррохрома // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 2(17). С. 56–60.

6. Жунусова А.К., Мамонов А.Р., Жунусов А.К. Переработка аспирационной пыли феррохрома // Наука и техника Казахстана. 2016. № 3–4. С. 66–70.

7. Почти миллион тонн хромового шлака переработал Аксуский завод ферросплавов за прошлый год. [Электронный ресурс]. URL:<https://www.erg.kz/ru/news/1294> (дата обращения: 05.05.2021).

8. Толымбекова Л.Б. Использование пыли сухих газоочисток производства ферросиликомарганца // Conduct of modern science: материалы XI международной научно-практической конференции (Sheffield, 30 ноября – 07 декабря, 2015). 443(27).

9. Исабаев С.М., Кузгибекова Х.М., Жинова Е.В., Жилина И.М., Жамухаметова А.Т. Гидрометаллургическая переработка некондиционного марганецсодержащего сырья с получением высококачественных продуктов // Комплексное использование минерального сырья. 2018. № 4. С. 166–172. DOI: 10.31643/2018/6445.43.

10. Roine A., Mansikka J., Kotiranta T., Bjorklund P., Lamberg P. HSC Chemistry 6.0 User's Guide, Outotec Research Oy, 2006.

11. Шевко В.М., Сержанов Г.М., Каратаева Г.Е., Аманов Д.Д. Расчет равновесного распределения элементов применительно к программному комплексу HSC-5.1. Программа для ЭВМ // Свидетельство РК №1501 от 29 января 2019 г.

12. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической промышленности. М.: Высшая школа, 1985. 327 с.

13. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. СПб: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.