

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 3 (2023)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано
Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

<https://doi.org/10.48081/GZVJ4547>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,189

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Богомоллов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Кажыбаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

Зарубежные члены редакционной коллегии:

Waigang Sun – профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Laruerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

***Ye. N. Makhambetov¹, S. T. Gabdullin², Z. Zulhan³,
A. M. Zhakan⁴, A. A. Myrzagaliyev⁵**

^{1,2,4}Chemical and Metallurgical Institute named after Zh.Abishev,

Republic of Kazakhstan, Karaganda;

³Faculty of Mining and Petroleum Engineering,

Bandung Institute of Technology, Indonesia.

⁵ERGR Research and Engineering Center LLP, Republic of Kazakhstan, Aktobe.

*e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com

THERMODYNAMIC MODELING OF THE SMELTING PROCESS OF A NEW COMPLEX CHROMIUM-MANGANESE-SILICON CONTAINING FERROALLOY

This article presents the results of a complete thermodynamic modeling of the smelting process of chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy from chromium and manganese ores of Kazakhstan. A complete thermodynamic simulation of the smelting process of chromium-manganese silicon-containing ferroalloy was performed in the software package «HSC Chemistry 6». The principle of operation of this software package is based on the principle of maximum entropy and takes into account all known properties of the reacting components that make up the thermodynamic system. Thermodynamic analysis for modeling the smelting process of a complex alloy was carried out in the temperature range from 900 to 1800 °C for three real charge compositions (with a lack of 10 % solid reducing agent, with a normal course of the regime and with an excess of 10 % solid reducing agent). The mechanism of joint carbothermic reduction of silicon, aluminum, calcium, manganese, chromium and iron was studied using the Cr-Si-Al-Ca-Mn-Mg-O-C system. The calculations carried out make it possible to fully consider all the physicochemical processes occurring during the smelting of chromium-manganese silicon containing ferroalloy by the carbothermic method. According to thermodynamic data, the optimal consumption of solid carbon per 100 kg of ore mixture (chromium and manganese ore), in the amount of 17 kg, has been established. The chemical composition at a temperature of 1800 °C is, %: Cr - 43.43; Mn - 21.28; Si - 10.25 and Fe - 24.55.

Keywords: complex alloy, carbothermic process, chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy, thermodynamics, chromium ore, manganese ore.

Introduction

To determine the rational parameters of the technology of smelting chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy, it is necessary to conduct a thermodynamic analysis of the state of the system, which allows determining the probable direction and depth of transformations of charge materials from the beginning of melting to metal production [1–2]. The mixture of starting materials for ferroalloy smelting is multicomponent (manganese and chromium ore, carbon reducing agent). To establish the

mechanism of joint carbothermic reduction of silicon, aluminum, calcium, manganese, chromium and iron, it is necessary to study the main reactions in the Cr-Si-Al-Ca-Mn-Mg-O-C system.

The relevance of the work lies in the need to develop a comprehensive ferroalloy technology by developing theoretical and technological foundations that contribute to increasing technical and economic indicators, as well as solving the task of attracting poor manganese ores of the Republic of Kazakhstan for metallurgical processing [3–4]. The ever-high demand for quality steel grades contributes to an increase in the production of ferroalloys, in particular, complex alloys based on three main elements-manganese, silicon and chromium, which are acidifiers of steel. To lay the scientific basis for the production of a complex chromium-manganese silicon-containing alloy (FeCrMnSi) using chromium and poor manganese ores in Kazakhstan, the study of Phase balances in the Cr-Fe-Mn-Si metallic system and the establishment of its general laws is carried out [5,6,7].

Materials and methods

To calculate the coexisting phases in the Cr-Si-Al-O-Mn-Mg-O-C system, thermodynamic values from the HSC Chemistry 6 database were taken. The database of the integrated HSC Chemistry 6 program is based on and updated by SGTE. According to the sources [8,9,10], the error in calculations on the HSC Chemistry software package is no more than 4–6 %, which is quite acceptable. The HSC software allows you to quickly and easily perform conventional thermodynamic calculations using personal computers. Therefore, HSC has a wide range of applications in scientific education, industry and research. The equilibrium composition of the multicomponent oxide and metal system was developed using the «Equilibrium Compositions» module. For the calculation, the algorithm of the «GIBBS» program of the minimum potential of the Gibbs energy was used.

