

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i1.05>

## Investigation of phase formation during roasting of chromium pellets by the thermodynamic simulation method

D.A. Yessengaliyev<sup>1\*</sup>, B.S. Kelamanov<sup>1</sup>, Ye.B. Tazhiyev<sup>2</sup>, T.S. Santai<sup>1</sup>, Zh.M. Tastayev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Aktobe regional university named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

<sup>2</sup>Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

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

**Abstract.** One of the ways to optimize the quality of production of chromium raw materials is to introduce slags capable of forming a slow-melting silicate compound to improve technical and economic indicators. The reason for the choice of these components is that they are used to regulate the slag mode in the process of melting ferrochrome alloy. The article presents the results of thermodynamic changes in the use of free chromium slag in the high-temperature zone and easily melting aluminosilicate slags of various compositions. Thermodynamic modeling during the firing of chrome pellets was carried out using the “TERRA” software package. Full thermodynamic modeling was carried out on the basis of a multicomponent CaO-MgO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system at a temperature range of 800-1800°C and at a pressure of 0.1 MPa. As initial data for determining the parameters of thermodynamic equilibrium for the actual compositions of the chromium pellet firing charges, the host rock of chromium ore (the host part of the rock) and fluxing additives (aluminosilicate material) with different ratios were used. It was found that with the following optimal content of the fluxing material: SiO<sub>2</sub> 50-55%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14-16%; CaO 12-14%; MgO 5-8%; FeO 5-8%, the sintering process of chrome pellets can be carried out at relatively low temperatures (1200-1300°C). As a result, phase compositions with low melting points (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, CaMg (Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>), MgSiO<sub>3</sub>) were determined, where they can affect the technical and economic performance of the production of chrome pellets.

**Keywords:** chrome pellets, aluminosilicate materials, thermodynamic modeling, physico-chemical process, temperature, firing.

### 1. Кіріспе

Хром - болат өндірісінде қаттылық, ыстыққа төзімді және коррозияға төзімді қасиеттерді беру үшін негізгі легірлеуші элементтердің бірі болып табылады. Жоғары сапалы болат өндірісі және арнайы сапалық қасиетке ие материалдар (тогтанбайтын және ыстыққа төзімді) өндірісі үлесінің артуымен, қолданылатын шикізаттарға деген талап та күшейтілуде және сұраныс та артуда. Сондықтан хром шикізат өндірісіндегі түзілген хром кені ұнтағын кәдеге жарату және оларды феррокорытпа өндірісіне тарту проблемасы жарты ғасырдан астам уақыт бойы өзекті болып келеді. Хром кендерінің жалпы өндірісі көлемінің 20-50% ұсақ фракция (-10 мм) түрінде үйінділерде шоғырлануы феррокорытпа заводтарында кесекті хром кендерінің тапшылығына ие (соның ішінде силикотермиялық әдіспен өндіретін феррокорытпалар) және өзіндік құнының өсуіне алып келеді. Бұл ретте фракциялық құрамы себебінен кондициялық емес кендердегі жетекші элементтің құрамында 49.0-50.5% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> бар, оны феррохром өндірісіне қажет шикізат ретінде қарастыруға болады.

Бай хром кенінің ұсақ фракцияларын феррокорытпалар өндірісіне тарту оларды кесектеу мәселесін сәтті шешкен жағдайда мүмкін болады немесе кесектеуді қажет етпейтін кентотықсыздандырғыш тұрақты ток пештерде ұсақ хром кенін қолдану арқылы

балқыту. Тұрақты ток пештермен жұмыс жасайтын цехтардың жобасы мен құрылысы едәуір капиталдық шығынды талап етеді және дәстүрлі технологиямен салыстырғанда арнайы технологиялық режимге жұмыс жасайды.

Хром кені ұнтағын кесектеу үрдісін ұйымдастыруда туындайтын проблемалардың бірі, олардың (хром кені ұнтағы) қиын балқығыштығында, яғни жентектеу үрдісі жоғары температурада жүреді. Бұл шекемтастарды күйдіретін конвейерлі машиналардағы болат төсеніштердің беріктігі жоғары болу керек. Конвейердегі болат төсеніштерге шикізат материалдардың жабысуынан тез істен шықпауын алдын алу үшін, сонымен қатар қондырғының уақытша тоқтауы кезінде жылу ауысуына байланыста болат төсеніштердің тотығуын болдырмас үшін, қондырғыға хром кені ұнтағының жүктелу режимін қадағалау керек, болат төсеніштің сапасына аса назар аудару керек және технологиялық, жылу режимдерінде үзілістер болмау керек.

