

Металлургия, жаңа материалдар технологиясы

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/154>

THERMAL BEHAVIOR, PHASE EVOLUTION, AND VISCOSITY OF MULTICOMPONENT OXIDE MELTS IN THE Cr–Mn SYSTEM: AN EXPERIMENTAL–THERMODYNAMIC APPROACH

Kabyllkanov S.K.

Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan

**Corresponding author e-mail: kabyllkanov04@gmail.com*

Author Information:

Kabyllkanov Sultan Kaiyrbekovich - Junior Researcher at the Laboratory of “Ferroalloys and Reduction Processes,” Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan. ORCID: 0000-0002-1272-2065; e-mail: kabyllkanov04@gmail.com

Abstract — This study investigates the exothermic effects and viscosity properties of multicomponent oxide melts formed during the high-temperature reduction of low-grade chromium and manganese ores. Unlike previous studies focused predominantly on thermodynamic analysis, the present work provides experimental evidence of transient exothermic effects and establishes their relationship with melt properties. High-temperature experiments revealed pronounced exothermic effects in the range of 800–1600 °C. Phase analysis (XRD, SEM-EDS) confirmed the effective reduction of Cr and Mn with their incorporation into Fe-Cr-Mn-Si alloys, as well as a low content of residual oxides in the slag. The effective viscosity, measured by the electrovibrational method in the temperature range of 1400-1650 °C, decreased monotonically with increasing temperature. Arrhenius analysis was applied to determine the activation energies and crystallization onset temperatures (T_{cr}). The results indicate low viscosity and high thermal stability of the slags, ensuring efficient metal-slag separation. These findings confirm the technological feasibility of using low-grade ores for the production of Fe-Cr-Mn alloys and provide a basis for optimizing industrial smelting.

Keywords — multicomponent oxide melts; Cr-Mn system; exothermic reduction reactions; slag viscosity.

Cr–Mn ЖҮЙЕСІНДЕГІ КӨПКOMPONENTTІ OKCIDTІ БАЛҚЫМАЛАРДЫҢ ТЕРМИЯЛЫҚ МІНЕЗ-ҚҰЛҚЫ, ФАЗАЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРІ ЖӘНЕ ТҮТҚЫРЛЫҒЫ: ЭКСПЕРИМЕНТТІК-ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ТӘСІЛ

Кабылканов С.К.

Ж. Әбішев ат. Химия-Металлургия институты, Қарағанды қ., Қазақстан

**Автор-корреспондент e-mail: kabyllkanov04@gmail.com*

Автор туралы ақпарат:

Кабылканов Султан Кайырбекович - Ж. Әбішев ат. Химия-металлургия институты «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Қарағанды қ., Қазақстан. ORCID: 0000-0002-1272-2065; e-mail: kabyllkanov04@gmail.com

Аңдатпа — Бұл зерттеуде құрамында көпкомпонентті оксидті балқымалар түзілетін төмен сапалы хром және марганец кендерін жоғары температурада тотықсыздандыру кезіндегі экзотермиялық әсерлер мен тұтқырлық қасиеттері зерттелді. Бұған дейінгі термодинамикаға бағытталған зерттеулерден айырмашылығы, бұл жұмыста өтпелі экзотермиялық әсерлерге эксперименттік дәлелдер келтіріліп, олардың балқыманың қасиеттерімен өзара байланысы анықталды. Жоғары температурадағы эксперименттер 800-1600 °C аралығында айқын экзотермиялық әсерлердің байқалатынын көрсетті. Фазалық талдау (РФА, СЭМ-ЭДС) Cr және Mn элементтерінің тиімді тотықсызданып, Fe-Cr-Mn-Si қорытпаларына өтетінін, сондай-ақ қож құрамында қалдық оксидтердің мөлшері аз екенін растады. 1400-1650 °C температура аралығында электровибрациялық әдіспен өлшенген тиімді тұтқырлық температураның жоғарылауына байланысты монотонды түрде төмендеді. Аррениус талдауы активтену энергияларын және кристалданудың басталу температураларын ($T_{кр}$) анықтау үшін қолданылды. Нәтижелер қождардың тұтқырлығының төмен және термиялық тұрақтылығының жоғары екенін көрсетті, бұл металл мен қождың тиімді бөлінуін қамтамасыз етеді. Алынған нәтижелер төмен сапалы кендерді Fe-Cr-Mn

қорытпаларын өндіру үшін пайдаланудың технологиялық мүмкіндігін растайды және өнеркәсіптік балқыту үдерісін оңтайландыруға негіз болады.

Түйін сөздер — көпкомпонентті оксидті балқымалар; Cr-Mn жүйесі; экзотермиялық тотықсыздану реакциялары; кождың тұтқырлығы.

ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ, ФАЗОВАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И ВЯЗКОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОКСИДНЫХ РАСПЛАВОВ В СИСТЕМЕ Cr-Mn: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Кабылканов С.К.

Химико-Металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: kabylkanov04@gmail.com*

Информация об авторе:

Кабылканов Султан Кайырбекович - младший научный сотрудник лаборатории «Ферросплавы и процессы восстановления» Химико-металлургического института им. Ж. Абишева, г. Караганда, Казахстан. ORCID: 0000-0002-1272-2065; e-mail: kabylkanov04@gmail.com

Аннотация — В данном исследовании изучены экзотермические эффекты и вязкостные свойства многокомпонентных оксидных расплавов, образующихся при высокотемпературном восстановлении низкокачественных хромовых и марганцевых руд. В отличие от предыдущих исследований, ориентированных преимущественно на термодинамический анализ, в настоящей работе представлены экспериментальные данные о переходных экзотермических эффектах и установлена их взаимосвязь со свойствами расплава. Высокотемпературные эксперименты показали наличие выраженных экзотермических эффектов в диапазоне 800-1600 °С. Фазовый анализ (РФА, СЭМ-ЭДС) подтвердил эффективное восстановление Cr и Mn с переходом в Fe-Cr-Mn-Si сплавы, а также низкое содержание остаточных оксидов в шлаке. Эффективная вязкость, измеренная электровибрационным методом в диапазоне температур 1400–1650 °С, монотонно снижалась с повышением температуры. Анализ Аррениуса применялся для определения энергий активации и температур начала кристаллизации ($T_{кр}$). Полученные результаты свидетельствуют о низкой вязкости и высокой термической стабильности шлаков, что обеспечивает эффективное разделение металла и шлака. Полученные результаты подтверждают технологическую возможность использования низкокачественных руд для производства Fe-Cr-Mn сплавов и создают основу для оптимизации промышленной плавки.

Ключевые слова — многокомпонентные оксидные расплавы; система Cr-Mn; экзотермические восстановительные реакции; вязкость шлака.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында төмен сортты хром және темірлі марганец кендерін алюмосиликотермия тотықсыздандыру кезінде көпкомпонентті қож балқымаларының жылулық және тұтқырлық сипаттамаларының температураға тәуелділігі анықталды. Эксперименттік зерттеулер нәтижесінде 1400 °С температурада марганецтің тотықсыздану дәрежесінің төмен екені, ал 1600 °С температурада металл фазасының түзілуі мен хром және марганецтің тотықсыздануы үшін қолайлы жағдай қалыптасатыны анықталды. 1800 °С-қа дейін температураны жоғарылату марганецтің булануын күшейтіп, оның металл фазасына өту тиімділігінің төмендеуіне әкелетіні белгіленді. Қож балқымаларының эксперименттік тұтқырлық мәндері FactSage 8.4 бағдарламасында есептелген нәтижелермен салыстырылып, олардың температуралық өзгеру заңдылықтары анықталды. Алынған нәтижелер төмен сапалы хром-марганец шикізатын өңдеу кезінде металл-қож фазаларының тиімді бөлінуін қамтамасыз

ететін оңтайлы температуралық режимді негіздеуге мүмкіндік береді.