For thermodynamic analysis, the principles that formed the basis of thermodynamic modeling of Cr-Si-Al-Ca-Mn-Mg-O-C systems were formulated.

1 Temperature. Thermodynamic analysis was carried out in the temperature range from 900 to 1800 °C. The lower limit characterizes the standard state, changes are insignificant up to a temperature of 900 °C, the upper limit is the final state, the melting point of the components, the formation of the final reaction products, that is, the initial and final equilibrium states of the system.

2 In all calculations, the pressure was chosen to be 0.1 MPa, which approximately corresponds to a pressure of 1 physical atm., characteristic of most metallurgical processes, including processes of solid-phase coal-thermal interaction.

3 Volume. The volume is determined by the thermodynamic state of the system.

4 The system is closed, there is no exchange with the environment.

5 A complete thermodynamic analysis was carried out for three real charge compositions (with a lack of 10 % solid reducing agent, with a normal course of the regime and with an excess of 10 % solid reducing agent) for smelting a complex alloy of manganese and chromium ore, in order to determine the optimal mode of the carbothermic process (Table 1).

Table 1 – Chemical composition of the charge mixture, kg.

Charge mixture	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	C
№ 1	27	15	13	29	12	3	8	11
№ 2	27	15	13	29	12	3	8	14
№ 3	27	15	13	29	12	3	8	17

6. The following substances were selected as associates for calculations:

- metal phase: Cr, Fe, Mn, Cr₄C, Fe₃C, C, Cr₃C₂, Cr₇C₃, FeSi, Cr₃Si, CrSi, Fe₃Si, Cr₅Si₃, Si, CrSi₂, Al, SiC, FeSi₂, Fe₅Si₃, Cr₂₃C₆, FeSi_{2.33}, FeSi_{2.43}, CaC₂, Mg₂Si, CaMg₂, MnSi, MnSi_{1.7}, MnSi_{1.727}, Mn₂₃C₆, Mn₁₅C₄, Mn₇C₃, Mn₅Si₃, Mn₃Si, MnC₂, Mn₃C, Al₄SiC₄;
- slag phase: Cr₂FeO₄, Cr₂O₃, SiO₂, MgSiO₃, FeAl₂O₄, Al₂O₃, CaO*Al₂O₃*2SiO₂, MgO*Al₂O₃, CaMgSi₂O₆, CaO*MgO*2SiO₂, CaSiO₃, Mg₂SiO₄, MgCr₂O₄, (CaMg)0.5SiO₃, (CaFe)0.5SiO₃, Mg₂Al₄Si₅O₁₈, Cr₂MgO₄, FeSiO₃, MgO, *3Al₂O₃*2SiO₂, Al₄Mg₂Si₅O₁₈, CaAl₂SiO₆, CaO*MgO*SiO₂, FeO, CaO*Al₂O₃*SiO₂, CaO*Cr₂O₃, Mg₃Al₂Si₃O₁₂, CaMgSiO₄, CaO*Al₂O₃, *2FeO*SiO₂, CaFe(SiO₃)₂, CaO*2Al₂O₃, *2CaO*MgO*2SiO₂, *2CaO*SiO₂, *2CaO*Al₂O₃*SiO₂, FeO*SiO₂, CaO, Al₂O₃*2SiO₂, Ca₃Si₂O₇, *3CaO*₂SiO₂, CaO*MgO, *3CaO*MgO*2SiO₂, *3CaO*Al₂O₃*3SiO₂, Ca₂MgSi₂O₇, CrO₂, CaO*6Al₂O₃, Fe₂Al₄Si₅O₁₈, Ca₃SiO₅, Fe₃Al₂Si₃O₁₂, Fe₂O₃, Fe₃O₄, *3CaO*SiO₂, *2CaO*Al₂O₃, MgCO₃, MgFe₂O₄, AlO, CaFeSiO₄, MgO₂, Fe₂MgO₄, *3CaO*Al₂O₃, MgFe_{1.415}Cr_{0.632}O_{4.07}, CaO*Fe₂O₃, Ca₃Fe₂Si₃O₁₂, CrO₃, *2CaO*Fe₂O₃, CaMg(CO₃)₂, Mg₇Al₉Al₄Si₃O₃₆, Mg₂Al₄Si₁₀, Ca₃(Al₂Si₈O₈)₃*CaCO₃, Mn_{0.9554}Ca_{0.0446}SiO₃, Ca₃Cr₂(SiO₄)₃, CaFe₃O₅, MnO*Al₂O₃, MgCrO₄, MnO, MnSiO₃, CaCrO₄, MnCO₃, CaFe₅O₇, Fe₂MnO₄, MnO*Fe₂O₃, CaMg₃(CO₃)₄, MnO₂, *2Ca₂SiO₄*CaCO₃, Cr(CO)₆, Ca₃Si₂O₇*2CaCO₃, *12CaO*₇Al₂O₃, Cr₈O₂₁, Fe₃(CO)₁₂, *4CaO*Al₂O₃*Fe₂O₃, Cr₅O₁₂, Fe₂(CO)₉, Ca(MnO₄)₂, Mn₃O₄, Mn₂SiO₄, MgMn₂O₄, Mn₂O₃, CaC₂O₄;
- gas phase: CO_(g), CO_{2(g)}, SiO_(g), Mg_(g), Al_(g), Si_(g), AlO_(g), MgO_(g), Al₂O_(g), Mn_(g), MnO_(g).

