

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

№ 1 (2024)

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/KBNH3045>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,210

Импакт-фактор КазБЦ – 0,406

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);
Богомолов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Кажибоева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

Зарубежные члены редакционной коллегии:

Baigang Sun – профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Lapuerta – 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);
Ребзов 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

МЕТАЛЛУРГИЯ

FTAMP 53.31.21

<https://doi.org/10.48081/ORBV6015>

**А. А. Акбердин², А. С. Ким², Р. Б. Султангазиев¹,
О. В. Заякин³, *Г. Х. Адамова¹**

¹ Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;

² Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;

³РФА Урал бөлімшесінің металлургия институты,

Ресей Федерациясы, Екатеринбург қ.

*e-mail: guldenaa@mail.ru

**ҚҰРАМЫНДА БОРЫ БАР СИЛИКОХРОМ КӨМЕГІМЕН ТӨМЕНКӨМІРТЕКТІ
ФЕРРОХРОМДЫ БАЛҚЫТУ ПРОЦЕСІН ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ**

Аталмыш мақалада қолданыстағы технологиялық процестерді талдау және жаңа технологиялық үрдістердің құралы болып табылатын модельдеуге негізделген зерттеу жұмысы көрсетілген. Өзінің тиімділігіне байланысты ол жаңа процестер мен металдарды игеру үшін кең қолданыс тапты. Бұл жұмыста Толық термодинамикалық талдау әдісін қолдана отырып, феррохромның төменкөміртекті маркаларын балқыту кезінде кешенді қалпына келтіргіш ретінде қолданылатын бордың берілген құрамымен силикохромды балқытудың технологиялық процесін модельдедік. Шихтаның құрамы мен температурасының балқыту өнімдерінің химиялық және фазалық құрамына әсері зерттеліп, шихта элементтерінің металға өту дәрежесі белгіленді, қорытпаны алудың оңтайлы шарттары табылды. Термодинамикалық талдау негізінде сонымен қатар технологиялық температураны таңдау (1750-1800 °С және одан жоғары) балқудың кинетикалық жағдайларымен, алынған металдың және шлактардың балқу температурасымен байланысты екендігі көрсетілген. Жалпы алғанда, есептеу-теориялық талдау және термодинамикалық модельдеу тотықсыздандырғыш ретінде боры бар силиохромды қолданудың тиімділігін көрсетті. Силикохромдағы бордың берілген мөлшері (0,3–0,7 %) қосжада 0,3–0,5 % В₂О₃ болуын қамтамасыз ететіні көрсетілген. Бұл ыдыраудан жоғары негізді шлактарды тұрақтандырудың маңызды мәселесін шешуге жеткілікті. Сонымен бірге олардың физикалық қасиеттерінің де жақсаруы байқалады, бұл ақыр соңында балқу режиміне және шлактан металдың жоғалуына оң әсер етуі керек.

Кілтті сөздер: TERRA, термодинамикалық модельдеу, бор, математикалық жоспарлау, шлак, хром.

Кіріспе

Модельдеу жобаланған технологиялық процестің оңтайлы параметрлерін табудың тиімді құралы болып табылады. Ол ең күрделі технологияларды жасауға материалдық және уақыт шығындарын ондаған және жүздеген есе азайтуға мүмкіндік береді. Термодинамикалық әдістің артықшылығы оның әмбебап табиғаты болып табылады, ол тек жеке заттардың термохимиялық және термодинамикалық қасиеттері туралы анықтамалық ақпаратқа негізделген ерікті химиялық құрамды жүйелерді зерттеуге мүмкіндік береді - тепе-теңдік компоненттерін. Бұл қасиеттер көптеген инженерлік қолданбаларға сәйкес температура диапазонында газ тәрізді, конденсацияланған және иондалған күйлердегі химиялық қосылыстардың кең ауқымы үшін белгілі. Дегенмен, модельдің физикалық мөлдірлігі жалпыланған алгоритмнің есептеу күрделілігімен, бастапқы мәліметтерді дайындау және әртүрлі нәтижелерді ұсыну қиындықтарымен үйлеседі. Бұл жағдайлар белгілі бір кездерде әдісті практикалық іске асыруды қиындатады, ал коммерциялық модельдеу жүйелеріне жүгіну параметрлерді өзгертудің кең ауқымында нәтиже алудың тиімділігін төмендетеді [1; 2].

Толық термодинамикалық талдау әдісін қолдана отырып, феррохромның төменкөміртекті маркаларын балқыту кезінде кешенді қалпына келтіргіш ретінде қолданылатын бордың берілген құрамымен силикохромды балқытудың технологиялық процесін модельдедік. Шихтаның құрамы мен температурасының балқыту өнімдерінің химиялық және фазалық құрамына әсері зерттеліп, шихта элементтерінің металға өту дәрежесі белгіленді, қорытпаны алудың оңтайлы шарттары табылды.

Материалдар мен әдістер

Процестің термодинамикалық талдануы үшін Бауман атындағы мемлекеттік техникалық университетінен профессор Б. Г. Трусов WINDOWS ортасы үшін және жоғары температуралық процестер үшін әзірленген ASTRA-4 бағдарламасының негізінде жасалған TERRA көпкомпонентті гетерогенді жүйелерді есептеудің әмбебап бағдарламасын пайдаландық [3, 37–6.].