КІРІСПЕ

XXI ғасырдағы металлургияның даму бағыты өндірістің экономикалық тиімділігін арттырумен ғана шектелмей, энергия және ресурстар шығынын азайтуға, шикізатты кешенді пайдалануға және қоршаған ортаға түсетін әсерді төмендетуге бағытталуда [1-3]. Қазіргі уақытта легірлеуші элементтердің қымбаттауы, энергетикалық ресурстар құнының өсуі және көміртек шығарындыларына қойылатын талаптардың күшеюі металлургиялық кәсіпорындардың дәстүрлі технологияларға балама технологиялық шешімдерді іздеуін талап етеді. Осы тұрғыдан алғанда, төмен сапалы және қиын байытылатын минералдық шикізатты тікелей өңдеу, арзан тотықсыздандырғыштарды пайдалану және бір технологиялық процесте бірнеше бағалы компоненттерді алу

металлургияның өзекті міндеттерінің бірі болып табылады.

Хром және марганец құрамды шикізатты өңдеу саласында бұл мәселе ерекше маңызға ие. Жоғары сапалы кен қорларының біртіндеп азаюы төмен сапалы және көпкомпонентті кендерді пайдалануға қажеттілікті арттырып отыр. Мұндай шикізатты дәстүрлі байыту сатыларынсыз тікелей балқыту шикізатты кешенді пайдалануға мүмкіндік бергенімен, технологиялық процестің жүру жағдайларын күрделендіреді. Кен құрамындағы кремний, алюминий, магний, кальций және темір сияқты ілеспе компоненттердің мөлшері жоғары болған жағдайда балқыту нәтижесінде күрделі құрамды оксидті қож түзіледі. Оның құрамы мен құрылымы металл мен қождың өзара әрекеттесуіне, тотықсыздану реакцияларының жүруіне және алынатын қорытпаның шығымына тікелей әсер етеді.

Мұндай жүйелердегі негізгі технологиялық көрсеткіштердің бірі – қождың тұтқырлығы. Қождың тұтқырлығы шамадан тыс жоғары болған жағдайда металл тамшыларының қождан бөлінуі қиындайды, соның нәтижесінде хром мен марганецтің бір бөлігі қож фазасында қалып, металл шығымы төмендейді. Керісінше, қождың жеткілікті сұйықтығы металл мен қождың тиімді бөлінуін қамтамасыз етіп, тотықсызданған металдың жиналуына қолайлы жағдай жасайды. Сондықтан төмен сапалы көпкомпонентті шикізатты өңдеу кезінде қождың тұтқырлығын басқару металлургиялық процестің тиімділігін анықтайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады.

Хром және марганец қорытпаларының өндірісін экономикалық тұрғыдан негіздеу мәселесі де қазіргі уақытта өзекті болып отыр. Жоғары көміртекті феррохромның бағасы 2015 жылғы шамамен 1100 USD/t деңгейінен 2025 жылы 2300 USD/t-тан жоғары деңгейге дейін өскен, ал жоғары көміртекті ферромарганецтің бағасы осы кезеңде шамамен 1000-ден 1600 USD/t-ға дейін өзгерген. Төмен көміртекті ферроқорытпалардың құны одан да жоғары болып отыр: 2021–2026 жылдары төмен көміртекті феррохромның бағасы шамамен 4200-ден 6000 USD/t-ға дейін, ал төмен көміртекті ферромарганецтің бағасы 1800-ден 2600 USD/t-ға дейін өскен. Бұл үрдістер хром және марганец қорытпаларын өндірудің өзіндік құнын төмендетуге және қымбат бастапқы материалдарды жергілікті және қолжетімді баламалармен алмастыруға бағытталған технологияларды әзірлеудің маңыздылығын көрсетеді.

Экономикалық факторлармен қатар, ферроқорытпа өндірісінің көміртекті сыйымдылығын төмендету мәселесі де барған сайын маңызды болып келеді. Еуропалық одақтың көміртекті шекаралық реттеу тетігінің (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) 2026 жылдан бастап негізгі кезеңге өтуі көміртекті ізі жоғары импорттық металлургиялық өнімдердің бәсекеге қабілеттілігіне қосымша талаптар қояды [4]. Осы жағдайларда энергияны көп қажет ететін және жеке-жеке жүргізілетін феррохром мен ферромарганец өндірістеріне қарағанда, бірнеше легірлеуші элементтерді бір технологиялық циклде алуға мүмкіндік беретін күрделі Cr–Mn лигатураларын өндіру перспективалы бағыт болып табылады.

Көпкомпонентті оксидті балқымалар күрделі жоғары температуралы жүйелерге жатады. Олардың қасиеттері оксидтердің химиялық құрамымен ғана емес, балқымадағы құрылымдық бірліктердің өзара байланысуымен және оксидті тордың полимерлену дәрежесімен де анықталады [5]. CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃ жүйесі негізіндегі қождарда тұтқырлық балқыманың құрылымдық күйіне сезімтал параметрлердің бірі болып саналады [6, 7]. Негізгі оксидтердің арақатынасының өзгеруі балқыманың құрылымына, тұтқырлығына және кристалдану температурасына елеулі әсер етеді [8]. Сондықтан қождың химиялық құрамын, температуралық режимін және тұтқырлығын өзара байланысты түрде зерттеу төмен сапалы шикізатты балқыту технологиясын оңтайландыру үшін қажет.

Сонымен қатар тотықсыздану реакцияларының жылулық әсерлері де қождың қасиеттерін қалыптастыруда маңызды рөл атқарады. Көпкомпонентті жүйелерде бір уақытта бірнеше тотығу-тотықсыздану реакциялары жүруі мүмкін және олардың әрқайсысы белгілі бір мөлшерде жылу бөлуі немесе сіңіруі ықтимал. Нәтижесінде балқымада температураның жергілікті өзгерістері пайда болып, оның фазалық құрамы мен құрылымына әсер етеді. Мұндай жылулық әсерлердің сипатын ескермей, тек бастапқы және соңғы температуралар бойынша процесті бағалау қождың нақты күйін толық сипаттауға мүмкіндік бермейді. Сондықтан күрделі оксидті жүйелердегі реакциялардың энергетикасын термодинамикалық есептеулермен қатар эксперименттік зерттеу қажет [9].

Бұған дейін жүргізілген зерттеулерде авторлар төмен сапалы хром және марганец шикізатын алюмосиликотермиялық әдіспен өңдеу арқылы күрделі хром–марганец лигатурасын алу мүмкіндігін термодинамикалық тұрғыдан негіздеген [10]. Бұл технологияда

тотықсыздандырғыш ретінде жергілікті жоғары күлді көмірлер негізінде алынатын AlSiMn және FeSiAl сияқты кремний–алюминийлі кешенді қорытпаларды пайдалану ұсынылған [11]. Мұндай тотықсыздандырғыштарды қолдану дәстүрлі қымбат тотықсыздандырғыштарды алмастыруға, жергілікті шикізатты пайдалануға және алынатын Cr-Mn лигатурасының өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді.

Алайда осы бағыттағы алдыңғы зерттеулер негізінен термодинамикалық модельдеумен шектелді. Атап айтқанда, алюмосиликотермия тотықсыздану кезінде жүретін экзотермиялық реакциялардың нақты жылулық әсерлері және олардың көпкомпонентті қож балқымасының тұтқырлығына ықпалы жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Тотықсыздану процесі кезінде пайда болатын қарқынды жергілікті жылу бөлінуі қождың құрылымдық күйін және оның аққыштығын өзгертуі мүмкін. Бұл өз кезегінде металл тамшыларының қождан бөлінуіне және хром мен марганецтің металл фазасына өту дәрежесіне әсер етеді. Сондықтан термодинамикалық есептеулерді жоғары температуралық эксперименттермен және қождың реологиялық сипаттамаларымен байланыстыру зерттеудің маңызды ғылыми мәселесі болып табылады.

Зерттеудің мақсаты – алюмосиликотермия тотықсыздану жағдайында Cr-Mn жүйесінің көпкомпонентті оксидті балқымаларының жылулық және тұтқырлық сипаттамаларын эксперименттік зерттеу және олардың температура мен химиялық құрамға тәуелділігін анықтау.