Results and discussion

The main purpose of thermodynamic modeling in this work is to establish the regularities of the distribution of chemical elements between metal, slag and the gas phase during carbothermic reduction of chromium and manganese ore.

Data analysis shows that the initial composition of the charge, recovering, undergoes significant changes. As a result of modeling, it was revealed that, during the smelting of chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy by the carbothermic method up to 1800 °C, the formation and some changes of elements (Figure 1, 2, 3 and 4) in the gas, metal and slag phase are observed.

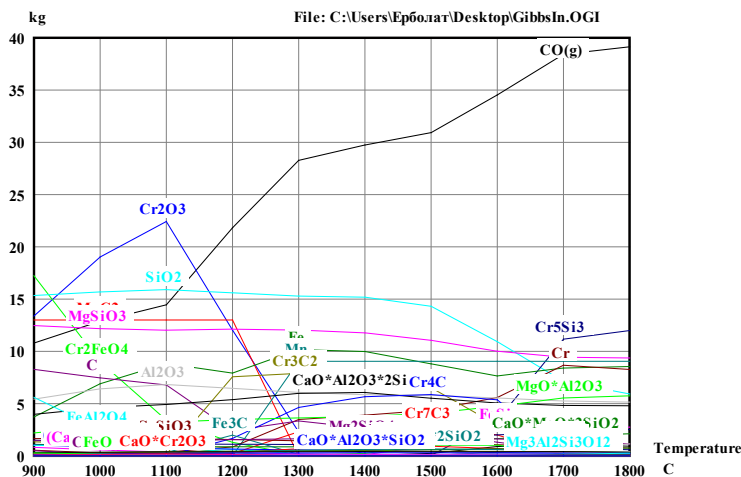


Figure 3 - Dependence of the condensed and gas phase composition on temperature (consumption of solid carbon 17 kg per 100 kg of ore mixture)