Күйдірілген хром шекемтастардың механикалық беріктігі, шығарылатын өнімнің сапасы мен ассортиментіне қойылатын талаптардың күшейтілуіне байланысты, жыл санап үлкен қызуғышылық тудыруда. Бастапқы шикізат материалының құрамының ерекшелігі және ондағы өтетін (күйдіруде) физико-химиялық үрдістер, осы аталған факторлар феррокорытпа өнімдерін балқыту бойынша бүгінгі күні өте өзекті болып табылады,

өйткені күйдірілген хром шекемтастар күйдіру агрегатынан түскеннен бастап, феррокорытпа балқыту пештеріне жүктеуге дейін өзінің механикалық қасиеттерін сақтауы тиіс. Хром шекемтастардың беріктілігіне оңтайлы әсер ететін қасиет – хром шикізаттардың меншікті шығынын жоғарлату арқылы кондициясыз емес өнімнің шығынын азайту, сонымен қатар өнімнің ассортиментін ұлғайту [1].

Нәтижесінде хром шекемтастарының беріктілігіне бірнеше факторлар әсер етеді. Соның ішінде ең бастысы, негізгі күйдіру қондырғының жиі істен шығуы, өйткені жабдықтағы температураның өзгеруі беріктендірудің термохимиялық реакцияларына байланысты әсер етеді, сонымен қоса бастапқы компоненттердің қасиетіне де басты назар аудару керек, олар өз кезегінде қиын балқытын болып табылады [2].

Отандық хром кендердің қиын балқығыштығы ондағы элементтер қатынастардың  $Si/Fe$ ,  $MgO/Al_2O_3$  жоғары болуы, сонымен қатар хромшпинелидтер мен цементтеуші жыныстардың, соның ішінде серпентин ( $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) құрамына да тікелей байланысты, өйткені олардың балқу температурасы  $2050-2070^\circ C$  және  $1500^\circ C$  сәйкесінше құрайды [3]. Ал, хром шекемтастарды беріктендіру үрдісі, яғни күйдіру қондырғыларының температурасы  $1400^\circ C$  аспайтындықтан, оның қатты фазадағы жентектеу механизмі сұйық фазаның түзілуінсіз жүреді. Хром шекемтастардың беріктендіру үрдісі сұйық силикат фазалардың түзілуіне негізделген, алайда олардың концентрациясы хромит құрамында өте аз. Силикатты фаза әр түрлі желі минералдардың балқуы негізінде түзіледі. Бұл жағдайда балқыған силикат фаза мен хром түйіршіктеріндегі магний құрамдас желі минералдармен ион алмасу үрдісі жүреді [4-7].

Жоғарыда келтірілген факторлар кондициясыз өнімнің көп түзілуіне алып келеді, сәйкесінше тауарлы хромның шығыны да өседі. Сондықтан да осы мақалада қарастыратын негізгі сұрақтардың бірі болып, хром шекемтастарды күйдіру кезіндегі физико-химиялық үрдістерді термодинамикалық есептер тұрғысынан талдау жасау.

Авторлардың [8] пайымдауынша хром концентратының құрамындағы негізгі бос жыныс 10-20% аспайды. Негізгі бос жыныс жентектеу үрдісі мен қатты фазаның түзілуіне себеп болып табылады. Бос жыныс келесідей құрамнан тұрады, %:  $SiO_2$  5-7;  $Al_2O_3$  6-8;  $CaO$  0,1-0,5;  $Fe_{жалпы}$  9-9,5;  $MgO$  15-18.

Қождама қоспалардың хром кендермен байланысқа түсуі, жентектеу үрдісін жеделдету немесе бәсеңдету де мүмкін. Инертті қоспалар жентектелетін бөлшектерді бөліктерге бөлу, жентектеу үрдісін бәсеңдетеді және шекемтастардың беріктігі артады. Қатты фазаның жентектеу жылдамдығы салыстырмалы төмен.

Жентектеу үрдісін үш сатыға бөлуге болады [9-10]:

- салыстырмалы төмен температурада, жентектелетін бөлшектер өзіндік құрылымын сақтайды, яғни бөлшектер арасындағы шекаралар сақталады;
- дене қозғалатын фазалардың, яғни заттар мен бос жыныс жиынтығын білдіреді;
- дене тесігінің саны мен көлемінің азаюы негізінде тығыздықтың өсуі.

Термиялық өңдеу арқылы кристалдық бөлшектердің бір-бірімен жанасуы кезінде зат алмасу жүреді, яғни тұтқыр ағым, беттік және көлемдік диффузия, булану –

конденсация секілді зат алмасу механизмдері жүреді. Аталған механизмдер қатты фазадағы жентектеуге де тән.