Зерттеу міндеттері:

1. Төмен сапалы хром және темір-марганец кендерінің, сондай-ақ AlSiMn , FeSiAl және FeSiCr негізіндегі тотықсыздандырғыштардың химиялық құрамын анықтау;
2. Әртүрлі шихта құрамдары үшін жоғары температуралық балқыту тәжірибелерін жүргізу;
3. Алюмосиликотермиялық тотықсыздану барысында байқалатын жылулық әсерлердің ерекшеліктерін анықтау;
4. Алынған қождардың тұтқырлығын температураға байланысты эксперименттік түрде анықтау;
5. Эксперименттік нәтижелерді FactSage 8.4 бағдарламасында алынған есептік мәндермен салыстыру;
6. Алынған металл және қож фазаларының фазалық құрамы мен микроструктурасын зерттеу;
7. Қождың тұтқырлық қасиеттері мен металл-қож фазаларының тиімді бөлінуіне әсер ететін негізгі факторларды анықтау.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі әдебиеттерде төмен сапалы хром-марганец шикізатын алюмосиликотермиялық өңдеудің термодинамикалық мүмкіндігі жеткілікті дәрежеде қарастырылғанымен, тотықсыздану реакцияларының жылулық әсерлері мен көпкомпонентті қождың реологиялық қасиеттері арасындағы өзара байланыс толық анықталмаған. Әсіресе алюмосиликотермиялық реакциялар нәтижесінде бөлінетін жылудың қождың тұтқырлығына, фазалық құрамына және металл-қождың бөлінуіне әсері жөніндегі эксперименттік мәліметтер шектеулі. Осы олқылықты толықтыру үшін реакциялардың энергетикалық ерекшеліктерін және қождың тұтқырлық қасиеттерін біртұтас жүйе ретінде зерттеу қажет.

Ғылыми жаңалығы – төмен сапалы хром және темірлі-марганец шикізатын алюмосиликотермиялық тотықсыздандыру кезінде түзілетін көпкомпонентті $\text{Cr-Mn-Fe-Si-Ca-Mg-Al}$ оксидті балқымаларының жылулық және реологиялық қасиеттерінің өзара байланысын эксперименттік тұрғыдан анықтауда. Зерттеу барысында тотықсыздану реакцияларының жылулық әсерлері мен қож тұтқырлығының температураға байланысты өзгерістері кешенді түрде қарастырылып, эксперименттік нәтижелер термодинамикалық есептеулермен салыстырылады. Алынған заңдылықтар қождың құрылымдық күйінің өзгеруін және оның технологиялық аққыштығын бағалауға, сондай-ақ металл-қож фазаларының тиімді бөлінуіне қолайлы жағдайларды анықтауға мүмкіндік береді.

Осылайша, жүргізілген зерттеу термодинамикалық модельдеу нәтижелерін нақты жоғары температуралық эксперименттермен толықтыруға және алюмосиликотермиялық Cr-Mn лигатурасын алу кезінде қождың жылулық және реологиялық мінез-құлқын тереңірек түсіндіруге бағытталған. Зерттеу нәтижелері төмен сапалы жергілікті шикізатты кешенді пайдалануға, металл шығынын азайтуға және энергия тиімділігі жоғары Cr-Mn лигатураларын өндіру технологиясының ғылыми негіздерін жетілдіруге мүмкіндік береді.

МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеу жұмысы барысында Қазақстанның Кемпірсай және Керегетас кен орындарынан алынған төмен сапалы хром және темір-марганец кендері бастапқы шикізат ретінде пайдаланылды. Тотықсыздандырғыш ретінде FeSiAl және AlSiMn қорытпалары, сондай-ақ ферросиликохром өндірісінің ұсақтау кезеңінде түзілетін FeSiCr шаңы қолданылды. Бастапқы

шикізаттар мен тотықсыздандырғыштардың химиялық талдау әдістерімен анықталды. химиялық құрамы Химия-металлургия Сынамалар алдын ала кептіріліп, ұнтақталып институтының ISO/IEC 17025 стандарты және біртекті күйге келтірілді. Химиялық құрам бойынша аккредиттелген зертханасында нәтижелері 1 және 2-ші кестелерде келтірілген.

Кесте 1 – Хром және темірлі-марганец кендерінің химиялық құрамы

Материал	Құрамы, масс. %								
	Cr ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	P ₂ O ₅	S
Хром кені	39,86	-	11,84	10,93	8,85	27,85	0,64	0,01	0,01
Темірлі-марганец кені	-	38,29	39,87	16,74	2,57	0,15	2,34	0,03	0,01

Кесте 2 – Қолданылатын тотықсыздандырғыштардың химиялық құрамы

Материал	Құрамы, масс. %						
	Cr	Mn	Fe	Si	Al	S	P
AlSiMn	-	29,04	13,97	48,39	8,55	0,020	0,021
FeSiAl	-	-	40,52	48,62	10,82	0,010	0,024
FeSiCr шаңы	24,10	-	42,10	32,22	1,51	0,049	0,018

Жоғары температуралық тәжірибелер 16 кВт қуатты және 500 А-ге дейінгі ток күшін қамтамасыз ететін зертханалық индукциялық тигельді қондырғыда жүргізілді. Тәжірибелердің шихта құрамы алдын ала жүргізілген термодинамикалық есептеулер нәтижелеріне сәйкес таңдалып, үш нұсқа бойынша орындалды.

Бірінші нұсқада 100 кг хром кені, 30 кг AlSiMn және 60 кг CaO; екінші нұсқада 50 кг хром кені, 50 кг темір-марганец кені, 30 кг FeSiAl және 90 кг CaO; үшінші нұсқада 100 кг темір-марганец кені, 50 кг FeSiCr шаңы және 100 кг CaO қолданылды. CaO барлық тәжірибелерде қож түзуші флюс ретінде пайдаланылды.

Балқыту алюминий оксидінен жасалған 100 г тигельде жүргізілді. Температура W–Re (5/20) термопарларымен бақыланды. Индуктордың тұрақты жұмыс режимін қамтамасыз ету үшін сумен салқындату жүйесі қолданылды.

Алынған металл және қож үлгілерінің фазалық құрамы PANalytical X'Pert PRO дифрактометрінде Cu K α сәулеленуімен ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), $2\theta = 10\text{--}90^\circ$ аралығында және $0,05^\circ$ кадаммен анықталды. Дифракциялық мәліметтер X'Pert HighScore Plus бағдарламасы және PDF-2 деректер базасы арқылы өңделді.

Үлгілердің микроструктурасы мен элементтік құрамы ZEM20 (ZEPTOOLS, Қытай) сканерлеуші электрондық микроскопында Oxford Instruments EDS детекторымен зерттелді.

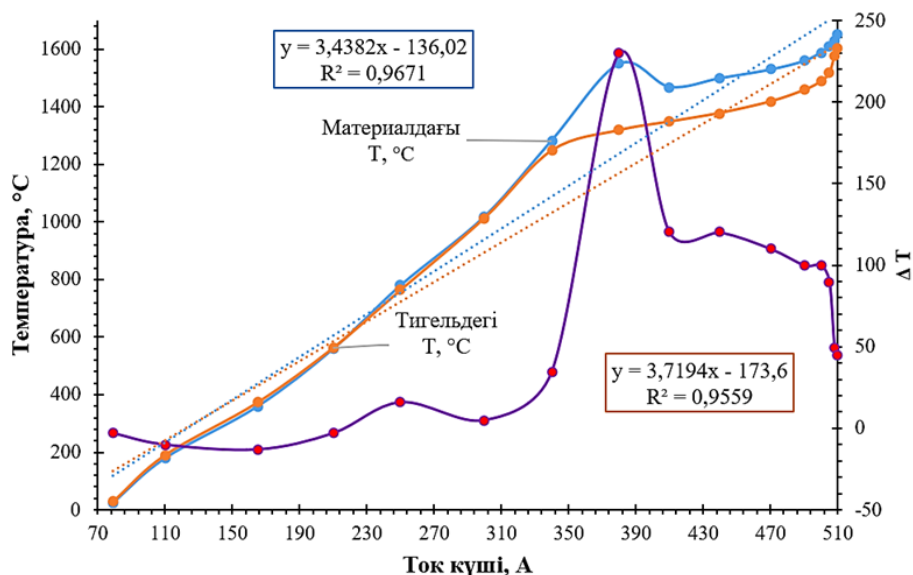
Қож балқымаларының тұтқырлығы жоғары температуралы электровибрациялық вискозиметр

көмегімен салқындату барысында анықталды. Температура молибден термопары арқылы бақыланды. Эксперименттік нәтижелерді салыстыру үшін қождардың тұтқырлығы FactSage 8.4 бағдарламасының Viscosity модулі арқылы есептелді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Үш тәжірибелік нұсқаның барлығында жоғары температуралық тотықсыздану процесі жүріп, құрамында Cr және Mn бар металл фазасы түзілді. Металл мен қождың тығыздықтарының айырмашылығына байланысты балқыту соңында олардың айқын гравитациялық бөлінуі байқалды.