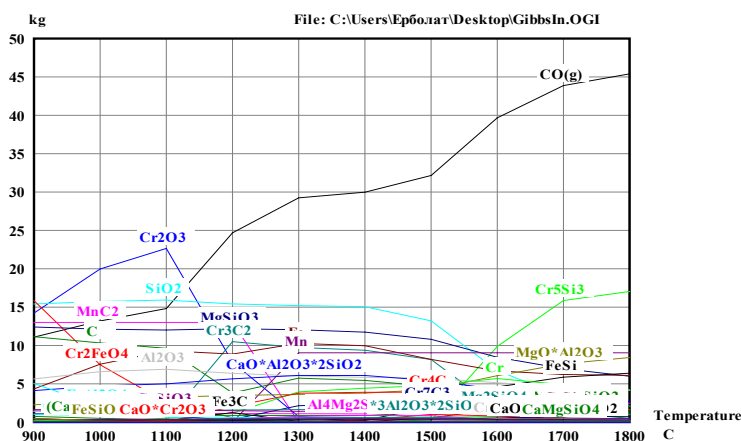


Figure 4 - Dependence of the condensed and gas phase composition on temperature (consumption of solid carbon 20 kg per 100 kg of ore mixture)

Analysis of the curves shown in the figures shows that:

– charge mixture № 1 (Figure 1), solid carbon consumption 11 kg. The reduction processes of metal formation begin at a temperature of 1200 °C, the content of iron and manganese at a temperature of 1300 °C is 8–9 kg in the metallic phase, practical in all solid carbon costs. At a solid carbon consumption of 11 kg per charge mixture, the phase - Cr_2FeO_4 at a temperature of 1300 °C will decompose into free Cr_2O_3 , the content of which reaches 22 kg in the slag mixture. As the temperature increases, the content of Cr_2O_3 decreases to 18, the high content of Cr_2O_3 and SiO_2 in the slag phase indicates a clear lack of reducing agent. In the composition of the metal phase, the silicon content is very low.

– charge mixture № 2 (Figure 2), solid carbon consumption 14 kg. The reduction processes of metal formation begin at a temperature of 1200 °C, the content of iron and manganese at a temperature of 1300 °C is 8–9 kg in the metallic phase, practical in all solid carbon costs. With a solid carbon consumption of 14 kg per charge mixture, starting from a temperature of 1100 to 1450 °C, the phase – Cr₂O₃ in the slag mixture decreases, and the Cr content increases to 15 kg in the metal phase. The high content of SiO₂ in the slag phase also indicates a lack of reducing agent.

– charge mixture № 3 (Figure 3), solid carbon consumption 17 kg. The reduction processes of metal formation begin at a temperature of 1200 °C, the content of iron and manganese at a temperature of 1300 °C is 8–9 kg in the metallic phase, practical in all solid carbon costs. At a solid carbon consumption of 17 kg per charge mixture, starting from a temperature of 1100 to 1300 °C, the phase – Cr₂O₃ decreases in the slag mixture, the content of Cr, Cr₄C, Cr₃C₂, Cr₇C₃, Cr₃Si, CrSi, Cr₅Si₃, Si, CrSi₂, Cr₂₃C₆ increases in the metal phase. The SiO₂ content in the slag phase is reduced to 6 kg, which indicates the abundance of the reducing agent (Table 2).

– charge mixture № 4 (Figure 4), solid carbon consumption 20 kg. The reduction processes of metal formation begin at a temperature of 1200 °C, the content of iron and manganese at a temperature of 1300 °C is 8-9 kg in the metallic phase, practical in all solid carbon costs. At a solid carbon consumption of 20 kg per charge mixture, starting from a temperature of 1100 to 1300 °C, the phase - Cr₂O₃ decreases in the slag mixture, the content of Cr, Cr₄C, Cr₃C₂, Cr₇C₃, Cr₃Si, CrSi, Cr₅Si₃, Si, CrSi₂, Cr₂₃C₆ increases in the metal phase. There is a high silicon content in the metal at a temperature of 1800 °C, 15.80 %.

According to thermodynamic data, changes in the composition of metal and slag were calculated for each charge mixture at a temperature range of 900–1800 °C.