Сұйық фаза пайда болған кезде келесідей зат алмасу механизмдері орын алуы мүмкін:

- бөлшектердің арасына сұйықтық еніп, бөлшектердің үйкелісі мен кептелісін азайтып, олардың өзара әрекеттесуін жеделдету мақсатында ол майлау рөлін атқарады және бөлшектерді қайта топтастырады.
- еріту-тұндыру үрдістері қатты фазаның балқымада еруіне қажет. Бұл үрдіс сұйықтықтың беттік керілуі әсерінен жанасатын бөлшектерде жоғары капиллярлық қысым түзеді. Ол ұсақ қатты фазаның сұйықтықта еру көлемі артады және олардың қайта кристалдануы жүреді. Осы үрдісті жүзеге асыру үшін кем дегенде 5% сұйықтық қажет.

Жентектеу температурасын төмендететін қождама қоспаларды таңдау негізінде, кесектелетін хром шикізатының жұмсару температурасына әсерін ескеру керек. Кеннің және кесектелетін шикізаттың (шекемтас, агломерат) жұмсару температурасының бастапқы, соңғы және температуралық аралығы олардың минералогиялық құрамына, ірілігіне, тотықсыздану дәрежесіне және физикалық қасиетіне байланысты. Қыздыру кезіндегі жентектеу үрдісінде жаңа минералды қосылыстар және эвтектикалар түзіледі. Алайда ішкі байланыс күштері бұзылады, нәтижесінде материал қабаты тұтқырлы-пластикалық қасиетке ие болады, содан соң сұйық күйге ауысады. Жентектеу үрдісіне материалдардың фракциялық құрамына тікелей әсер етеді. Хром кені ұнтағын кесектеу үрдісінде ерте жентектеу үрдісі мен қатты фаза түзу үшін қолданылатын қождаманың фракциялық және минералогиялық құрамын ескеру керек.

Кесектеуші шикізатта флюстердің болуы жентектеу үрдісінің температурасына оңтайлы әсер етеді. Мысалы, темірлі агломераттың түзілу зонасына эктастың қосылуы, әксіз нұсқадағы шикізатта материалдармен салыстырғанда, жентектеу температурасын  $200-250^\circ C$  төмендетеді. Бұл үрдісті темір тотығының әктің құрамындағы  $CaO$ -мен байланысы кезінде жеңіл балқытын кальций оливиндері мен ферриттердің түзілуімен түсіндіріледі. Сонымен қоса тәжірибе көрсеткендей, темір кенінің агломератпен байланысы кезінде, темір тотығы кеннің бос жынысындағы  $SiO_2$ -мен  $2FeO \cdot SiO_2$  жеңіл балқытын қосылыс түзеді. Ал хром кені ұнтағы мен агломерат қоспасына жалпы көлемнің 17-20% аралығында кварцитті жүктеу кезінде, сол қоспаның жентектеу температурасының абсолюттік көрсеткіші төмендеді. Жентектеу үрдісіне оңтайлы әсер ететін тағы бір фактор, кесектеуде қолданылатын шикізаттың ішкі құрылымы мен температуралық режимін ескеру қажет.

## 2. Әдіс-тәсілдер

Жұмыстың мақсаты хром кеніне қосымша кальциалюмосиликатты қождама түзгіш компонентті қосу арқылы фаза түзілу үрдісінің термодинамикалық түрлендіруін қарастыру. Термодинамикалық түрлендіруді «ТЕРРА» [11] бағдарлама кешенін қолдану арқылы есептеуді жүргіздік. Қолданылып отырған бағдарламаның артықшылығы – әмбебаптығында, яғни жеке заттардың термиялық және термодинамикалық қасиеттері туралы бір ғана анықтамалық ақпарат негізінде жүйенің химиялық құрамы бойынша еркін

зерттеуге мүмкіндік береді және жоғары температуралы жағдайлар үшін көп компонентті, гетерогенді термодинамикалық жүйенің тепе-теңдік құрамын максималды энтропия принципі негізінде табуға мүмкіндік береді және ол келесідей тұжырымдалған: масса сақталу заңының жағдайында  $M_j = \text{const}$  және энергияның сақталу заңына сай  $U_n = \text{const}$ ,  $S = S_{\text{max}}$ . Максимум энтропияны есептеуде тепе-теңдік жағдайына қол жеткізу әдісіне қарамастан тек термодинамиканың фундаменталды заңдарының негізінде жүйе құрамын бағалауға мүмкіндік береді.

«ТЕРРА» бағдарлама кешенінде белгіленген максимум энтропияны есептеудің негізгі принциптері келесі ережелер болып табылады.

