

ӘОЖ 669.15-198

Г.Е. Каратаева*, В.М. Шевко, Г.А. Битанова, Қ.М. Полатова

т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

т.ғ.д., профессор, М.Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

т.ғ.к., доцент, М.Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

аға оқытушы, М.Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

*Корреспондент авторы: karataevage@mail.ru

АЮСАЙ КЕН ОРНЫНЫҢ КОНДИЦИЯЛЫ ЕМЕС БОКСИТТЕРІНЕН ФЕРРОҚОРЫТПА АЛУДЫ КОМПЬЮТЕРЛІК ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Түйін

Қазақстанның Аюсай кен орнының бокситтерінен ферроқорытпа алудың зерттеу нәтижелері келтірілген. Термодинамикалық модельдеу зерттеуі кезінде HSC-6.0 Chemistry бағдарламалық кешені қолданылды, ол Гиббс энергиясын минимизациялау принципіне негізделген. FeSi25 маркалы ферросилицийдің түзілуі 1700 - 1800°C температура аралығында және темірдің 26%, 36% мөлшерінде байқалады. FeSi25 маркалы ферросилиций 1700-1800°C температураларда және шихтадағы темір 26% құрағанда түзіледі, ал қорытпада металдардың концентрациясы 26,2-27,9% Si, 0,2-1,4% Al аралығында болады. 36% теміржәне 1700-1800°C температура кезінде маркалық ферросилиций (FeSi25) түзіледі, оның құрамындағы кремнийдің концентрациясы 22,3%-дан 23,7%-ға дейін, алюминийдің концентрациясы 0,2%-дан 1,1%-ға дейін болатыны табылды. Шихтадағы темір мөлшері 16% - 36% аралығында болғанда, кремний мен алюминийдің ферроқорытпаға өту дәрежесі артады, нәтижесінде кремний 93,7%-ға, ал алюминий 47,3%-ға жететіндігі анықталды. Материалдық балансқа сәйкес, 100 кг бокситтен 61,2 кг маркалық ферросилиций алу мүмкіндігі бар.

Кілттік сөздер: термодинамикалық модельдеу, кондициялы емес боксит, көміртегі, темір, ферросилиций, лигатура.

Кіріспе

Қазіргі уақытта алюминий өндіру әлемдегі боксит кен құраушы дененің 28-60% массасын құрайды. Бокситтерде көп мөлшерде қоспалы қалдықтардың болуы, олардан басқа түсті металдарды алу мүмкіндігін ашады [1]. Бокситтер – гидратталған алюминий оксидтерінен тұратын шөгінді тау жыныстары болып табылады және олар шамамен 40-қа жуық бағалы элементтерді [2] қамтиды: сирек металдар (скандий, германий, галлий, ванадий және т.б.). Сондықтан бокситтер алюминий өндірудің шикізаты ғана емес, сондай-ақ алюмосиликаттар, керамика, тыңайтқыштар және басқа да өнімдер алу үшін де шикізат болып табылады [2,3].

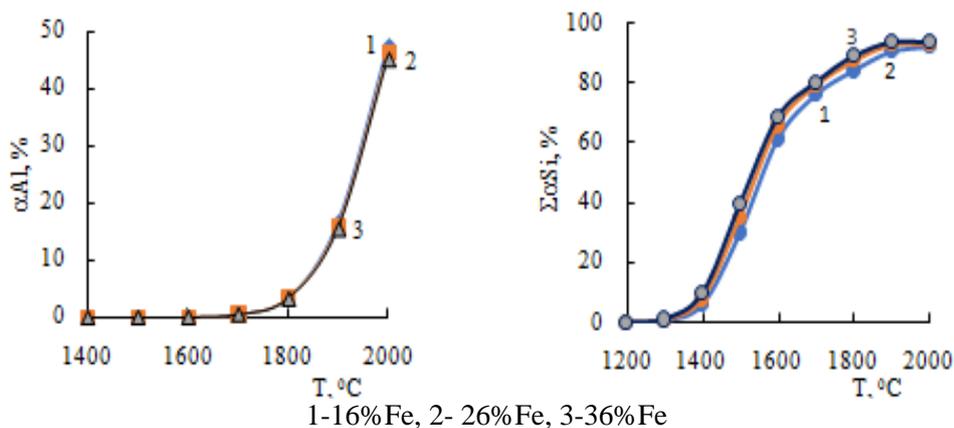
Әлемдегі бокситтердің геологиялық қоры 90 миллиард тоннаға жуық [4].