Table 2 – Chemical composition of metal and slag

Charge mixture № 1, consumption C _{solid} - 11 kg									
t, °C	Metal composition, %				Slag composition, %				
	Cr	Mn	Si	Fe	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
900	0.0	51.6	0.0	10.7	30.72	12.26	31.73	13.66	2.80
1000	0.0	46.4	0.0	23.0	31.81	8.81	33.07	14.14	2.99
1100	0.3	42.1	0.0	32.5	32.87	5.27	34.48	14.66	3.19
1200	3.8	39.4	0.0	35.7	32.45	3.54	35.69	15.13	3.33
1300	26.3	31.5	0.0	34.7	23.64	0.84	42.15	17.76	4.03
1400	33.9	29.5	0.0	32.7	18.65	0.80	44.95	18.93	4.31
1500	37.2	28.7	0.1	31.9	16.08	0.75	46.38	19.52	4.49
1600	39.1	28.2	0.2	31.5	14.39	0.69	47.31	19.89	4.66
1700	40.3	27.9	0.3	31.2	13.35	0.67	47.78	20.11	4.81
1800	40.5	27.9	0.4	31.0	13.44	0.84	47.46	20.05	4.90
Charge mixture № 2, consumption C _{solid} - 14 kg									

t, °C	Metal composition, %				Slag composition, %				
	Cr	Mn	Si	Fe	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
900	0.00	42.29	0.00	13.82	31.17	10.88	32.27	13.85	2.88
1000	0.06	38.04	0.00	25.65	32.52	6.57	33.94	14.47	3.11
1100	1.02	35.05	0.00	32.99	33.35	3.01	35.49	15.04	3.33
1200	16.84	30.67	0.00	31.52	27.40	1.96	39.41	16.66	3.73
1300	36.85	25.48	0.01	28.67	13.29	0.55	48.08	20.23	4.62
1400	43.28	24.02	0.06	27.22	5.83	0.43	52.29	22.01	5.05
1500	45.79	23.43	0.21	26.69	2.21	0.33	54.26	22.88	5.32
1600	46.65	23.19	0.72	26.55	0.79	0.24	54.71	23.35	5.55
1700	46.65	23.15	2.14	26.55	0.73	0.22	53.50	23.91	5.82
1800	46.31	23.26	3.53	26.63	1.44	0.29	51.48	24.45	6.09
Charge mixture № 3, consumption C _{solid} - 17 kg									
t, °C	Metal composition, %				Slag composition, %				
	Cr	Mn	Si	Fe	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
900	0.00	36.17	0.00	14.96	31.50	9.85	32.67	14.00	2.93
1000	0.10	32.88	0.00	25.54	32.94	5.23	34.47	14.66	3.18
1100	1.69	30.72	0.00	31.01	33.36	2.07	36.02	15.24	3.40
1200	25.80	25.39	0.00	27.43	20.75	1.26	43.52	18.36	4.14
1300	40.94	22.04	0.02	25.15	4.55	0.29	53.11	22.33	5.14
1400	43.59	21.47	0.19	24.69	0.31	0.14	55.44	23.39	5.42
1500	43.68	21.40	1.40	24.70	0.03	0.07	54.62	23.96	5.63
1600	43.48	21.30	5.51	24.58	0.01	0.05	50.78	25.94	6.18
1700	43.25	21.18	9.90	24.46	0.04	0.08	45.60	28.61	6.88
1800	43.43	21.28	10.25	24.55	0.05	0.12	43.90	29.46	7.17
Charge mixture № 4, consumption C _{solid} - 20 kg									
t, °C	Metal composition, %				Slag composition, %				
	Cr	Mn	Si	Fe	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
900	0.01	31.76	0.00	15.25	31.76	9.04	32.98	14.12	2.98
1000	0.12	29.19	0.00	24.62	33.22	4.35	34.82	14.79	3.23
1100	2.23	27.53	0.00	28.80	33.23	1.57	36.38	15.38	3.45
1200	30.58	22.04	0.00	24.50	14.38	0.79	47.34	19.95	4.53
1300	40.00	20.18	0.02	23.18	1.51	0.16	54.89	23.05	5.33
1400	40.81	20.01	0.31	23.09	0.06	0.07	55.50	23.52	5.47
1500	40.76	19.96	2.54	23.09	0.00	0.03	53.45	24.61	5.79
1600	40.32	19.74	10.63	22.82	0.00	0.02	44.13	29.54	6.97
1700	40.18	19.67	14.86	22.71	0.00	0.02	36.78	33.54	7.83
1800	40.41	19.78	15.80	22.85	0.00	0.03	32.90	35.91	8.29

Conclusions

Thus, the calculations carried out fully allow us to consider all the physico-chemical processes occurring during the smelting of chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy by the carbothermic method. The optimal consumption of solid carbon is 17 kg per 100 kg of ore mixture, the chemical composition at 1800 °C is, %: Cr–43.43; Mn–21.28; Si – 10.25; Fe – 24.55.