Күрделі жүйенің энтропиясы оның құрамдас бөліктерінен тұратындықтан, зерттелген жүйе қарапайым компоненттерге (ішкі жүйелерге) бөлінеді, ал жалпы энтропияны барлық ішкі жүйелердің энтропиясының қосындысы ретінде есептеледі: газ фазасы, конденсацияланған күйде болатын екі конденсацияланған ерітінділер мен компоненттер тәуелсіз фазалар түзеді:

$$S = S_e + \sum_{p=1}^2 S_p + \sum_{j=1}^{N_{TB}} S_j \quad (1)$$

Газ фазасындағы энтропия келесі формуламен анықталады:

$$S_e = \sum_{i=1}^N (S_i^0(T) - R_0 \ln \frac{R_0 T}{v} n_i) n_i \quad (2)$$

мұндағы  $S_i^0(T)$  – энтропия чистого компонента газа:  $n_i - i$  газ компонентінің мольдер саны;  $R_0$  – эмбебап газ тұрақтысы.

Энтропия жүйесіндегі конденсацияланған заттар ерітіндісінің үлесі жеке құрамдас бөліктердің суммасы ретінде қарастыруға болады. Ерітінділер идеалды болып келеді:

$$S_p = \sum_{r=1}^N (S_r^0(T) - R_0 \ln x_r) n_r \quad (3)$$

Мұндағы  $N_p$  – ерітіндідегі компоненттер саны;  $x_r - r$  ерітінді компоненттердің мольдік үлесі.

Дербес фазалар түрінде болатын жеке заттардың энтропиясын есептеуде, келесі формула қолданылады [13]:

$$S_j = S_j^0(T) n_j \quad (4)$$

Термодинамикалық жүйе үшін құрамында  $P$  ерітінділер, газ фазасы және  $N_{me}$  – конденсацияланған заттары бар болса, энтропия функцияның жүйесі болып табылады және барлық компоненттер жүйесіндегі үлестерді ескере отырып есептеледі:

$$S = \sum_{i=1}^{N_{\Gamma}} (S_i^0(T) - R_0 \ln \frac{R_0 T}{v} n_i) n_i + \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{N_p} (S_{rp}^0(T) - R_0 \ln x_{rp}) n_{rp} + \sum_{j=1}^{N_{TB}} S_j^0(T) n_j \quad (5)$$

Есеп энтропия экстремумын келесі шектеулермен жүйе құрамының функциясы ретінде табуға негізделген:

- Жүйенің толық ішкі энергиясының тұрақтылығы

$$U = \sum_{i=1}^N U_i(T) n_i + \sum_{j=1}^{N_{TB}} U_j(T) n_j + \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{N_p} U_{rp}(T) n_p = \text{const} \quad (6)$$

мұндағы  $U_i, U_j, U_{rp}$  – газ, қатты немесе жүйенің еріген компонентінің ішкі энергиясы сәйкесінше.

- Материалдық баланс шарттарын сақтау

$$-b^E + \sum_{i=1}^{N_r} v_i^E n_i^E + \sum_{j=1}^{N_{TB}} v_j^E n_j^E + \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{N_p} v_{rp}^E n_{rp}^E = 0 \quad (7)$$

мұндағы  $b^E$  – жүйедегі  $E$  элементінің молдік құрамы;  $v_i^E, v_j^E, v_{rp}^E$  –  $E$  элемент қосылысының сәйкес фазаның стехиометриялық коэффициенттері.

- Электронейтралдык шарттарын сақтау

$$\sum_{i=1}^n v_{ei} n_i = 0 \quad (8)$$

мұндағы  $v_{ei}$  –  $i$  газ компонентінің иондау еселігі.

- Идеалды газ үшін күй теңдеу

$$pV - R_0 T \sum_{i=1}^{N_{\Gamma}} n_i = 0 \quad (9)$$

- Ерітінділерді құрайтын фазалардың құрамын шектейтін нормалау қатынасын сақтау.

Бұл қасиеттер көптеген инженерлік есептеулерге тән температура диапазонында газды, қатты және иондалған күйдегі химиялық қосылыстардың кең спектріне белгілі.

Термодинамикалық тепе-теңдікті есептеу арқылы белгілі бір заттарды алудың негізгі мүмкіндігін анықтауға болады, есептің қорытындысы ретінде шекті соңғы күйді бағалау мәселесін шешуде негіз болып табылады, параметрлердің рұқсат етілген мәндерінің облысын анықтауға мүмкіндік береді.