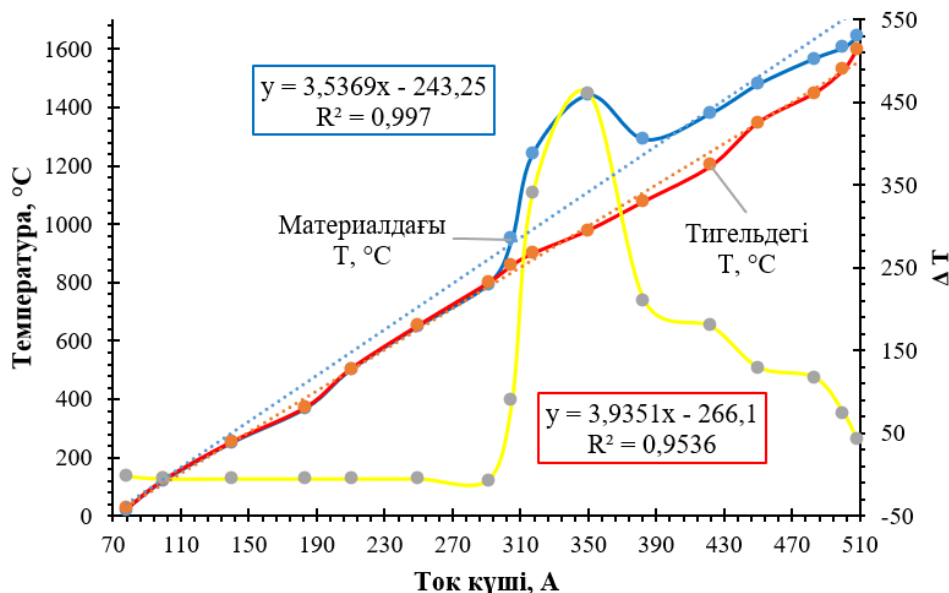
Бірінші нұсқада (хром кені + AlSiMn + CaO) бастапқы қыздыру кезеңінде температура индукциялық токтың жоғарылауына сәйкес бірқалыпты өсті. 340–380 А аралығында сыртқы қыздыру режимі іс жүзінде тұрақты болған кезде балқыма температурасының шамамен 1285-тен 1550 °C-қа дейін күрт жоғарылауы байқалды. Бұл құбылыс тотықсыздану реакциялары нәтижесінде қосымша ішкі жылу бөлінгенін көрсетеді. Жылулық әсер негізінен хром оксидтерінің Al және Si әсерінен тотықсыздануымен байланысты. Алюминийдің Cr₂O₃-пен және кремнийдің Cr₂O₃-пен реакциялары жоғары экзотермиялық сипатта болып, балқымаға қосымша жылу береді. Реакциядан кейін температура шамамен 1470 °C деңгейінде тұрақтанып, соңғы қыздыру кезеңінде 1650 °C-қа жетті (сурет 1).



Сурет 1 - Индукциялық қыздыру жиілігіне байланысты балқыма мен тигель температурасының өзгеруі

Екінші нұсқада (хром кені + темірлі-марганец кені + FeSiAl + CaO) жылулық әсер анағұрлым күрделі сипатта болды. Шамамен 950 °C-тан бастап қыздыру қарқынының өзгеруі байқалып, 300-350 А аралығында балқыма температурасы 1240-тен 1440 °C-қа дейін жоғарылады. Бұл температураның сыртқы қуат тұрақты жағдайдағы күрт өсуі тотықсыздану реакцияларынан бөлінетін ішкі жылудың әсерін көрсетеді. Бұл нұсқада жылу негізінен марганец және хром оксидтерінің алюминиймен тотықсыздануы кезінде бөлінеді, ал

кейінгі кремнийтотықсыздану реакциялары процестің жылулық әсерін жалғастырады. Қалыптасқан SiO₂ қождың силикатты құрамын толықтырып, балқыманың сұйықтығын арттыруға ықпал етеді. Реакциялық кезеңнен кейін температура шамамен 1290 °C деңгейінде тұрақтанып, жүйенің салыстырмалы тұрақты жылулық күйге өткенін көрсетті, ал соңғы қыздыруда 1640 °C-қа жетті (2-сурет).



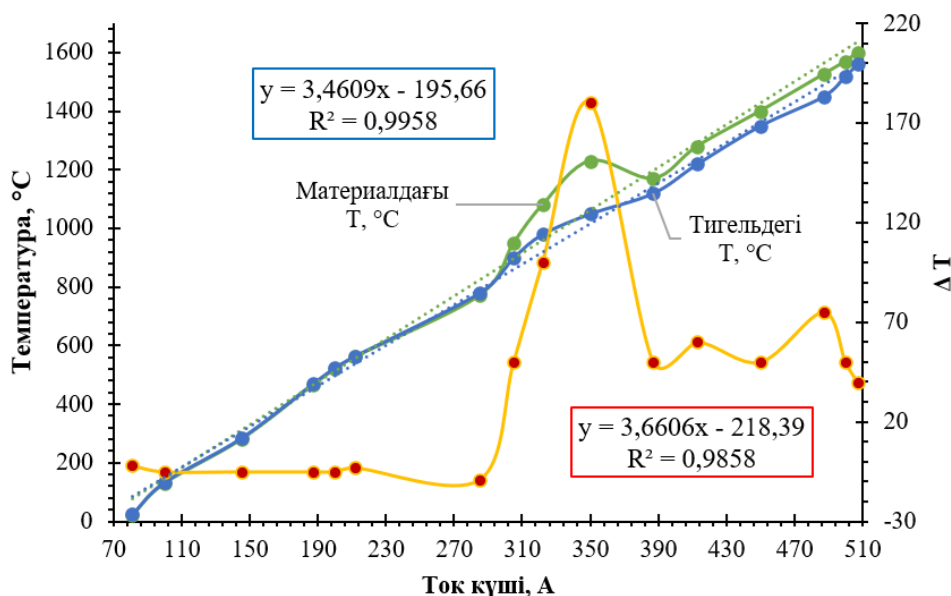
Сурет 2 - Индукциялық қыздыру жиілігіне байланысты балқыма мен тигель температурасының өзгеруі

Үшінші нұсқада (темір-марганец кені + FeSiCr шаңы + CaO) жылулық әсер алдыңғы нұсқаларға қарағанда төмен болды (3-сурет). 290-350 А аралығында балқыма температурасы шамамен 1080-ден 1230 °C-қа дейін көтерілді. Бұл нұсқада

хром FeSiCr шаңында металл күйінде болғандықтан, хром оксидінің тотықсыздануына байланысты қосымша экзотермиялық әсер байқалмайды. Негізгі жылу марганец оксидтерінің тотықсыздануы кезінде кремнийдің қатысуымен

бөлінеді. Сонымен қатар FeSiCr құрамындағы металл компоненттердің балкуы мен қыздырылуына жылудың бір бөлігі жұмсалады.

Реакциялық кезеңнен кейін жүйе біртіндеп жылулық тұрақтанып, соңғы температура шамамен 1600 °C болды.



Сурет 3 - Индукциялық қыздыру жиілігіне байланысты балқыма мен тигель температурасының өзгеруі

Осылайша, үш тәжірибелік нұсқада да тотықсыздану реакцияларының экзотермиялық әсері температураның жергілікті жоғарылауымен сипатталды. Ең қарқынды жылулық әсер хром оксидтерінің алюминий және кремний арқылы тотықсыздануы жүретін бірінші және екінші нұсқаларда байқалды, ал үшінші нұсқада хромның бастапқыда металл күйінде болуы нәтижесінде жылулық импульс әлсіз болды. Бөлінетін реакциялық жылу қож балқымасының құрылымын өзгертіп, оның тұтқырлығын төмендетуге және түзілген металл тамшыларының қождан бөлінуіне қолайлы жағдай қалыптастыруға ықпал етті.