Thermodynamic calculations also show that increasing the consumption of solid carbon to 20 kg per 100 kg of ore mixture reduces the chromium and manganese content, the chemical composition at 1800 °C is, %: Cr – 40.41; Mn – 19.78; Si – 15.80; Fe – 22.85.

Financing

The research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant № AP19676290).

REFERENCES

1 **Druinskij, M. I., Zhuchkov, V. I.** Poluchenie kompleksny`x ferrosplavov iz mineral`nogo sy`r`ya Kazaxstana. – Alma-Ata: Nauka, 1988. – 208 p.

2 **Salimgerej, N. A.** Fazovy`e ravnovesiya pri plavke xromomargancevo-kremnievogo splava: dis. ... magistr texn. nauk: 6M070900. - Karaganda, 2019. - 53 p.

3 **Maxambetov, E. N., Timirbaeva, N. R., Bajsanov, A. S. i dr.** Termodinamicheskij analiz vosstanovitel`ny`x processov vy`plavki ferrosplavov iz texnogenny`x otxodov ugol`noj i metallurgicheskoy promy`shlennosti // Trudy` kongressa «Fundamental`ny`e issledovaniya i prikladny`e razrabotki processov pererabotki i utilizacii texnogenny`x obrazovaniy. TEXNOGEN-2019». – Ekaterinburg, 2019. – P. 288–290.

4 **Bajsanov, S. O., Shabanov, E. Zh., Bajsanov, A. S.** Vovlechenie v metallurgicheskij peredel otxodov ugol`noj i ferrosplavnoj promy`shlennosti s polucheniem ligatury` s xromom // Trudy` Universiteta. – 2017. – № 4. – P. 24–26.

5 **Toly`mbekov, M. Zh., Bajcanov, C. O., Mucina, I. B. i dr.** Pazpabotka texnologii vy`plavki kompleknogo cplava AXC (alyuminij-xpom-kpemnij) // Teopiya i ppaktika feppocplavnogo ppoizvodctva: sb. nauch. tpudov mezhdunap. konf., pocv. 50-letiyu OAO «Cepovckij zavod feppocplavov». – Nizhnij Tagil: Kn. izd-vo, 2008. – P. 122–129.

6 **Medvedev, G. V., Takenov, T. D.** Splav AMS. – Alma-Ata: Nauka, 1979. – 140 p.

7 **Zhakan, A. M., Bajmy`rza, E. S.** Analiz fazovy`x ravnovesij v metallicheskoj sisteme Cr-Mn-Si-Fe pri standartnoj temperature metodom termodinamicheskoy diagrammy` // Materialy` XIX Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molody`x ucheny`x, doktorantov PhD, magistrantov i studentov «MOLODEZH`, NAUKA I INNOVACII». - Aktobe: Aktyubinskij regional`ny`j universitet im. K.Zhubanova, 2023. – P. 213–215.

8 **Shevko, V. M., Karataeva, G. E., Badikova, A. D., i dr.** Termodinamicheskaya model` vliyaniya temperatury` i ugleroda na poluchenie ferrosplava i karbida kal`ciya

iz bazal'ta mestorozhdeniya Dubersaj // Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo sy'r'ya. – 2018. – № 3. – P. 86–94.

9 Scientific Group Thermodata Europe 2017 [E'lektronny'j resurs] – URL: <https://www.factsage.com/>. svobodny'j. – Zagl. s e`krana. (data obrashheniya 04.06.2018)

10 **Makhambetov, Ye., Timirbayeva, N., Baisanov, S., Baisanov, A. et al.** Thermodynamic modeling of phase composition for Fe-Ca-Si-Al system // Metalurgija. – 2020. – Vol. 60, Issue 1–2. – P. 117–120.