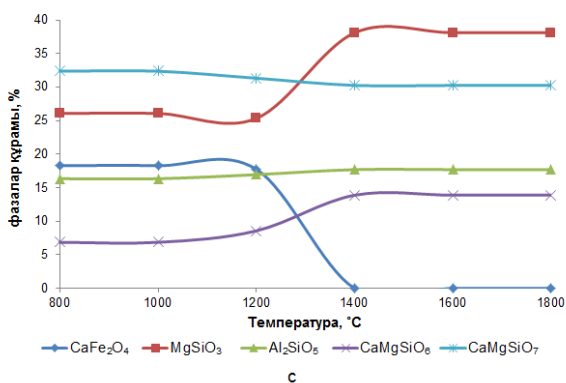
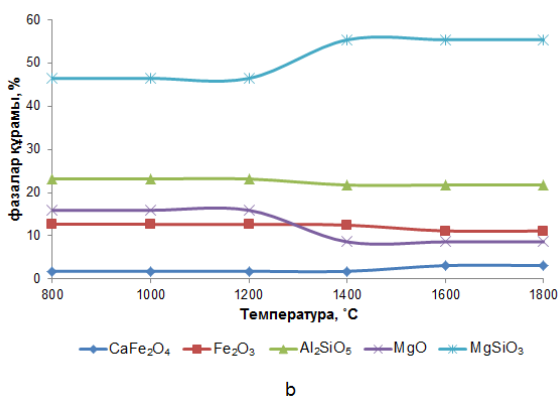
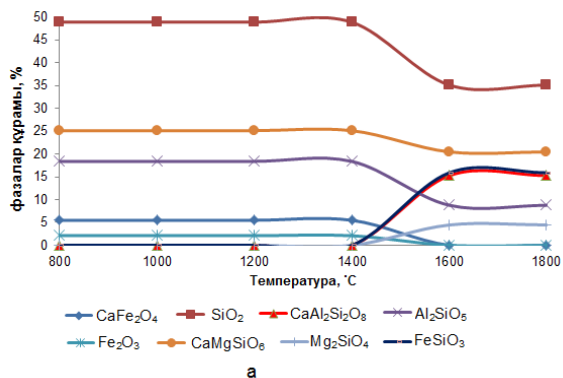
Модельдік есептерді шешу арқылы хром шекемтасын күйдіру үрдісі кезінде негізгі сұйық фаза түзуші қосылыстардың шарттары жасалды.

Толық термодинамикалық модельдеуді  $P = 0.1$  МПа қысымымен  $800-1800^\circ\text{C}$  температура аралығында жүргізілді. Хром шекемтас өндірісінде күйдіру үрдісі  $1350-1400^\circ\text{C}$  аралығындағы температура тән, алайда күйдіру үрдісіне температураның әсерін термодинамикалық тұрғысынан бағалау үшін, есептеуді  $800-1800^\circ\text{C}$  температура интервалында жүргізілді. Сандық модельдеу кезінде  $800-1800^\circ\text{C}$  температура интервалында қоспаның берілген элементтік құрамдағы түзілу мүмкін заттардың концентрация нәтижелерін негізгі және қосалқы бөліктерге  $10^{-4}$  моль/кг маңызды шегімен бөлінді.

Тотығып күйдіру үрдісінде  $\text{FeO}$ -ден  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  дейін тотығатынын ескерсек, онда хром кенінің негізгі бос жыныстарының алюмосиликатты қождама элементтерімен термодинамикалық есептеуді  $\text{CaO-MgO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  көп компонентті жүйе негізінде жүргізілді.

Хромит кені ұнтағын кесектеу технологиясын жетілдіру темір кені материалдарын кесектеу технологиясының фундаменталды негіздер мен аглокуйеженекті қалыптастыру үрдісін білуге негізделеді. Темір кенін кесектеу технологиясы жағдайында сұйық фазаның түзілу үрдісіне, жентектеу параметрлері мен өнімнің беріктігіне темір мен кальций силикаттарының қатынастары айтарлықтай әсер етеді

[12]. Ал, хром кенінің кесектеуде қождама компоненттерінің хром кені ұнтағындағы бос жынысымен байланысқа түсу кезінде магний мен алюминий силикаттарының сұйық фаза түзілуі маңызды роль ойнайды [13]. Сондықтан термодинамикалық түрлендіру кезінде осы шарттар ескерілді.



Сурет 1. Термодинамикалық түрлендіру нәтижесі

Толық термодинамикалық түрлендірудің үш нұсқасы таңдалды, яғни қождама құрамындағы компоненттер:  $\text{SiO}_2$  – 29-55%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 8-18%;  $\text{CaO}$  4-25%;  $\text{MgO}$  – 8-30%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 9-19% аралығында ауытқу арқылы әртүрлі температура аралығында жеңіл балқитын фаза түзу және хром кенінің бос жынысы мен қождама арасындағы оңтайлы құрамын анықтау мақсатында зерттеулер жүргізілді.