Қазақстан боксит қоры бойынша әлемде 11-орында (809 миллион тонна [5]). Қазақстанда ең ірі боксит қоры Красноярсь, Белинское, Айт, сондай-ақ Батыс-Торгай, Амангелді бокситті аймақтарына тиесілі, сонымен қатар Аюсай кенорны да бар [6]. Қазақстанның алюминий өнеркәсібінің шикізаттық базасы жаңа боксит кенорындарының ашылуына байланысты үнемі кеңейіп отырады, бұл ретте кондициялы бокситтермен қатар кремний модулі $\geq 2,06-2,65$ болып келетін бокситтердің кейбір (кейде одан да көп) бөлігі кондициялы емес [7].

Осылайша, Қазақстанның кондициялы емес бокситтерін өңдеу тек алюминий өндіру үшін ғана емес, сонымен қатар абразивті отқа төзімді материалдар, қалыптау материалдары, пигменттер, электрокорунд және ферроқорытпалар алу үшін де өзекті болып табылады.

Жұмыстың мақсаты – Аюсай кенорнының кремний модулі 0,8-1,3 болатын кондициялы емес бокситтерінен ферроқорытпа алуды термодинамикалық болжау.

2-ші суретте боксит – С – nFe жүйесіндегі алюминийдің және жалпы кремнийдің қорытпаға тепе-теңдік таралуына температураның әсері көрсетілген. Алюминий ферроқорытпаға 1700°C температурадан бастап өтеді. Температураның 2000°C дейін көтерілуімен алюминийдің өту дәрежесі 47,33%-ға дейін артады, ал қалған алюминий қожды фазаға өтеді. Қорытпаның түзілуі температураның > 1300°C болуымен басталады. Температураның 2000°C дейін көтерілуімен кремнийдің қорытпаға өту дәрежесі 93,68%-ға дейін артады.



Сурет 2 – αAl және $\Sigma\alpha\text{Si}$ қорытпаға өту дәрежесіне температураның әсері

Кремнийдің $\Sigma(\alpha\text{Si}, \alpha\text{FeSi}, \alpha\text{FeSi}_2, \alpha\text{Fe}_3\text{Si}, \alpha\text{Fe}_5\text{Si}_3)$ түрінде $\Sigma\alpha\text{Si}$ қорытпасына жалпы өту дәрежесіне температураның әсер ету теңдеуі келесі түрінде алынды:

$$\Sigma\alpha\text{Si} = 44,716 - 0,1251 \cdot T + 8,0 \cdot 10^{-5} \cdot T^2, (R^2 = 0,9213) \quad (1)$$

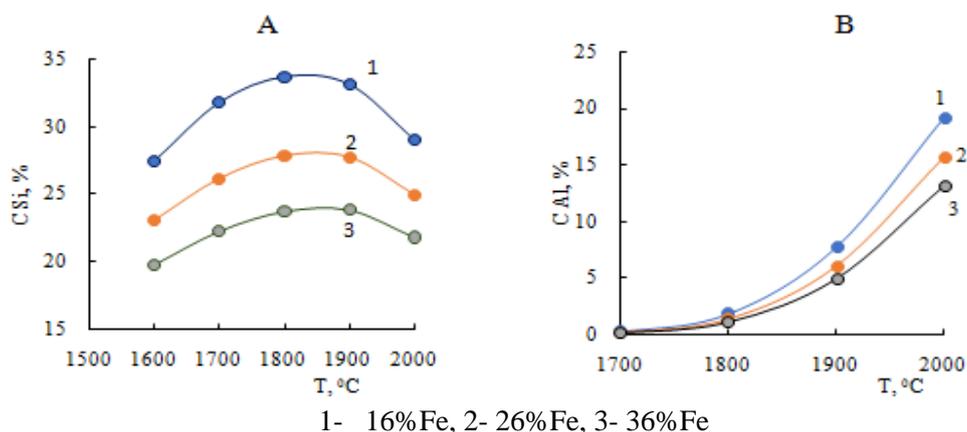
2,3 -ші кестелерде және 3-ші суретте түзілетін ферроқорытпадағы кремний мен алюминий концентрациясы келтіріледі.