Тотықсыздану және балқыту процестерінен кейін алынған металл және қож фазаларының химиялық құрамы анықталып, негізгі компоненттердің фазалар арасында таралу ерекшеліктері бағаланды. Әрбір тәжірибелік нұсқа бойынша алынған нәтижелердің негізінде металл және қож фазаларының орташа химиялық құрамы есептеліп, салыстырмалы талдау жүргізілді. Негізгі компоненттердің металл және қож фазалары арасында қайта бөлінуі тотықсыздану процесінің тиімділігін және алынған қорытпаның қалыптасу ерекшеліктерін бағалауға мүмкіндік береді (кесте 3).

Кесте 3 – Металл және қождың химиялық құрамы

Нұсқа	Металл					Қож						
	Fe	Cr	Mn	Si	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	FeO	
1	22,92	53,95	19,91	3,20	41,88	21,51	13,59	19,15	0,68	1,97	1,22	
2	44,64	23,92	28,21	3,22	53,60	26,47	9,10	7,09	1,42	1,09	1,24	
3	35,56	20,34	39,51	4,59	59,35	35,51	1,81	0,10	0,54	1,69	1,01	

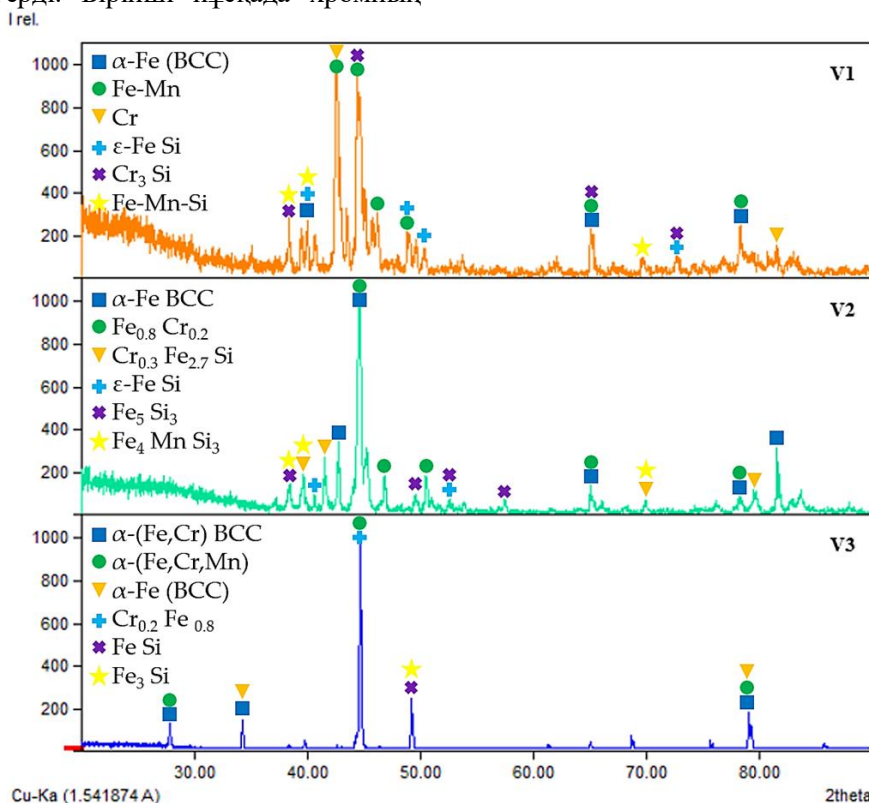
Металл фазасының құрамын талдау барлық үш нұсқада да Fe-Cr-Mn негізіндегі көпкомпонентті қорытпаның түзілгенін көрсетті. Бірінші нұсқада Cr мөлшері 53,95 %, екінші нұсқада 23,92 %, ал үшінші нұсқада 20,34 % болды. Mn мөлшері сәйкесінше 19,91; 28,21 және 39,51 % құрады. Бұл бастапқы шихта құрамының металл фазасының құрамына тікелей әсер ететінін және әрбір тотықсыздандырғыштың процестегі рөлін көрсетеді.

Қож фазасында Cr₂O₃ және MnO қалдықтарының салыстырмалы түрде төмен болуы хром мен марганецтің едәуір бөлігінің металл фазасына өткенін көрсетеді. Cr₂O₃ мөлшері 1,09-1,97 %, ал MnO мөлшері 0,54-1,42 % аралығында болды. Алынған нәтижелер алюмосиликотермия тотықсыздану жағдайында металл фазасының қалыптасуы және оның қождан гравитациялық бөлінуі үшін қолайлы жағдайлардың қалыптасқанын көрсетеді.

Алынған металл фазаларының фазалық құрамы мен микроструктуралық ерекшеліктері рентгендік-фазалық талдау (РФА) және сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ-ЭДС) әдістері арқылы зерттелді. РФА нәтижелері алынған қорытпалардың негізгі кристалдық фазаларын анықтауға мүмкіндік берді. Үш тәжірибелік нұсқаның дифрактограммаларында Fe-Cr-Mn негізіндегі металл фазаларына тән рефлексстермен қатар кремниймен байланысты интерметалдық және силицидтік фазалардың түзілу белгілері байқалды (4 сурет).

РФА нәтижелері барлық үлгілерде Fe-Cr-Mn негізіндегі металл фазасының қалыптасқанын көрсетті. Сонымен қатар дифрактограммаларда кремнийдің қатысуымен түзілетін силицидтік фазаларға тән рефлексстер байқалады. Фазалардың арақатынасы бастапқы шихта құрамына және қолданылған тотықсыздандырғыштың түріне байланысты өзгерді. Бірінші нұсқада хромның

металл фазасындағы жоғары мөлшеріне сәйкес келетін Cr-құрамды фазалардың рефлексстері басым болса, екінші және үшінші нұсқаларда Fe және Mn құрамды фазалардың үлесі жоғарылағаны байқалады. Бұл нәтижелер химиялық талдау арқылы анықталған металл фазасының құрамындағы Cr, Mn, Fe және Si мөлшерлерінің өзгерістерімен жақсы сәйкес келеді. Атап айтқанда, РФА-да байқалған фазалық айырмашылықтар тәжірибелік нұсқаларда қолданылған бастапқы шикізат пен тотықсыздандырғыш құрамының өзгеруіне байланысты металл фазасындағы негізгі элементтердің арақатынасының өзгеруімен түсіндіріледі. Сонымен қатар, анықталған фазалар металл фазасының қалыптасуында Cr және Mn тотықсыздануының, сондай-ақ Si-дің силицидтік қосылыстар түзуге қатысуының маңызды рөл атқарғанын көрсетеді.



Сурет 4 – Әртүрлі тотықсыздандырғыштарды қолдану арқылы алынған үлгілердің РДТ нәтижелері: V1 – АМС қорытпасын қолдану арқылы; V2 – ФСА қорытпасын қолдану арқылы; V3 – ФСХ шаңын қолдану арқылы.

СЭМ-ЭДС зерттеулері алынған металл фазасының біртекті емес микроструктураға ие екенін көрсетті. Металл матрицасында Fe, Cr, Mn және Si элементтері біркелкі таралмаған, жекелеген аймақтарда Cr және Mn концентрацияларының жоғарылауы байқалды. Сонымен қатар кремний мөлшері жоғары локальды аймақтардың болуы силицидтік фазалардың түзілу мүмкіндігін көрсетеді. Мұндай

құрылымдық ерекшеліктер тотықсыздану реакцияларының қарқынды жүруімен, балқыма құрамының біркелкілену дәрежесімен және кейінгі кристалдану жағдайларымен байланысты. СЭМ-ЭДС нәтижелері химиялық талдау мен РФА нәтижелерін толықтырып, алынған металл фазасының көпкомпонентті құрылымын растады.