а. Хром кенінің бос жынысы + қождама (55%  $\text{SiO}_2$ ; 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 13%  $\text{CaO}$ ; 8%  $\text{MgO}$ ; 9%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ );

б. Хром кенінің бос жынысы + қождама (29%  $\text{SiO}_2$ ; 18%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 4%  $\text{CaO}$ ; 30%  $\text{MgO}$ ; 19%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ );

с. Хром кенінің бос жынысы + қождама (35%  $\text{SiO}_2$ ; 8%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 25%  $\text{CaO}$ ; 18%  $\text{MgO}$ ; 14%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Термодинамикалық түрлендіру нәтижелері сурет 1 келтірілген.

### 3.Нәтижелер

Толық термодинамикалық есептеулердің нәтижесі көрсеткендей хром кені ұнтағының алюмосиликатты қождамамен байланысы негізінде түзілген негізгі фазалар: магнисиликат, темір силкат, алюмосиликат және кальци-магнисиликат. Сурет 1а нәтижесі көрсеткендей, 1400°C температураға дейін айтарлықтай өзгеріс болған жоқ. Алайда температура 1400°C асқан кезде  $\text{SiO}_2$  мен  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  фазаларының концентрациялары 48%-дан 35%-ға дейін және 18%-дан 8%-ға дейін төмендеді, өйткені жаңа  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  фаза түзілді және температура өсуімен темір тотығының силикатты фазаға ауысқанын көруге болады.

Сурет 1б графикалық өзгерісінің нәтижелері көрсеткендей, 1250°C температурадан бастап  $\text{MgSiO}_3$  фаза мөлшері 47%-дан 55%-ға артқанын және  $\text{MgO}$ -ң 16%-дан 8%-ға дейін түскенін көруге болады. Қалған фазалардың айтарлықтай динамикасын көруге болмайды.

Қождама құрамындағы кальций, магний кремний тотықтарының белгілі қатынаста өсуі, төмен температурада ( $T = 1220^\circ\text{C}$ )  $\text{MgSiO}_3$  фазасының концентрациясы 26%-дан 38%-ға дейін күрт өсіп 1800°C температураға дейін өзгеріссіз қалғанын көруге болады (сурет 1с). Оны осы реакция негізінде түсіндіруге болады:  $\text{MgCr}_2\text{O}_4 + \text{FeSiO}_3 = \text{MgSiO}_3 + \text{FeCr}_2\text{O}_4$ .  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  фазасы 1200°C-тан жоғары температурада 17%-дан 0-ге азайып,  $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$  фазаның концентрациясы 8%-дан 14%-ға өскенін көруге болады.

### 4.Талқылау

Теориялық есептеу нәтижелері көрсеткендей, хром шекемтасының жентектеу үрдісіне оңтайлы әсер ететін және төмен температуралық эвтектика түзетін қождамалар келесі құрамға ие болуы керек, %:  $\text{SiO}_2$  50-55;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  14-16;  $\text{CaO}$  12-14;  $\text{MgO}$  5-8;  $\text{FeO}$  5-8.

Алюмосиликатты қождамалардың хром кенінің бос жынысымен әрекеттесуі кезінде магний тотығының үлесі артады, сонымен қоса энстанит  $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $t_{\text{балқу}} = 1355-1557^\circ\text{C}$ ) магнизиалды фазасының және фаялиттің  $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $t_{\text{балқу}} = 1205^\circ\text{C}$ ) өсуін көруге болады, ол байланыстырғыш құрамның төмен температуралық облысқа ауысуына мүмкіндік береді. Сонымен қатар хром кені ұнтағын кесектеуде алюмосиликатты қождамаларды қосу арқылы 800-850°C жоғары температурада қождама құрамындағы  $\text{SiO}_2$  және  $\text{Al}_2\text{O}_3$  хром кені бос жынысындағы  $\text{MgO}$ -мен өзара байланысқа түсіп, 1100°C жоғары температурада кесектелетін материалдың бастапқы жентектелу үрдісін көруге болады, яғни алюмосиликатты фаза төмен температуралы эвтектика облысына ығысады.

Алюмосиликатты қождаманы хром шекемтасы өндірісіне қолдану, дәстүрлі кремнезем негізіндегі қождамалармен салыстырғанда, сұйық фазаның төмен температура интервалында түзілуіне, яғни хромшпинелидтердің жентектелуіне мүмкіндік береді.