Кесте 2 – Қорытпадағы кремний концентрациясына температура мен темірдің әсері

Темір мөлшері, %	Температура, °C				
	1600	1700	1800	1900	2000
16	27,47	31,81	33,71	33,14	29,04
26	23,05	26,18	27,89	27,78	24,96
36	19,74	22,27	23,76	23,87	21,8

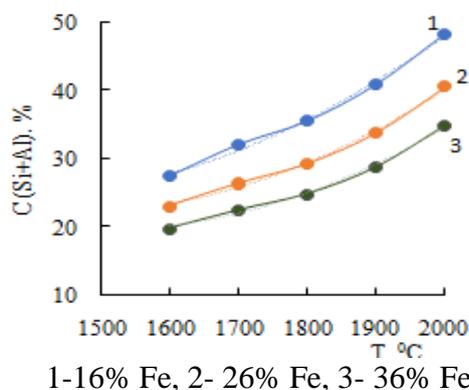
Кесте 3 - Қорытпадағы алюминий концентрациясына температура мен темірдің әсері

Темір мөлшері, %	Температура, °C				
	1600	1700	1800	1900	2000
16	0,04	0,3	1,82	7,71	19,19
26	0,03	0,23	1,38	6,02	15,6
36	0,023	0,18	1,1	4,92	13,12



Сурет 3 –Температура мен темірдің ферроқорытпадағы кремний (А) мен алюминий (В) концентрациясына әсері

3-суреттен көрініп тұрғандай, кремнийдің максималды концентрациясы 1800°C температурада және темір 16% болғанда (33,71%) байқалады. 2000°C температурада және 16% темір мөлшерінде қорытпада алюминийдің максималды концентрациясы 19,19% дейін жетеді. Келесі заңдылық байқалады: темір мөлшері 16%-дан 36%-ға дейін артқан сайын кремний мен алюминий концентрациясы төмендейді. 1600-1800°C температураларында (қорытпадағы алюминий концентрациясы 0,04-1,82% аралығында) жүйеде FeSi₂₅ маркалы ферросилиций түзіледі [11]. 1800°C жоғары температураларда Fe-Si-Al ферроқорытпасы түзіледі. Мысалы, 2000°C температурада және 16% темір мөлшерінде қорытпада 29,04% кремний және 19,19% алюминий болады, бұл қорытпаны лигатураға жатқызуға болады.



Сурет 4 -Температура мен темір мөлшерінің ферроқорытпадағы кремний мен алюминийдің C(Si+Al) жалпы концентрациясына әсері

4-суреттен көрініптұрғандай, температураның көтерілуімен қорытпадағы кремний мен алюминийдің жалпы концентрациясы 1600–2000°C аралығында 19,8%-дан 48,2%-ға дейін артады. Температура тұрақты болғанда, темірдің шихтадағы мөлшерінің артуымен ферроқорытпадағы C(Si+Al) көбейеді. Максималды C(Si+Al) қорытпаға өтуі 2000°C температурада және 16% темірде 48,23%-ды құрайды.

Қорытпадағы металдардың жалпы концентрациясына (Si + Al, %) температураның әсер етуінің тәуелділік тендеулері алынған:
 - 16% темір мөлшерінде:

$$\Sigma C(\text{Si+Al}) = 118,1 - 0,1416 \cdot T + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T^2, \quad (R^2 = 0,9954) \quad (2)$$

- 26% темір мөлшерінде:

$$\Sigma C(\text{Si+Al}) = 150,58 - 0,177 \cdot T + 6,0 \cdot 10^{-5} \cdot T^2, \quad (R^2 = 0,9959) \quad (3)$$

- 36% темір мөлшерінде:

$$\Sigma C(\text{Si+Al}) = 153,52 - 0,1795 \cdot T + 6,0 \cdot 10^{-5} \cdot T^2, \quad (R^2 = 0,9955) \quad (4)$$

Қорытынды

Термодинамикалық модельдеу әдісімен Аюсай кенорнындағы бокситтердің көміртегі және темірмен өзара әрекеттесуін зерттеу барысында анықталғаны:

- Түзілу өнімдеріне мыналар жатады: Si, FeSi, FeSi₂, Fe₃Si, Fe₅Si₃, Fe, CaSiO₃, SiO(g), MgSiO₃, K₂O·SiO₂.
- 1700°C температурада алюминийдің феррокорытпаға өтуі басталады және оның қорытпаға өтуінің максималды мөлшері 47,33%-ға жетеді (2000°C).
- Темір мөлшері 16%-дан 36%-ға дейін боксит массасында артқан сайын феррокорытпада кремний мен алюминий концентрациясы артады: 33,71% Si және 19,19% Al.
- 1700-1800°C температураларында және темір мөлшері 26-36% болған жүйелерде FeSi₂₅ маркалы ферросилиций түзіледі, ол 22,27-27,89% Si және 0,18-1,38% Al құрамында болады, онда 93,7% кремний шығарылады.
- Лигатураның түзілуі ≥1800°C кезінде байқалады, құрамында 23,8-33,1% Si және 4,9-19,2% Al болады.
- 100 кг бокситтен 61,2 кг FeSi₂₅ маркалы ферросилицийді балқытуға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Перспективы алюминиевой отрасли Казахстана. Доступно на: <https://np.kz/news/ekonomika/promyshlennost/perspektivy-alyuminievoj-otrasli-kazahstana> (от 30.09.2024г.).
2. Новая энерго- и ресурсосберегающая замкнутая технология получения металлургического глинозема из низкокачественного алюминий-содержащего сырья. Доступно на: <http://newchem.tech/d/glinozem.pdf> (от 28.01.2025г.).
3. Логинова И.В., Шопперт А.А., Рогожников Д.А., Кырчиков А.В. Производство глинозема и экономические расчеты в цветной металлургии: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд. УМЦУПИ, 2016, 253с.
4. Несіпбай А.Қ. Разработка технологии предварительного химического обогащения низкокачественных гиббсит-каолининовых бокситов. Дис. ... магистра. Алматы: Satbayev University, 2022, 45с.
5. Запасы алюминия в Казахстане оцениваются в 809 млн. тонн. Доступно на: <https://online.zakon.kz/Document> (от 01.02.2025г.).
6. Какие руды алюминия добывают в Казахстане. Доступно на: <http://kazspecgeo.com/article/kakie-rudyi-alyuminiya-dobyivayut-v-kazahstane.html> (от 02.02.2025г.).
7. СТ РК 3272-2018 Бокситы. Технические условия. Национальный стандарт РК. [Электронный ресурс]: стандарт. - Введ. с 01.01.2020. - Электрон. текстовые дан. - Астана: Ком. техн. регулирования и метрологии М-ва по инвестициям и развитию РК (Госстандарт), 2018, 16с.
8. Удалов Ю.П. Применение программных комплексов вычислительной и геометрической термодинамики в проектировании технологических процессов неорганических веществ. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2012, 187с.

9. Торговцев А.К., Пикалова И.А., Юсупова Ю.С. Математическое моделирование металлургических процессов. Алматы: Эпиграф, 2015, 144с.
10. Шевко В.М., Сержанов Г.М., Каратаева Г.Е., Аманов Д.Д. Расчет равновесного распределения элементов применительно к программному комплексу HSC-5.1. Программа ЭВМ. Свидетельство №1501 РК, 2019.
11. ГОСТ 1415-93 - Ферросилиций. Технические требования и условия поставки. Минск: издательство стандартов, 1993, 11с. (изменения №1, протокол №26 от 8.12.2004г).

References

1. Perspektivy aljuminievoj otrasli Kazahstana. Dostupno na: <https://np.kz/news/ekonomika/promyshlennost/perspektivy-alyuminievoj-otrasli-kazahstana> (ot 30.09.2024g.).
2. Novaja jenergo- i resursosberegajushhaja zamknutaja tehnologija poluchenija metallurgicheskogo glinozema iz nizekchachestvennogo aljuminij-soderzhashhego syr'ja. Dostupno na: <http://newchem.tech/d/glinozem.pdf>(ot 28.01.2025g.).
3. Loginova I.V., Shoppert A.A., Rogozhnikov D.A., Kyrchikov A.V. Proizvodstvo glinozema i jekonomicheskie raschety v cvetnoj metallurgii: Uchebnoe posobie. Ekaterinburg: Izd. UMCUPI, 2016, 253s.
4. Nesipbaj A.K. Razrabotka tehnologii predvaritel'nogo himicheskogo obogashhenija nizekchachestvennyh gibbsit-kaolinitovyh boksitov. Dis. ... magistra. Almaty: Satbayev University, 2022, 45s.
5. Zapasy aljuminija v Kazahstane ocenivajutsja v 809 mln.tonn. Dostupno na: <https://online.zakon.kz/Document> (ot 01.02.2025g.).
6. Kakie rudy aljuminija dobyvajut v Kazahstane. Dostupno na: <http://kazspecgeo.com/article/kakie-rudy-alyuminiya-dobyivayut-v-kazahstane.html>(ot 02.02.2025g.).
7. ST RK 3272-2018 Boksity. Tehnicheskie uslovija. Nacional'nyj standart RK. [Jelektronnyj resurs]: standart. - Vved. s 01.01.2020. - Jelektron. tekstovye dan. - Astana: Kom. tehn.regulirovanija i metrologii M-va po investicijam i razvitiju RK (Gosstandart), 2018, 16s.
8. Udalov Ju.P. Primenenie programmnyh kompleksov vychislitel'noj i geometricheskoy termodinamiki v proektirovanii tehnologicheskix processov neorganicheskix veshhestv. SPb.: SPbGTI (TU), 2012, 187s.
9. Torgovcev A.K., Pikalova I.A., Jusupova Ju.S. Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskix processov. Almaty: Jepigraf, 2015, 144s.
10. Shevko V.M., Serzhanov G.M., Karataeva G.E., Amanov D.D. Raschet ravnesnogo raspredelenija jelementov primenitel'no k programmnomu kompleksu HSC-5.1. Programma JeVM. Svidetel'stvo №1501 RK, 2019.
11. GOST 1415-93 - Ferrosilicij. Tehnicheskie trebovanija i uslovija postavki. Minsk: izdatel'stvo standartov, 1993, 11s. (izmenenija №1, protokol №26 ot 8.12.2004g).