Химиялық термодинамикадағы Гиббс энергиясын, тепе-теңдік константаларын және Голдберг пен Вахенің массалық эсер ету заңын пайдалана отырып, тепе-теңдік параметрлерін есептеудің дәстүрлі әдістерінен айырмашылығы, термодинамикалық есептеулердің әмбебап бағдарламасы TERRA оқшауланған термодинамикалық тепе-теңдік күйіндегі жүйелер үшін максималды энтропия принципіне негізделген [4].

Ол термодинамикалық еркіндік дәрежелеріне қатысты энтропияның максимумымен сипатталады, оған жүйе құраушыларының концентрациялары, температура, қысым және т.б. қатысты. Қарастырылып отырған термодинамикалық жүйелер жабық және оқшауланған болып жіктеледі, яғни, олар қоршаған ортамен жылу алмасуы немесе жұмысы жоқ және материяны тасымалдау үшін өтпейтін шекаралары бар материалдық аймақтардан құралады. Массасы мен элементтік құрамы өзгеріссіз қалатын мұндай жүйелерде қоршаған ортамен тепе-теңдікті орнату алдын ала қол жеткізілді деп есептеледі, демек, диссипативті процестерге байланысты және жүйенің әртүрлі бөліктері арасындағы немесе оның сыртқы шекарасы бойынша жылу алмасуға байланысты жүйе энтропиясының жоғарылау мүмкіндігі алынып тасталады. Жалпы жағдайда зерттелетін жүйе гетерогенді, көрінетін шекаралармен бөлінген бірнеше бір-біріне ұқсамайтын фазалардан тұрады және барлық жеке газ тәрізді заттар газ фазасының бірдей құрамына кіреді. Конденсацияланған компоненттер жеке фазаларды құра алады.

Мұндай жүйелердің тепе-теңдігі термодинамиканың екінші заңына сәйкес термодинамикалық еркіндік дәрежелеріне қатысты энтропияның максимумымен сипатталады, оған температура (Т), қысым (Р) және тепе-теңдік қоспасының құрамдас бөліктерінің концентрациясы C_i кіреді. . Толық термодинамикалық тепе-теңдікке қол жеткізгеннен кейін қарастырылып отырған жүйелердің фазасы мен химиялық құрамы қалған күй параметрлерімен (Р, Т, ρ , U) бірегей түрде байланысты болуы керек, мұндағы ρ және U сәйкесінше жүйенің тығыздығы мен ішкі энергиясы [3, 8 б.].

TERRA бағдарламасында жеке заттардың термодинамикалық қасиеттерінің жеке мәліметтер базасы бар, ол үнемі жаңартылып, нақтыланып отырады. Қазіргі уақытта деректер банкіде (ДБ) 3200-ден астам заттар үшін термодинамикалық функциялар бар. Бірақ стандартты деректер базасын пайдалану арқылы жүргізілген есептеулердің нәтижелері өнімнің құрамында күтілгеннен айтарлықтай айырмашылықты көрсетті. Осылайша, металда, шлакта және газда көптеген бор қосылыстары болмады. Заттардың жетіспейтін термодинамикалық функцияларын ИВТАНТЕРМО, HSC Chemistry, Factsage мәліметтер базасынан және жұмыстардан алдық [5; 6; 7; 8].

Силикохромды балқыту технологиясы силикохромды балқытудағы проблемалардың сақталатынын көрсетті және негізгі күресу шаралары балқыту режимін, әсіресе қалпына келтіретін заттың мөлшерін және таза материалдарды пайдалануды қатаң бақылау болып табылады. Жоғары маркалы силикохром шлактары (Si – 48–50 %) жоғары тұтқырлығымен және балқу температурасымен сипатталады.

Біз аталмыш жұмыста феррохромның төменкөміртекті маркаларын балқыту кезінде кешенді тотықсыздандырғыш ретінде қолданылатын құрамы бекітілген боры бар силикохромды балқыту технологиясын ұсынып отырмыз. Құрамында бор бар материалдардың берілген мөлшері процестің термиялық деңгейін төмендетеді және қождың қасиеттерін жақсартады деп күтілуде, бұл шихта материалдарының ұшуын және пеш түбінің отқа төзімді шлак қалдықтарымен толып кетуін азайтады [9; 10].

Төменкөміртекті феррохром маркаларын өндіру кезінде құрамында боры бар силикохромды қолдану жоғары техникалық-экономикалық балқу көрсеткіштері бар жоғары негізді шлактарды тұрақтандыруды қамтамасыз етеді.