Қорытындылай келе, хром шекемтасы өндірісіне алюмосиликатты қождамаларды хром кендерінің бос жыныстарына қосу, фаза түзу үрдісінің нәтижесіне оңтайлы әсер етеді. Жентектеу үрдісін салыстырмалы төмен температурада 1200-1300°C жүргізуге мүмкіндік береді, өйткені олардың фазалық құрамы жоғарыда келтірілген көп компонентті жүйе ішіндегі анортит – диопсид – энстанит – кремнезем тетраэдрде орналасады және шекемтастардың беріктенуі сұйық фаза түзілу үрдісі негізінде жүзеге асады.

Термодинамикалық түрлендіру нәтижесі қажетті құрамды қождамаларды таңдауға және хром шекемтасы технологиясындағы күйдіру үрдісіндегі жүретін негізгі физико-химиялық үрдістерді қарастыруға мүмкіндік берді. Алайда хром шекемтастардың фаза түзілуі мен механикалық қасиетін толық зерттеу үшін тәжірибелік зерттеулерді қажет етеді.

### Әдебиеттер / References

- [1] Zhareken, A.Zh. (2020). Izmenenie fiziko-himicheskikh svoystv hromovyh obozhzhennykh okatyshej. *Vestnik nauki*, 1(22), 260-264
- [2] Tolymbekov, M.Zh., Baysanov, S.O. & Kim, S.V. (2010). Current state and prospects of ferroalloy industry of Kazakhstan. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Ferroalloys Congress: Sustainable Future, Helsinki, Finland*, 29-33
- [3] Abdulabekov, Y. (2006). Razrabotka tekhnologii okomkovaniya melochi hromitovoj rudy s primeneniem keramzitovoj gliny (Doctoral dissertation). *Karaganda: ChMI*
- [4] Stuart, N., Jiang, C., Mark, I.P. (2018). A Review of the Chemistry, Structure and Formation Conditions of Silico-Ferrite of Calcium and Aluminum ('SFCA') Phases. *ISIJ International*, 12(58), 2157-2172. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-203>
- [5] Harman, C.N., Rama Rao, N.S.S. (2007). Use of sintered pellets in production of high carbon ferrochrome. *Proceedings of the 11th International Ferroalloys Congress: IFAPA, New Delhi, India*, 67-74
- [6] Kaliakparov, A.G., Suslov, V.A., Nurmaganbetova, B.N., Yaroshenko, Yu.G., Zhdanov, A.V., Nurmaganbetov, Zh.O. (2017). Vyplavka vysokouglerodistogo ferrohroma iz hromovogo aglomerata, poluchennogo s ispol'zovaniem alyumosilikatnyh flyusov. *Stal'*, (1), 30-34
- [7] Akuov, A., Samuratov, Y., Kelamanov, B., Zhumagaliyev, Y. & Taizhigitova, M. (2020). Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome. *Metalurgija*, 59(4), 529-532
- [8] Kim, A.S., Akberdin, A.A., Isagulov, A.Z. & Sultangaziev, R.B. (2019). Vzaimosvyaz' processov fazoobrazovaniya i kachestva hromitovykh okatyshej pri uprochnyayushchem obzhige. *Trudy universiteta, KarTU*, (4), 24-27
- [9] Akberdin, A.A., Kim, A.S. & Sultangaziev, R.B. (2018). Experiment Planning in the Simulation of Industrial Processes. *Steel in Translation*, 48(9), 573-577. <https://doi.org/10.3103/S0967091218090024>
- [10] Zhunusov, A., Tolymbekova, L., Abdulabekov, Y., Zholdubayeva, Z. & Bykov, P. (2021). Agglomeration of manganese ores and manganese containing wastes of Kazakhstan. *Metalurgija*, 60 (1-2), 101-103
- [11] Trusov, B.G. (2005). Programmaya sistema TERRA dlya modelirovaniya fazovykh i himicheskikh ravnovesij pri vysokih temperaturah. Mater. 3-go mezhdunar. simpoziuma: *Gorenie i plazmohimiya, Qazaq universiteti, Almaty*, 52-57
- [12] Puzanov, V.P., Malygin, A.V. & Kaplun, L.I. (1991). Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty okomkovaniya mnogokomponentnoj shihty. *Izv.AN. SSSR. Metally*, (3), 20-26
- [13] Akberdin, A.A., Kim, A.S. & Akberdin, R.A. (2013). Agglomeration of refractory chromite ore. *Proceedings of INFACON XII – The Thirteenth International Ferro Alloy Congress. Efficient technologies in ferroalloy industry, Kazakhstan*, (1), 1-4