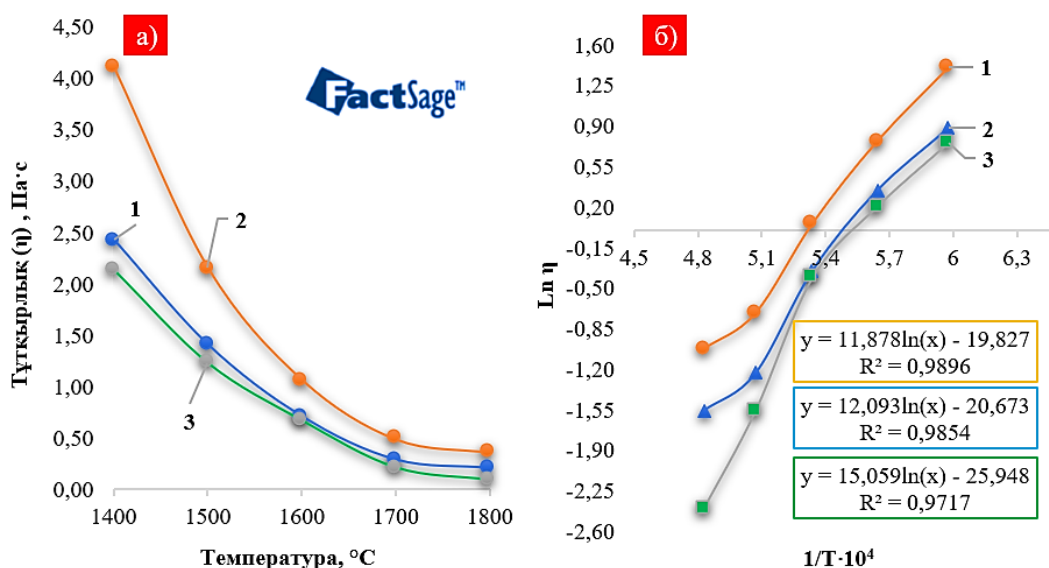
Жалпы алғанда, РФА және СЭМ-ЭДС нәтижелері жоғары температуралық тотықсыздану

барысында Fe-Cr-Mn негізіндегі металл фазасының тұрақты қалыптасқанын және оның құрылымы бастапқы шихта құрамына, тотықсыздандырғыш түріне және балқыту жағдайларына тәуелді екенін көрсетті.

Тотықсыздану реакциялары кезінде түзілетін кождың тұтқырлығы балқыманың химиялық құрамына, оксидті құрылымның күйіне және температураға тәуелді маңызды технологиялық параметр болып табылады. Осыған байланысты Cr-Mn жүйесінде түзілген кождардың тұтқырлық қасиеттері эксперименттік өлшеулер және FactSage 8.4 бағдарламасында жүргізілген термодинамикалық есептеулер арқылы зерттелді. Мұндай кешенді тәсіл қож құрамының және

температураның оның аққыштығына әсерін бағалауға, сондай-ақ есептік және тәжірибелік нәтижелерді салыстыруға мүмкіндік берді.

Алдымен үш тәжірибелік нұсқаға сәйкес кождардың тұтқырлығы 1400–1800 °C температура аралығында FactSage 8.4 бағдарламасы арқылы есептелді. Барлық үш құрам үшін температура жоғарылаған сайын тұтқырлықтың біртіндеп төмендейтіні анықталды (5-сурет). Бұл температура әсерінен оксидті балқыманың құрылымдық торының бұзылуы, оның полимерлену дәрежесінің төмендеуі және сұйық фазадағы құрылымдық бөлшектердің қозғалғыштығының артуымен түсіндіріледі.



Сурет 5 - Зерттелінді қож тұтқырлығының температураға тәуелділігі (а) және $\ln \eta - 1/T$ координаттарындағы тәуелділігі (б)

5-ші суреттен V2 қожының барлық зерттелген температура аралығында ең жоғары тұтқырлық мәндеріне ие екені, ал V1 және V3 құрамдарының салыстырмалы түрде төмен тұтқырлық көрсететіні байқалады. Бұл айырмашылық кождардың химиялық құрамымен және оксидті құрылымның ұйымдасу ерекшеліктерімен байланысты. $\ln(\eta) - 1/T$ координаттарындағы тәуелділіктердің жоғары сызықтылығы ($R^2 > 0,97$) зерттелген температура аралығында тұтқырлықтың температураға тәуелділігін Аррениус типті теңдеумен сипаттауға болатынын көрсетеді. Қисықтардың көлбеу бұрыштарының айырмашылығы кождардың тұтқырлық ағынының активтену энергиялары әртүрлі екенін көрсетеді.

FactSage есептеулері идеалдандырылған біртекті сұйық фазаны сипаттайды және нақты қожда болуы мүмкін қатты бөлшектерді, микрокристалдық фазаларды және құрылымдық біртексіздікті толық ескермейді. Сондықтан

балқыманың нақты технологиялық жағдайдағы күйін бағалау үшін тұтқырлықтың эксперименттік тиімді мәндері анықталды.

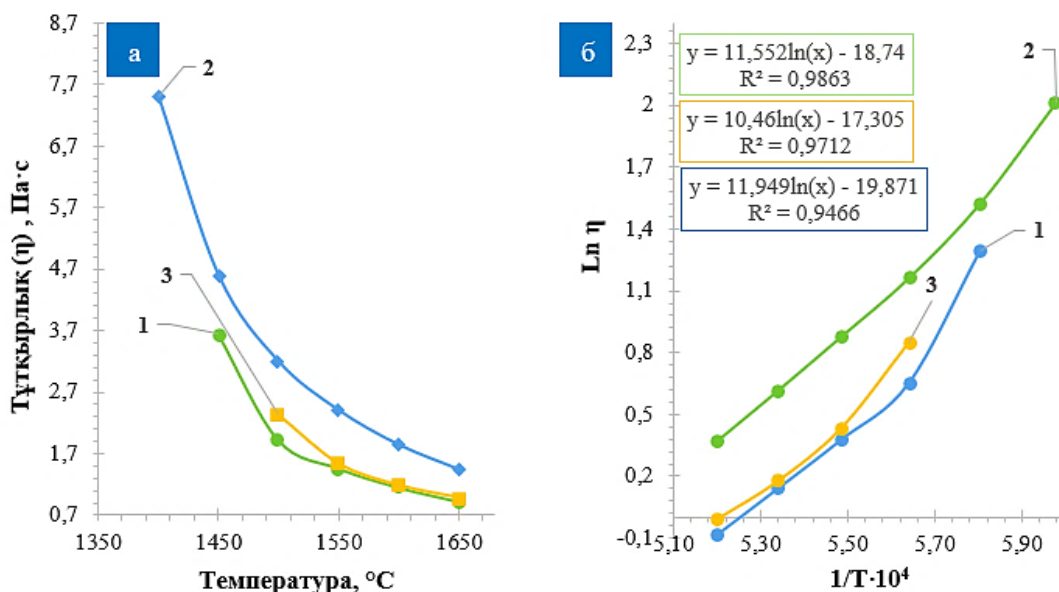
Эксперименттік өлшеулер графит қыздырғышы бар қарсылықты пешке орнатылған электровибрациялық вискозиметр көмегімен жүргізілді. Ұсақталған қож үлгілері 30–50 г мөлшерінде молибден тигельге орналастырылды. Үлгілер 1550–1650 °C температура аралығында толық балқытылып, балқыманың химиялық және температуралық біртектілігін қамтамасыз ету үшін шамамен 5 минут араластырылды. Одан кейін молибден зонд балқыманың орталық бөлігіне енгізіліп, тұтқырлық бақыланатын салқындату жағдайында анықталды. Өлшеу салқындату жылдамдығы 3–5 °C/мин болған кезде қату басталғанға дейін жүргізілді.

Эксперименттік түрде анықталған тиімді тұтқырлықтың температураға тәуелділігі 6-шы суретте көрсетілген.

Барлық үш нұсқада температура жоғарылаған сайын қож тұтқырлығының монотонды төмендеуі байқалды. Бұл жоғары температура әсерінен силикатты-алюминатты құрылымдағы байланыстардың әлсіреуімен және оксидті тордың полимерлену дәрежесінің төмендеуімен байланысты. Нәтижесінде Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} және Mn^{2+} сияқты модификатор-катиондардың қозғалғыштығы артып, балқыманың аққыштығы жоғарылайды.