Модельдеу үшін элементтердің балқыту өнімдеріне өтуінің нақты коэффициенттерін ескере отырып, теориялық талдау негізінде белгіленген металл өндірудің нақты технологиялық процесі үшін келесі құрамдағы шихта қабылданды:

- Ферросиликохром – 100 кг
- Хром кені (X) – 244,007 кг
- Әк (У) – 245,846 кг

TERRA бағдарламасы кешеніндегі есептеулер үшін қажетті шихта құрамы (шихта құрамы кг) 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1 – Шихта құрамы (кг)

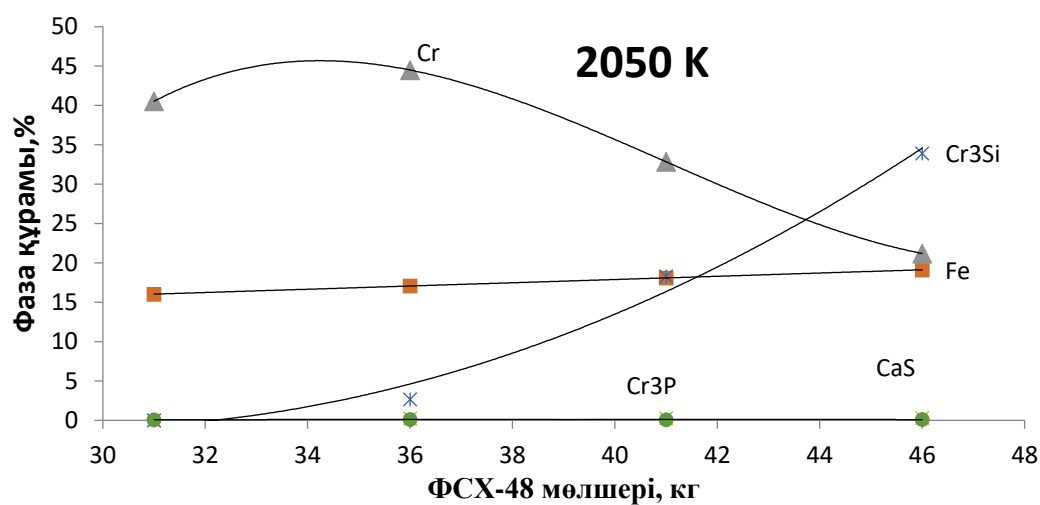
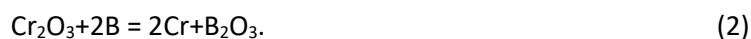
Шихта компоненті	Элементтер мен оксидтердің кірісі							
	Хром кені	Cr ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	P ₂ O ₅
	51,6	12,36	7,75	7,15	0,3	18,72	0,006	–
Әк	–	0,05	0,48	1,62	90,0	0,46	0,008	

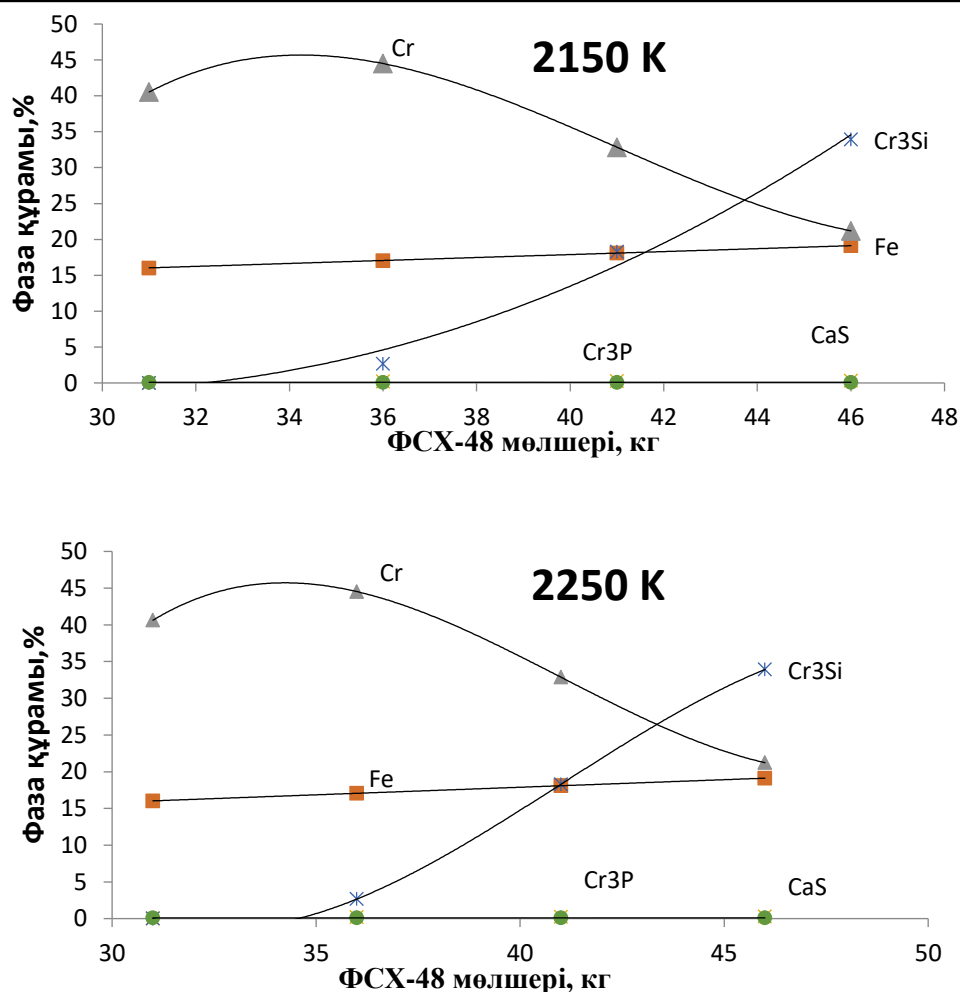
Силикохром	Cr	Si	C	P	S	Fe	B	O ₂
	13,36	19,147	0,0246	0,009	0,041	0,205	5,4705	8,446
	6				44			