## Термодинамикалық модельдеу әдісі тұрғысынан хром шекемтастарды күйдіру үрдісі кезінде фаза түзілуді зерттеу

Д.А. Есенғалиев<sup>1\*</sup>, Б.С. Келаманов<sup>1</sup>, Е.Б. Тажиев<sup>2</sup>, Т.С. Сәнтай<sup>1</sup>, Ж.М. Тастаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

<sup>2</sup>Satbayev University, Алматы, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [dauralga@mail.ru](mailto:dauralga@mail.ru)

**Аңдатпа.** Хром шикізаттарын кесектеу өндірісінің сапасын оңтайландыру жолдарының бірі және техникалық-экономикалық көрсеткіштерді жақсарту үшін жеңіл балқитын силикатты қосылыс түзе алатын қождамаларды қосу болып табылады. Осы компоненттердің таңдалу себебі, феррохром қорытпасын балқыту үрдісі кезінде қож режимін реттеу кезінде қолданылады. Мақалада жоғары температура облысында хром шекемтасының бос жынысы және әртүрлі құрамдағы жеңіл балқитын алюмосиликатты қождамаларды қолдану кезіндегі термодинамикалық түрлендірудің нәтижесі келтірілген. «ТЕРРА» кешенді бағдарламасын қолдану арқылы хром шекемтастарын күйдіру кезіндегі фазалар түзілудің термодинамикалық модельдеуі жасалды. Есеп CaO-MgO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> көп компонентті жүйе негізінде, 800-1800°C температура аралығында және қысымы 0.1 МПа болатын мәндермен жүргізілді. Термодинамикалық түрлендіруге шикіқұрам материал ретінде хром кенінің бос жынысы мен әр түрлі құрамды алюмосиликатты қождамалар қолданылды. Қождаманың келісідей оңтайлы құрамында SiO<sub>2</sub> 50-55%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14-16%; CaO 12-14%; MgO 5-8%; FeO 5-8% хром шекемтастарының жентектеу үрдісін салыстырмалы төмен

температурада (1200-1300°C) жүргізуге болады. Нәтижесінде төмен температураға ие фазалар құрамы ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ,  $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ ,  $\text{MgSiO}_3$ ) анықталды, бұл хром шекемтастар өндірісінің технико-экономикалық көрсеткіштерін (күйдіруге жұмсалатын энергия шығыны төмендейді және шекемтастардың беріктігі артады) жақсартуға мүмкіндік береді.

**Негізгі сөздер:** хром шекемтасы, алюмосиликатты материалдар, термодинамикалық түрлендіру, физико-химиялық үрдіс, температура, күйдіру.

## **Исследование фазообразования при обжиге хромовых окатышей методом термодинамического моделирования**

Д.А. Есенгалиев<sup>1\*</sup>, Б.С. Келаманов<sup>1</sup>, Е.Б. Тажиев<sup>2</sup>, Т.С. Сантай<sup>1</sup>, Ж.М. Тастаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, Актюбе, Казахстан

<sup>2</sup>Satbayev University, Алматы, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [dauralga@mail.ru](mailto:dauralga@mail.ru)

**Аннотация.** Одним из способов оптимизации качества производства окускования хромового сырья является использования флюсующих материалов, способных образовывать легкоплавные силикатное соединение для улучшения технико-экономических показателей. Причина выбора этих компонентов заключается в том, что они используются при регулировании шлакового режима в процессе выплавки хромистых сплавов. В статье представлены результаты термодинамического моделирования в высокотемпературной зоне с использованием вмещающей породы хромового сырья и легкоплавких флюсующих добавок с разными составами. С использованием программного комплекса «TERRA» проведено термодинамическое моделирование при обжиге хромовых окатышей. Полное термодинамическое моделирование проведено на основе многокомпонентной системы  $\text{CaO-MgO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  при температурном интервале 800-1800°C и при давлении 0.1 МПа. В качестве исходных данных для определения параметров термодинамического равновесия для реальных составов шихт обжига хромовых окатышей были использованы вмещающая порода хромовой руды (вмещающая часть породы) и флюсующие добавки (алюмосиликатный материал) с различными соотношениями. Установлено, что при следующем оптимальном содержании флюсующего материала:  $\text{SiO}_2$  50-55%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  14-16%;  $\text{CaO}$  12-14%;  $\text{MgO}$  5-8%;  $\text{FeO}$  5-8%, процесс спекания хромовых окатышей можно проводить при относительно низких температурах (1200-1300°C). В результате определены фазовые составы с низкими температурами плавления ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ,  $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ ,  $\text{MgSiO}_3$ ), где могут повлиять на технико-экономическую показатель производства хромовых окатышей.

**Ключевые слова:** хромовые окатыши, алюмосиликатные материалы, термодинамическое моделирование, физико-химический процесс, температура, обжиг.