Material received on 10.07.23.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Друинский, М. И., Жучков, В. И.** Получение комплексных ферросплавов из минерального сырья Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 208 с.

2 **Салимгерей, Н. А.** Фазовые равновесия при плавке хромомарганцево-кремниевого сплава: дис. ... магистр техн. наук: 6M070900. – Караганда, 2019. – 53 С.

3 **Махамбетов, Е. Н., Тимирбаева, Н. Р., Байсанов, А. С. и др.** Термодинамический анализ восстановительных процессов выплавки ферросплавов из техногенных отходов угольной и металлургической промышленности // Труды конгресса «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. ТЕХНОГЕН-2019». – Екатеринбург, 2019. – С. 288–290.

4 **Байсанов, С. О., Шабанов, Е. Ж., Байсанов, А. С.** Вовлечение в металлургический передел отходов угольной и ферросплавной промышленности с получением лигатуры с хромом // Труды Университета. – 2017. – № 4. – С. 24–26.

5 **Толымбеков, М. Ж., Байсанов, С. О., Мусина, И. Б. и др.** Разработка технологии выплавки комплексного сплава АХС (алюминий-хром-кремний) // Теория и практика ферросплавного производства: сб. науч. трудов междунар. конф., посв. 50-летию ОАО «Серовский завод ферросплавов». – Нижний Тагил: Кн. изд-во, 2008. – С. 122–129.

6 **Медведев, Г. В., Такенов, Т. Д.** Сплав АМС. – Алма-Ата : Наука, 1979. – 140 с.

7 **Жакан, А. М., Баймырза, Е. С.** Анализ фазовых равновесий в металлической системе Cr-Mn-Si-Fe при стандартной температуре методом термодинамической диаграммы // Материалы XIX Международной научной конференции молодых ученых, докторантов PhD, магистрантов и студентов «МОЛОДЕЖЬ, НАУКА И ИННОВАЦИИ». - Актобе: Актюбинский региональный университет им. К.Жубанова, 2023. – С. 213–215.

8 **Шевко, В. М., Каратаева, Г. Е., Бадикова, А. Д., и др.** Термодинамическая модель влияния температуры и углерода на получение ферросплава и карбида кальция из базальта месторождения Дуберсай // Комплексное использование минерального сырья. – 2018. – № 3. – С. 86–94.

9 Scientific Group ThermoData Europe 2017. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.factsage.com/>. свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения 04.06.2018)

10 Makhambetov, Ye., Timirbayeva, N., Baisanov, S., Baisanov, A. et al. Thermodynamic modeling of phase composition for Fe-Ca-Si-Al system // Metalurgija. – 2020. – Vol. 60, Issue 1–2. – P. 117–120.

**Е. Н. Махамбетов¹, С. Т. Габдуллин², З. Зулхан³,
А. М. Жақан⁴, А. А. Мырзағалиев⁵*

^{1,2,4}Ж.Өбішев атындағы химико-металлургиялық институт,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ;

³Тау-кен ісі және мұнай инженериясы факультеті,

Бандунг технологиялық институты, Индонезия;

⁵«ERG-дің ғылыми-зерттеу және инжиниринг орталығы»

ЖШС, Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.

Материал 10.07.23 баспаға түсті.