Модельдеу нәтижелері бөлме температурасынан 3000 °C-қа дейінгі температура диапазонында металл мен шлактардың түзілуі кезінде шихта материалдарының фазалық құрамының өзгеруін көрсететін 2,3 кестелерде және 1-суретте келтірілген. 1-суретте берілген температурадағы металдың фазалық құрамы көрсетілген. Хром кенін кремниймен тотықсыздандырудың негізгі реакциясы (1) теңдеу:



және бордың тотықсыздану реакциясы келесі теңдеумен сипатталады (2):





Сурет 1 – ФСХ-48 мөлшеріне байланысты металдың фазалық құрамының өзгеруі

Кесте 2 – Төменкөміртекті феррохромды балқыту процесін модельдеу нәтижелері

Силикохром шығыны 31 кг						
Металл						
T°С	Cr ₃ P	Fe	Cr	Cr ₇ C ₃	CaS	Σ
300	0.078255	16.03283	40.28583	0.20649	0.089186	56.69258
400	0.078255	16.03283	40.28583	0.20649	0.089186	56.69258
500	0.078255	16.03283	40.28583	0.20649	0.089186	56.69258
600	0.078255	16.03283	40.28583	0.20649	0.089186	56.69258
700	0.078255	16.03283	40.28583	0.20649	0.089186	56.69258
800	0.078255	16.03283	40.28583	0.20649	0.089186	56.69258
900	0.078255	16.03283	40.28583	0.20649	0.089186	56.69258
1000	0.078255	16.03283	40.28583	0.20649	0.089186	56.69258
1100	0.078255	16.03283	40.28583	0.20649	0.089186	56.69258
1200	0.078255	16.03283	40.28583	0.20649	0.089186	56.69258
1300	0.078255	16.03283	40.28583	0.206467	0.089186	56.69256
1400	0.078255	16.03283	40.28583	0.206467	0.089186	56.69256
1500	0.078255	16.03283	40.28605	0.206378	0.089186	56.69269
1600	0.078255	16.03283	40.28649	0.206022	0.089186	56.69278
1700	0.078255	16.03283	40.28805	0.204642	0.089186	56.69296

1800	0.078255	16.03283	40.29406	0.199388	0.089186	56.69372
1900	0.078255	16.0328	40.32857	0.17	0.089186	56.69881
2000	0.078255	16.03278	40.52738	2.55E-28	0.089186	56.7276
2050	0.078255	16.03276	40.52738	2.55E-28	0.089186	56.72758
2100	0.078255	16.03271	40.52716	2.55E-28	0.089186	56.72731
2150	0.078232	16.03262	40.52671	5.12E-27	0.089186	56.72675
2200	0.07821	16.03251	40.52627	5.12E-27	0.089163	56.72615
2250	1.01E-22	16.03234	40.62712	8.91E-29	0.089119	56.74857
2300	2.39E-27	16.03209	40.62623	5.12E-27	0.089074	56.74739
2350	4.81E-26	16.03169	40.62467	1.03E-25	0.088963	56.74532
2400	2.39E-27	16.03109	40.62222	5.12E-27	0.088785	56.74209
2450	1.19E-28	16.03018	40.61888	2.55E-28	0.088473	56.73753
2500	4.16E-29	16.02877	40.61376	8.91E-29	0.087894	56.73043
2550	4.16E-29	16.02648	40.60552	8.91E-29	0.086848	56.71885
2600	4.16E-29	16.02245	40.59127	8.91E-29	0.084778	56.6985
2650	4.16E-29	16.01426	40.56278	8.91E-29	0.080102	56.65714
2700	4.16E-29	15.99095	40.48241	8.91E-29	0.065765	56.53912
2750	4.16E-29	15.78613	39.75418	8.91E-29	1.61E-29	55.54031
2800	4.16E-29	1.832425	1.16E-29	8.91E-29	1.61E-29	1.832425
2850	4.16E-29	2.62E-26	1.16E-29	8.91E-29	1.61E-29	2.64E-26
2900	4.16E-29	1.24E-29	1.16E-29	8.91E-29	1.61E-29	1.71E-28
2950	4.16E-29	1.24E-29	1.16E-29	8.91E-29	1.61E-29	1.71E-28
3000	4.16E-29	1.24E-29	1.16E-29	8.91E-29	1.61E-29	1.71E-28