1400–1450 °C аралығында қож құрамдарының арасындағы айырмашылық айқын байқалды. V2

нұсқасында тиімді тұтқырлық шамамен 7,5 Па·с мәніне дейін жетіп, зерттелген үш құрамның ішіндегі ең жоғары көрсеткішті көрсетті. Бұл қож құрылымының салыстырмалы түрде жоғары дәрежеде полимерленгенін көрсетеді. V1 және V3 қождарында тұтқырлық төменірек болды. Температура 1550 °C-тан жоғарылаған кезде үш нұсқаның тұтқырлық қисықтары бір-біріне жақындай бастады, бұл балқыманың құрылымдық біртектілігінің артуымен және қатты немесе микрокристалдық қосылыстардың әсерінің азаюымен байланысты.



Сурет 6 - Зерттелген қождардың эффективті тұтқырлығының температураға тәуелділігі (а) және Френкель-Андрасе тәуелділіктері (б)

Аррениус теңдеуі координаттарындағы эксперименттік тәуелділіктер жоғары температура аймағында жақсы сызықтылық көрсетті, мұнда корреляция коэффициенттері $R^2 = 0,94-0,98$ аралығында болды. Температураның кристалдану аймағына жақындауына қарай тәуелділіктен ауытқу байқалады. Бұл балқыманың біртекті сұйық күйден құрылымдық біртекті емес күйге ауысуымен және алғашқы кристалдық фазалардың түзілуімен байланысты.

Тұтқырлықтың температураға сезімталдығы қождың химиялық құрамына, әсіресе CaO және MgO сияқты құрылым модификаторларының мөлшеріне және қышқылдық-құрылым түзуші оксидтердің арақатынасына тәуелді екені анықталды. Осыған сәйкес қождың реологиялық қасиеттері оның оксидті торының полимерлену дәрежесімен және иондар арасындағы байланыстардың беріктігімен анықталады.

Эксперименттік нәтижелерді сандық сипаттау үшін Аррениус теңдеуінің параметрлері және тұтқырлық ағынының активтену энергиясы анықталды. V1 үшін негізділік $B = 1,74$,

кристалданудың басталу температурасы 1415 °C, ал тұтқырлық ағынының активтену энергиясы $E_a = 189,8$ кДж/моль болды. V2 қожы үшін $B = 1,69$, $T_{кр} = 1380$ °C және $E_a = 175,8$ кДж/моль анықталды. V3 құрамында $B = 1,66$, $T_{кр} = 1435$ °C және $E_a = 161,7$ кДж/моль мәндері алынды.

Тұтқырлықтың активтену энергиясының V1-ден V3-ке қарай 189,8-ден 161,7 кДж/мольге дейін төмендеуі қож құрылымының әлсіреуін және оның полимерлену дәрежесінің азаюын көрсетеді. V1 қожы салыстырмалы түрде берік силикатты-алюминатты құрылымымен сипатталса, V3 құрамында құрылымдық бөлшектердің қозғалғыштығы жоғары және температура өзгерісіне сезімтал балқыма қалыптасады. V2 осы екі құрамның арасында аралық сипат көрсетті.

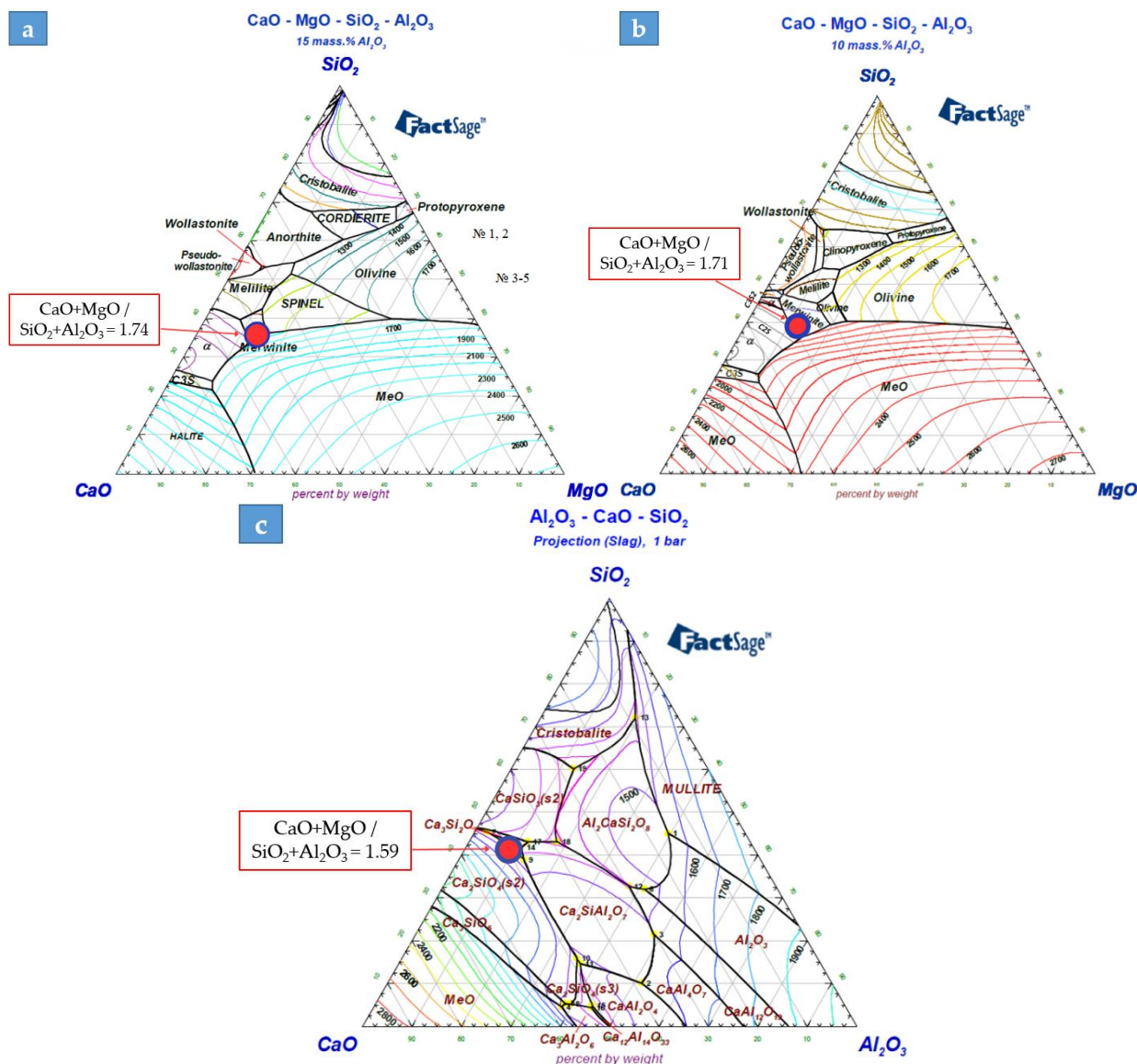
Кристалданудың басталу температураларының айырмашылығы да қождардың технологиялық қасиеттеріне әсер етеді. Ең төмен $T_{кр} = 1380$ °C V2 нұсқасында, ал V1 және V3 үшін бұл температуралар сәйкесінше 1415 және 1435 °C болды. Бұл мәндер қождардың салқындау кезінде қатты фазалардың түзілуі

басталатын температуралық шекараларды сипаттайды.

Жалпы алғанда, үш қож құрамының барлығы шамамен 1600 °С жұмыс температурасында жеткілікті сұйықтықты және тұрақты балқыма күйін қамтамасыз етеді. Тұтқырлық, активтену энергиясы және кристалдану температурасы бойынша алынған нәтижелер металл мен қож фазаларының тиімді бөлінуіне қолайлы жағдай

қалыптасатынын көрсетеді. Бұл әсіресе Cr-Mn лигатурасын балқыту кезінде металл тамшыларының қож арқылы қозғалып, бірігуі және гравитациялық жолмен бөлінуі үшін маңызды.

Зерттелген қож құрамдарының фазалық диаграммалардағы орналасуы олардың тұтқырлық қасиеттерін қосымша түсіндіруге мүмкіндік береді (7-ші сурет).



Сурет 7 - Зерттелген қож жүйелерінің фазалық диаграммалары: а – V1; б – V2; с – V3.