ЖАҢА КЕШЕНДІ ХРОМ-МАРГАНЕЦ-КРЕМНИЙ ҚҰРАМДАС ФЕРРОҚОРЫТПАНЫ БАЛҚЫТУ ПРОЦЕСІН ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Бұл мақалада Қазақстанның хром және марганец кендерінен құрамында хром-марганец-кремний бар ферроқорытпаны балқыту үрдісін толық термодинамикалық модельдеу нәтижелері келтірілген. Құрамында хром-марганец-кремний бар ферроқорытпаны балқыту үрдісін толық термодинамикалық модельдеу «HSC Chemistry 6» бағдарламалық кешенінде жүргізілді. Бұл бағдарламалық кешеннің жұмыс принципі максималды энтропия принципіне негізделген және термодинамикалық жүйені құрайтын реакция компоненттерінің барлық белгілі қасиеттерін ескереді. Кешенді қорытпаны балқыту үрдісін модельдеуге арналған термодинамикалық талдау үш нақты шихта құрамы үшін 900-ден 1800 °C дейінгі температуралық интервалда жүргізілді (10% қатты тотықсыздандыргыштың жетіспеушілігімен, қалыпты режиммен және 10% қатты тотықсыздандыргыштың артық мөлшерімен). Кремний, алюминий, кальций, марганец, хром және темірдің бірлескен карботермиялық тотықсыздану механизмі Cr-Si-Al-Ca-Mn-Mg-O-C жүйесі арқылы зерттелді. Жүргізілген есептеулер құрамында хром-марганец-кремний бар ферроқорытпаны карботермиялық тәсілмен балқыту кезінде болатын барлық физика-химиялық үрдістерді толық қарауға мүмкіндік береді. Термодинамикалық мәліметтерге сәйкес 17 кг мөлшерінде 100 кг кен қоспасына (хром және марганец кендері) қатты көміртектің оңтайлы шығыны анықталды. 1800 °C температурада қорытпаның химиялық құрамы %: Cr-43.43; Mn - 21.28; Si - 10.25 және Fe-24.55.

Кілтті сөздер: кешенді қорытпа, карботермиялық үрдіс, құрамында хром-марганец-кремний бар ферроқорытпа, термодинамика, хром кені, марганец кені.

**Е. Н. Махамбетов¹, С. Т. Габдуллин², З. Зулхан³,*

А. М. Жакан⁴, А. А. Мырзагалиев⁵

^{1,2,4} Химико-металлургический институт имени Ж.Абишева,
Республика Казахстан, г. Караганда.

³ Факультет горного дела и нефтяной инженерии,
Технологический институт Бандунга, Индонезия;

⁵ ТОО «Научно-исследовательский инжиниринговый центр» ERG,
Республика Казахстан, г. Актобе.

Материал поступил в редакцию 10.07.23.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ НОВОГО КОМПЛЕКСНОГО ХРОМ-МАРГАНЕЦ- КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩЕГО ФЕРРОСПЛАВА

В данной статье приведены результаты полного термодинамического моделирования процесса выплавки хром-марганец-кремнийсодержащего ферросплава из хромовых и марганцевых руд Казахстана. Полное термодинамическое моделирование процесса выплавки хром-марганец-кремнийсодержащего ферросплава были произведены в программном комплексе «HSC Chemistry 6». Принцип работы данного программного комплекса основан на принципе максимума энтропии и учитывающий все известные свойства реагирующих компонентов, составляющих термодинамическую систему. Термодинамический анализ для моделирования процесса выплавки комплексного сплава осуществлялся в температурном интервале от 900 до 1800 °С для трех реальных составов шихты (с недостатком 10 % твердого восстановителя, с нормальным ходом режима и с избытком 10 % твердого восстановителя). Механизм совместного карботермического восстановления кремния, алюминия, кальция, марганца, хрома и железа изучали по системе Cr-Si-Al-Ca-Mn-Mg-O-C. Проведенные расчеты, в полной мере позволяют рассмотреть все физико-химические процессы, протекающие при выплавке хром-марганец-кремнийсодержащего ферросплава карботермическим способом. Согласно термодинамическим данным установлен оптимальный расход твердого углерода на 100 кг рудной смеси (хромовой и марганцевой руды), в количестве 17 кг. Химический состав сплава при 1800 °С составляет, %: Cr - 43.43; Mn - 21.28; Si - 10.25 и Fe - 24.55.

Ключевые слова: комплексный сплав, карботермический процесс, хром-марганец-кремнийсодержащий ферросплав, термодинамика, хромовая руда, марганцевая руда.

Теруге 08.09.23 ж. жіберілді. Басуға 29.09.23 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

5,07 Mb RAM

Шартты баспа табағы 17,61 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4133

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

nitk.tou.edu.kz