Кесте 3 – Төменкөміртекті феррохромды балқыту процесін модельдеу нәтижелері

Силикохром шығыны 31 кг											
Шлак											
T°C	Ca ₂ SiO ₄	Ca ₃ Al ₂ O ₆	CaAl ₂ O ₄	Ca ₂ B ₂ O ₅	Mg ₃ B ₂ O ₆	Cr ₂ O ₃	MgO	MgAl ₂ O ₆	CaO	Ca ₃ P ₂ O ₈	Σ
300	113.9706	6.02E-29	3.52E-29	4.05E-29	1.36597	7.120382	15.0622	11.49135	16.91713	6.91E-29	165.9277
400	113.9706	6.02E-29	12.76555	4.05E-29	1.36597	7.120382	18.31775	1.23E-22	12.38739	6.91E-29	165.9277
500	113.9706	5.63E-22	12.76555	3.79E-22	1.36597	7.120382	18.31775	2.96E-22	12.38739	6.46E-22	165.9277
600	113.9706	5.63E-22	12.76555	3.79E-22	1.36597	7.120382	18.31775	2.96E-22	12.38739	6.46E-22	165.9277
700	113.9706	5.63E-22	12.76555	3.79E-22	1.36597	7.120382	18.31775	2.96E-22	12.38739	6.46E-22	165.9277
800	113.9706	2.8E-23	12.76555	1.89E-23	1.36597	7.120382	18.31775	1.48E-23	12.38739	3.22E-23	165.9277
900	113.9706	2.8E-23	12.76555	1.89E-23	1.36597	7.120382	18.31775	1.48E-23	12.38739	3.22E-23	165.9277
1000	113.9706	2.8E-23	12.76555	1.89E-23	1.36597	7.120382	18.31775	1.48E-23	12.38739	3.22E-23	165.9277
1100	113.9706	21.82504	1.64E-23	1.89E-23	1.36597	7.120382	18.31775	1.48E-23	3.327898	3.22E-23	165.9277
1200	113.9706	21.82504	8.16E-25	9.39E-25	1.36597	7.120382	18.31775	7.35E-25	3.327898	1.6E-24	165.9277
1300	113.9706	21.82504	4.06E-26	4.67E-26	1.36597	7.120382	18.31775	3.66E-26	3.327898	7.97E-26	165.9277
1400	113.9706	21.82504	2.02E-27	1.30321	2.44E-27	7.120359	19.1846	1.82E-27	2.523803	3.97E-27	165.9276
1500	113.9706	21.82504	1.01E-28	1.30321	1.21E-28	7.120337	19.1846	9.07E-29	2.523803	1.98E-28	165.9276
1600	113.9706	21.82504	1.01E-28	1.30321	1.21E-28	7.120204	19.1846	9.07E-29	2.523803	1.98E-28	165.9275
1700	113.9706	21.82504	3.52E-29	1.30321	4.24E-29	7.119669	19.1846	3.17E-29	2.523803	6.91E-29	165.927
1800	113.9706	21.82504	3.52E-29	1.30321	4.24E-29	7.117666	19.1846	3.17E-29	2.523803	6.91E-29	165.925
1900	113.9706	21.82504	3.52E-29	1.30321	4.24E-29	7.10649	19.18458	3.17E-29	2.523803	6.91E-29	165.9138
2000	113.9706	21.82504	1.01E-28	1.30321	1.21E-28	7.041815	19.18451	9.07E-29	2.523803	1.98E-28	165.849
2050	113.9706	21.82504	1.01E-28	1.30321	1.21E-28	7.041838	19.18445	9.07E-29	2.523803	1.98E-28	165.849
2100	113.9706	21.82504	1.01E-28	1.30321	1.21E-28	7.041927	19.18436	9.07E-29	2.523803	1.98E-28	165.849
2150	113.9706	21.82504	2.02E-27	1.30321	2.44E-27	7.042038	19.18422	1.82E-27	2.523825	3.97E-27	165.849
2200	113.9706	21.82504	2.02E-27	1.30321	2.44E-27	7.042238	19.184	1.82E-27	2.523825	3.97E-27	165.8489
2250	113.9706	21.82504	3.52E-29	1.30321	4.24E-29	6.989564	19.18369	3.17E-29	2.488672	0.064852	165.8257
2300	113.9706	21.82504	2.02E-27	1.30321	2.44E-27	6.990009	19.18324	1.82E-27	2.488716	0.06483	165.8257
2350	113.9706	21.82504	4.06E-26	1.30321	4.9E-26	6.990633	19.1826	3.66E-26	2.488828	0.064785	165.8257
2400	113.9706	21.82504	2.02E-27	1.30321	2.44E-27	6.991546	19.18166	1.82E-27	2.488983	0.064719	165.8258
2450	113.9704	21.82504	1.01E-28	1.30321	1.21E-28	6.992837	19.18026	9.07E-29	2.489251	0.064652	165.8257
2500	113.9704	21.82504	3.52E-29	1.303188	4.24E-29	6.994685	19.17812	3.17E-29	2.489718	0.06454	165.8257
2550	113.9704	21.82504	3.52E-29	1.303166	4.24E-29	6.997445	19.17474	3.17E-29	2.490609	0.064362	165.8258
2600	113.9704	21.82504	3.52E-29	1.303144	4.24E-29	7.001853	19.16891	3.17E-29	2.492301	0.064073	165.8257
2650	113.97	21.82504	3.52E-29	1.303077	4.24E-29	7.010046	19.15717	3.17E-29	2.496108	0.063494	165.8249
2700	113.9693	21.82504	3.52E-29	1.302899	4.24E-29	7.031508	19.12398	3.17E-29	2.507773	0.061936	165.8224