Г.Е. Каратаева*, В.М. Шевко, Г.А. Битанова, К.М. Полатова

к.т.н., ассоциированный профессор, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

д.т.н., профессор, ЮКУ им.М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

к.т.н., доцент, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

старший преподаватель, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

*Автор для корреспонденции: karataevage@mail.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОСПЛАВОВ ИЗ НЕКОНДИЦИОННЫХ БОКСИТОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЮСАЙ

Аннотация

Приведены результаты исследований получения ферросплава из казахстанских бокситов месторождения Аюсай. В процессе исследования термодинамического моделирования использовали программный комплекс HSC-6.0 Chemistry, основанный на принципе минимизации энергии Гиббса. Формирование ферросилиция марки FeSi25 наблюдается в температурном интервале 1700 - 1800⁰С и количества железа 26%, 36%. Ферросилиций марки FeSi25 образуется при температурах 1700-1800⁰С и содержание 26% железа в шихте, при этом концентрация металлов в сплаве составляет 26,2-27,9% Si, 0,2-1,4% Al. Найдено, что при содержании 36% железа и 1700-1800⁰С образуется марочный ферросилиций (FeSi25), с концентрацией в сплаве кремния от 22,3 до 23,7%; алюминия от 0,2 до 1,1%. Установлено, что с увеличением в шихте количества железа 16 - 36% повышается степень перехода кремния и алюминия в ферросплав, так Si до 93,7%, а Al до 47,3%. Исходя из материального баланса из 100кг бокситов, возможно, получить 61,2 кг марочного ферросилиция.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, некондиционный боксит, углерод, железо, ферросилиций, лигатура.

G.E. Karataeva*, V.M. Shevko, G.A. Bitanova, K.M. Polatova

Cand.Tech.Sci., Associate Professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

Dr.Tech.Sci., professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

Cand.Tech.Sci., Associate Professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

senior lecturer, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

*Corresponding author's email: karataevage@mail.ru

COMPUTER THERMODYNAMIC MODELING OF FERROALLOY EXTRACTION FROM NON-CONDITIONED BAUXITES OF THE AYUSAI FIELD

Abstract

The results of studies of ferroalloy production from Kazakh bauxites of the Ayusay deposit presented in the article. In the process of thermodynamic modeling study the HSC-6.0 Chemistry software package based on the principle of minimization of Gibbs energy was used. Formation of ferrosilicon of the FeSi25 brand is observed in the temperature range of 1700 - 1800⁰С and the amount of iron of 26%, 36%. Ferrosilicon of the FeSi25 brand is formed at temperatures of 1700-1800⁰С and the content of 26% iron in the charge, while the concentration of metals in the alloy is 26.2-27.9% Si, 0.2-1.4% Al. It was found that at the content of 36% iron and 1700-1800⁰С the grade ferrosilicon (FeSi25) is formed, with the concentration in the alloy of silicon from 22.3 to 23.7%; aluminum from 0.2 to 1.1%. It has been established that with an increase in the amount of iron in the batch of 16 - 36%, the degree of transition of silicon and aluminum into the ferroalloy increases, so Si up to 93.7%, and Al up to 47.3%. Based on the material balance from 100 kg of bauxite, it is possible to obtain 61.2 kg of grade ferrosilicon.

Keywords: thermodynamic modeling, non-conditioned bauxite, carbon, iron, ferrosilicon, ligature.