2750	113.9622	21.82502	3.52E-29	1.301095	4.24E-29	7.260973	18.83231	3.17E-29	2.563453	0.048622	165.7936
2800	113.5182	21.82393	3.52E-29	1.175888	4.24E-29	20.86174	2.670227	3.17E-29	2.478831	6.91E-29	162.5289
2850	113.4132	21.8237	3.52E-29	1.125284	4.24E-29	19.95953	1.138753	3.17E-29	2.508775	6.91E-29	159.9692
2900	113.2885	21.82341	3.52E-29	1.064261	4.24E-29	17.47647	1.43E-21	3.17E-29	2.549338	6.91E-29	156.202
2950	113.0516	21.82288	3.52E-29	0.988478	4.24E-29	11.73232	8.97E-30	3.17E-29	2.668312	6.91E-29	150.2636
3000	112.7286	21.82208	3.52E-29	0.885044	4.24E-29	2.913717	8.97E-30	3.17E-29	2.841229	6.91E-29	141.1906

Нәтижелер мен талқылау

Бұл реакциялардың термодинамикалық сипаттамалары бөлме температурасында ΔG_T^0 теріс мәнге ие екенін көрсетеді, яғни, бұл реакциялардың пайда болу мүмкіндігі бар, бұл есептеулердің нәтижелерімен расталады.

Барлық есептеу нұсқаларында металл мен шлақтың соңғы құрамы бөлме температурасында қалыптасады. Металлдың құрамы 2250 К жоғары температурада кейбір өзгерістерге ұшырайды, бұл кезде металл компоненттерінің газ фазасына өту процесі басталады.

Бұл температура диапазонында шлақтың құрамы да аздап өзгереді. Негізгі шлак фазасы дикальций силикаты $2CaO \cdot SiO_2$.

Кремнийдің оттегімен тотығуын есепке алмай жүргізілген есептеулер силикохромның кремнийді пайдалану коэффициентін ескере отырғанда жүргізіліп есептелген деректерден қатты алшақтайды. Құрамы әртүрлі силикохроммен жүргізілген есептеулер тізбегі металдағы силикохромды тұтынудың жоғарылауымен кремний мөлшері артады, ал жетіспеушілік кезінде металдағы хром мөлшері азаяды. Ал хромның толық тотықсыздануын қамтамасыз ететін силикохромды тұтыну кезінде шлақтың құрамы технологиялық есептеулермен көрсетілгеннен айтарлықтай ерекшеленеді. Шлактың негізділігі 1,85 орнына 2,0 және одан жоғары болады.

Феррохром алу процесінің термодинамикалық талдауы төменкөміртекті феррохромды балқытудың нақты процесіне жақындау үшін есептеулер бойынша артық кремнийді тотықтыру үшін жұмыс аймағына оттегін енгізу арқылы кремнийді пайдалану дәрежесін ескеру қажет екенін көрсетті.

Термодинамикалық талдау негізінде сонымен қатар технологиялық температураны таңдау (1750–1800 °С және одан жоғары) балқудың кинетикалық жағдайларымен, алынған металдың және шлактардың балқу температурасымен байланысты екендігі көрсетілген. Сондықтан бор оксидінің болуы шлақты ыдыраудан тұрақтандырумен қатар, оның балқу температурасын төмендетеді, ал төмен температуралы бор фазалары әсерінен сұйық фазаның ерте пайда болуы оның реакцияларының ығысуын қамтамасыз етеді деп күтілуде. Ол хромды кремний арқылы төмен температуралы аймаққа дейін қалпына келтіруді қамтамасыздандырады. Бұл ережелердің барлығы технологиялық параметрлерді сынау бойынша жоғары температуралық тәжірибелік жұмыстар кезінде жүзеге асырылатын болады.

Қорытынды

Жалпы алғанда, есептеу-теориялық талдау және термодинамикалық модельдеу тотықсыздандырғыш ретінде боры бар силикохромды қолданудың тиімділігін көрсетті. Силикохромдағы бордың берілген мөлшері (0,3–0,7 %) кожда 0,3–0,5 % B_2O_3 болуын қамтамасыз ететіні көрсетілген, Бұл ыдыраудан жоғары негізді шлактарды тұрақтандырудың маңызды мәселесін шешуге жеткілікті. Сонымен бірге олардың физикалық қасиеттерінің де жақсаруы байқалады, бұл ақыр соңында балқу режиміне және шлактан металдың жоғалуына оң әсер етуі керек.

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 **Трусов, Б. Г.** Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических системах. 3-й международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии [Текст]. // сборник материалов. – Т. I. – Иваново – 2002. – С. 217–220.

2 **Гасик, М. И., Лякишев, Н. П., Емлин, Б. И.** Теория и технология производства ферросплавов [Текст]. // – М. : Metallurgia, – 1988. – 784 с.

3 **Белов Г. В., Трусов, Б. Г.** Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем [Текст]. // – М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2013. – 96 с.

4 **Шабанов, Е. Ж., Мұздыбаев, Д. Р., Байсанов А. С., Жакудаева А. К., Төлеукадыр, Р. Т.** Анализ термодинамических расчетов выплавки кремний-алюминийхромового ферросплава, выполненных с использованием программного комплекса «TERRA» [Текст]. // – Наука и техника Казахстана, – 2022. – С. 81-86.

5 **Пупышев, А. А.** Термодинамическое моделирование термохимических процессов в спектральных источниках [Текст]. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, – 2007. – 85 с.

6 **Моисеев, Г. К., Ватолин, Н. А., Маршук, Л. А., Ильиных, Н. И.** Температурные зависимости приведенной энергии Гиббса некоторых неорганических веществ (альтернативный банк данных АСТРА. OWN) [Текст]. – Екатеринбург : УРО РАН, 1997. – 230 с.

7 **Удалов, Ю. П.** Применение программных комплексов вычислительной и геометрической термодинамики в проектировании технологических процессов неорганических веществ [Текст] : Уч. пособие. – СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2012. – 147 с.

8 **Сарекенов, К. З., Акбердин, А. А., Конуров, У., Ким, А. С., Султангазиев, Р. Б.** Компьютерная программа для анализа и управления доменным процессом [Текст] // Вестник Казахской национальной академии естественных наук. – 2014. – № 1. – С. 44–47.

9 **Привалов, О. Е., Платонов, В. Ю., Головачев Н. П., Такенов, Т. Д.** Производственный опыт освоения технологии выплавки ферросиликохрома на мощных печах типа РКЗ-63И1 [Текст] // Физико-хим. и технол. вопросы метал. производства Казахстана : Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты. ғыл. еңб. жин. – Алматы, 2002. – С. 206–208.

10 **Акбердин, А. А., Гриненко, В. И., Ким, А. С., Есенжулов, А. Б., Конуров, У. К., Сарекенов, К. З.** Производство средне- и низкоуглеродистого феррохрома с использованием боратовых руд [Текст] // Физико-хим. и технол. вопросы метал. производства Казахстана : Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты. ғыл. еңб. жин. – Алматы, – 2002. – С. 62–73.

REFERENCES

1 **Trusov, B. G.** Programmная sistema TERRA dlya modelirovaniya fazovy`x i ximicheskix ravnovesij v plazmoximicheskix sistemax. 3-j mezhdunarodny`j simpoziy`m po teoreticheskoy i prikladnoy plazmoximii [TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria in plasma-chemical systems // [Text] 3rd International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry] // collection of materials. – Т. I. – Ivanovo, 2002. – P. 217–220.

2 **Gasik, M. I., Lyakishev, N. P., Emlin, B. I.** Teoriya i texnologiya proizvodstva ferrosplavov [Theory and technology of ferroalloy production] [Text]. // – Moscow : Metallurgiya, 1988. – 784 p.

3 **Belov, G. V., Trusov, B. G.** Termodinamicheskoe modelirovanie ximicheski reagiruyushhix sistem [Thermodynamic modeling of chemically reacting systems] [Text]. – Moscow : MSTU named after N. E. Bauman, 2013. – 96 p.

4 **Shabanov, E. Zh., Müzdybaev, D. R., Bajsanov, A. S., Zhakudaeva A. K., Töleuqadyr, R. T.** Analiz termodinamicheskix racchetov vy`plavki kremnij-alyuminiyxromovogo ferroplava, vy`polnenny`x c ispol`zovaniem programmnoy kompleksa «TERRA» [Analysis of thermodynamic calculations for smelting silicon-aluminum-chromium ferroalloy, performed using the program ogo complex «TERRA»] [Text]. // Science and technology of Kazakhstan, 2022. – P. 81–86.

5 **Pupy`shev, A. A.** Termodinamicheskoe modelirovanie termoximicheskix processov v spektral`ny`x istochnikax [Thermodynamic modeling of thermochemical processes in spectral sources] [Text]. – Ekaterinburg : State Educational Institution of Higher Professional Education USTU-UPI, 2007. – 85 p.

6 **Moiseev, G. K., Vatolin, N. A., Marshuk, L. A., Il`iny`x, N. I.** Temperaturny`e zavisimosti privedennoj e`nergii Gibbsa nekotory`x neorganicheskix veshhestv (al`ternativny`j bank danny`x ASTRA. OWN) [Temperature dependences of the reduced Gibbs energy of some inorganic substances (alternative data bank ASTRA. OWN)] [Text]. – Ekaterinburg : URO RAN, 1997. – 230 p.

7 **Udalov, Yu. P.** Primenenie programmny`x kompleksov vy`chislitel`noj i geometricheskoy termodinamiki v proektirovanii texnologicheskix processov neorganicheskix veshhestv [Application of software systems of computational and geometric thermodynamics in the design of technological processes of inorganic substances] [Text] // Student Benefit. – St. Petersburg : SPbGTI (TU), 2012. – 147 p.

8 **Sarekenov, K. Z., Akberdin, A. A., Konurov, U., Kim, A. S., Sultangaziev, R. B.** Komp`yuternaya programma dlya analiza i upravleniya domenny`m processom [Computer program for analysis and control of the blast furnace process] [Text] // Bulletin of the Kazakhstan National Academy of Natural Sciences. – 2014. – № 1. – P. 44–47.

9 **Privalov, O. E., Platonov, V. Yu., Golovachev, N. P., Takenov, T. D.** Proizvodstvenny`j opy`t osvoeniya texnologii vy`plavki ferrosilikoxroma na moshhny`x pechax tipa RKZ-63I1 [Industrial experience in mastering the technology of ferrosilicochrome smelting on powerful furnaces of the RKZ-63I1 type] [Text] // Physico-chemical. and technol. metal questions produced in Kazakhstan: Zh. Abishev atyndagy chemistry-metallurgy institutes. Gyl. eb. gin – Almaty`, 2002. – P. 206–208.

10 **Akberdin, A. A., Grinenko V. I., Kim, A. S., Esenzhulov, A. B., Konurov, U. K., Sarekenov, K. Z.** Proizvodstvo sredne- i nizkouglerodistogo ferroxroma s ispol`zovaniem boratovy`x rud [Production of medium- and low-carbon ferrochrome using borates rud] [Text]. // Physico-chemical. and technol. metal questions produced in Kazakhstan : Zh. Abishev atyndagy chemistry-metallurgy institutes. Gyl. eb. gin – Almaty`, 2002. – P. 62–73.

16.10.23 ж. баспаға түсті.

16.11.23 ж. түзетулерімен түсті.

19.02.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. А. Акбердин², А. С. Ким², Р. Б. Султангазиев¹, О. В. Заякин³, *Г. Х. Адамова¹*

¹ Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;

² Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева,
Республика Казахстан, г. Караганда.

³ Институт металлургии Уральского отделения РАН,
Российская Федерация, г. Екатеринбург.

Поступило в редакцию 16.10.23.

Поступило с исправлениями 16.11.23.

Принято в печать 19.02.24.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРСОДЕРЖАЩЕГО СИЛИКОХРОМА

В данной статье показаны исследовательские работы, основанные на моделировании, которое является инструментом анализа существующих технологических процессов и новых технологических процессов. Благодаря своей эффективности он широко использовался для разработки новых процессов и металлов. В данной работе методом полного термодинамического анализа смоделировано технологический процесс плавки силикохрома с заданным содержанием бора, который используется в качестве комплексного восстановителя при выплавке низкоуглеродистых марок феррохрома. Изучено влияние состава и температуры шихты на химический и фазовый состав продуктов плавки, определена степень перехода элементов шихты в металл и найдены оптимальные условия получения сплава. На основе термодинамического анализа также показано, что выбор температуры процесса (1750–1800 °С и выше) связан с кинетическими условиями плавления, температурой плавления получаемого металла и шлака. В целом расчетно-теоретический анализ и термодинамическое моделирование показали эффективность использования силикохрома с бором в качестве восстановителя. Показано, что данное количество бора в силикохроме (0,3–0,7 %) обеспечивает в шлаке 0,3–0,5 % B_2O_3 . Этого достаточно для решения важной задачи стабилизации высокоосновных шлаков от разложения. При этом происходит улучшение их физических свойств, что в конечном итоге должно положительно сказаться на режиме плавки и потерях металла из шлака.

Ключевые слова: TERRA, термодинамическое моделирование, бор, математическое планирование, шлак, хром.

*A. A. Akberdin*², *A. S. Kim*², *R. B. Sultangaziev*¹, *O. V. Zayakin*³, **G. H. Adamova*¹

¹ Abylka Saginov Karaganda Technical University,
Kazakhstan, Karaganda;

² Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Republic of Kazakhstan, Karaganda.

³ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russian Federation, Ekaterinburg.

Received 16.10.23.

Received in revised form 16.11.23.

Accepted for publication 19.02.24.

THERMODYNAMIC MODELING OF THE PROCESS OF SMELTING LOW-CARBON FERROCHROMIUM USING BORON-CONTAINING SILICOCHROME

This article shows research work based on modeling, which is a tool for analyzing existing technological processes and new technological processes. Due to its effectiveness, it has been widely used to develop new processes and metals. In this work, using the method of complete thermodynamic analysis, we simulated the technological process of melting silicon-chrome with a given boron content, which is used as a complex reducing agent in the smelting of low-carbon grades of ferrochrome. The influence of the composition and temperature of the charge on the chemical and phase composition of the smelting products was studied, the degree of transition of the charge elements into metal was determined, and the optimal conditions for producing the alloy were found. Based on thermodynamic analysis, it is also shown that the choice of process temperature (1750–1800 °C and above) is associated with the kinetic conditions of melting, the melting temperature of the resulting metal and slag. In general, computational and theoretical analysis and thermodynamic modeling showed the effectiveness of using silochrome with boron as a reducing agent. It has been shown that a given amount of boron in silicon chrome (0.3–0.7%) provides 0.3–0.5 % B₂O₃ in the slag. This is sufficient to solve the important problem of stabilizing highly basic slags from decomposition. At the same time, their physical properties improve, which ultimately should have a positive effect on the melting mode and metal losses from the slag.

Keywords: TERRA, thermodynamic modeling, chalk, mathematical planning, slag, chromium.

Теруге 18.03.24 ж. жіберілді. Басуға 29.03.24 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

5,07 Мб RAM

Шартты баспа табағы 14,79. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 4203

«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

e-mail: nitk.tou.edu.kz

www.stk.tou.edu.kz