V1 құрамы Merwinite/Periclase фазаларының шекарасына жақын орналасып, шамамен 1550-1600 °С аралығындағы ликвидус температурасымен сипатталады. Мұндай орналасу оның жұмыс температурасындағы салыстырмалы жоғары сұйықтығын түсіндіреді. V2 құрамы Merwinite аймағынан тыс өтпелі аймақта орналасып, ликвидус температурасы 1600–1650 °С аралығында болады. Бұл оның эксперименттік түрде анықталған жоғары тұтқырлығымен және

жоғары активтену энергиясымен сәйкес келеді. V3 құрамы Rankinite/Belite фазаларының шекарасында орналасып, ликвидус температурасы шамамен 1600 °С болды. Фазалық диаграммалардағы бұл орналасу барлық үш құрамның балқыту жағдайларындағы тұрақтылығын растайды, ал V1 және V3 металл-қож фазаларының тиімді бөлінуіне неғұрлым қолайлы жағдай қалыптастырады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу барысында Cr-Mn жүйесіндегі көпкомпонентті оксидті балқымалардың жылулық әсерлері, фазалық өзгерістері және тұтқырлық қасиеттері эксперименттік және термодинамикалық әдістерді біріктіре отырып кешенді түрде зерттелді. Жоғары температуралық тәжірибелер нәтижесінде Cr және Mn оксидтерінің тотықсыздануы кезінде қысқа мерзімді экзотермиялық жылулық импульстердің пайда болатыны анықталды. Олардың қарқындылығы бастапқы шихтаның құрамына және қолданылған тотықсыздандырғыштың түріне тәуелді болды.

Фазалық талдау нәтижесінде Fe-Cr-Mn-Si негізіндегі көпкомпонентті металл фазаларының түзілгені анықталды. Хром мен марганецтің негізгі бөлігі металл фазасына өтіп, олардың қождағы қалдық оксидтерінің мөлшері төмен деңгейде сақталды. РФА және СЭМ-ЭДС нәтижелері тотықсыздану реакциялары мен кейінгі кристалдану жағдайларына байланысты күрделі, біртекті емес металл құрылымдарының қалыптасқанын көрсетті.

Қождардың тұтқырлығы FactSage 8.4 бағдарламасындағы термодинамикалық есептеулер және жоғары температуралық электровибрациялық вискозиметрия әдісімен анықталды. 1400–1650 °C температура аралығында барлық зерттелген құрамдар үшін температураның жоғарылауымен тұтқырлықтың біртіндеп төмендейтіні белгіленді. Бұл құбылыс силикатты-алюминатты қож құрылымының термиялық деполимерленуімен байланысты. Тұтқырлықтың активтену энергиясы мен кристалданудың басталу температураларын талдау қождардың құрылымдық және реологиялық ерекшеліктерінің олардың химиялық құрамына тәуелді екенін көрсетті.

Алынған нәтижелер зерттелген қож жүйелерінің жұмыс температураларында

жеткілікті сұйықтыққа және термиялық тұрақтылыққа ие екенін көрсетті. Қождың төмен тұтқырлығы металл тамшыларының бірігуі мен олардың қождан гравитациялық бөлінуіне қолайлы жағдай қалыптастырады. Осы нәтижелер Cr-Mn құрамды қорытпаларды алу кезінде металл-қож фазаларының тиімді бөлінуін қамтамасыз ететін технологиялық режимдерді негіздеуге және төмен сапалы хром-марганец шикізатын жоғары температурада өңдеу процесін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз жүргізілді.

АЛҒЫС

Автор қолжазбаны мұқият қарастырып, мақаланың мазмұны мен сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік берген құнды ескертулері мен ұсынымдары үшін журналдың редакторы мен рецензентіне шынайы алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2026 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] D. Raabe, “The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys,” *Chem. Rev.*, vol. 123, pp. 2436–2608, 2023, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00799.
- [2] A. J. Whitworth, J. Vaughan, G. Southam, A. van der Ent, P. N. Nkrumah, X. Ma, and A. Parbhakar-Fox, “Review on metal extraction technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes,” *Miner. Eng.*, vol. 182, Art. no. 107537, 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107537.
- [3] M. N. Tolmachev, “Retrospective Analysis of the Global Metal Production,” *Account. Anal. Audit.*, vol. 12, no. 2, pp. 40–51, 2025, doi: 10.26794/2408-9303-2025-12-2-40-51.
- [4] J. C. Williams, “High Performance Materials Development in the 21st Century: Trends and Directions,” *Mater. Sci. Forum*, vols. 449–452, pp. 7–12, 2004, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.449-452.7.
- [5] European Commission, “EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)—Carbon Tax on Embedded Emissions for Carbon-Intensive Products Effective from 1 January 2026,” 2026. [Online]. Available: https://taxation-customs.ec.europa.eu/news/cbam-successfully-entered-force-1-january-2026-2026-01-14_en. Accessed: Dec. 25, 2025.

[6] Y. Makhambetov, A. Zhakan, A. Zhunusov, S. Kabyllkanov, A. Burumbayev, Z. Sadyk, A. Akhmetov, and B. Uakhitova, “Resource-Efficient Smelting Technology for FeCrMnSi Ferroalloy Production from Technogenic Wastes in an Ore-Thermal Furnace,” *Metals*, vol. 15, Art. no. 1318, 2025, doi: 10.3390/met15121318.

[7] Y. Makhambetov, Z. Sadyk, A. Zhakan, A. Burumbayev, S. Kabyllkanov, A. Myrzagaliyev, D. Aubakirov, N. Lu, and A. Akhmetov, “Electric Arc Metallothermic Smelting of FeCr Using FeAlSiCa as a Reductant,” *Materials*, vol. 18, Art. no. 4221, 2025, doi: 10.3390/ma18184221.

[8] P. Papale, R. Moretti, and A. Paonita, “Thermodynamics of Multi-Component Gas–Melt Equilibrium in Magmas: Theory, Models, and Applications,” *Rev. Mineral. Geochem.*, vol. 87, pp. 431–556, 2022, doi: 10.2138/rmg.2022.87.10.

[9] K.-D. Lee, W.-G. Seo, A. Gupta, and S.-H. Choi, “Effect of composition and temperature on the viscosity and electrical conductivity of ferronickel slags,” *Metals*, vol. 15, Art. no. 1237, 2025, doi: 10.3390/met15111237.

[10] Z. Xin, J. Zhang, and Q. Liu, “Effects of Basicity, MgO, and Al₂O₃ on Thermodynamic and Physicochemical Properties of CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ Slag System,” *Molecules*, vol. 30, Art. no. 4275, 2025, doi: 10.3390/molecules30214275.

[11] H. Kim, H. Matsuura, F. Tsukihashi, W. Wang, D. J. Min, and I. Sohn, “Effect of Al₂O₃ and CaO/SiO₂ on the viscosity of calcium–silicate-based slags containing 10 mass % MgO,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 44, pp. 5–12, 2013, doi: 10.1007/s11663-012-9759-7.

REFERENCES

[1] D. Raabe, “The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys,” *Chem. Rev.*, vol. 123, pp. 2436–2608, 2023, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00799.

[2] A. J. Whitworth, J. Vaughan, G. Southam, A. van der Ent, P. N. Nkrumah, X. Ma, and A. Parbhakar-Fox, “Review on metal extraction technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes,” *Miner. Eng.*, vol. 182, Art. no. 107537, 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107537.

[3] M. N. Tolmachev, “Retrospective Analysis of the Global Metal Production,” *Account. Anal. Audit.*, vol. 12, no. 2, pp. 40–51, 2025, doi: 10.26794/2408-9303-2025-12-2-40-51.

[4] J. C. Williams, “High Performance Materials Development in the 21st Century: Trends and Directions,” *Mater. Sci. Forum*, vols. 449–452, pp. 7–12, 2004, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.449-452.7.

[5] European Commission, “EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)—Carbon Tax on Embedded Emissions for Carbon-Intensive Products Effective from 1 January 2026,” 2026. [Online]. Available: https://taxation-customs.ec.europa.eu/news/cbam-successfully-entered-force-1-january-2026-2026-01-14_en. Accessed: Dec. 25, 2025.

[6] Y. Makhambetov, A. Zhakan, A. Zhunusov, S. Kabyllkanov, A. Burumbayev, Z. Sadyk, A. Akhmetov, and B. Uakhitova, “Resource-Efficient Smelting Technology for FeCrMnSi Ferroalloy Production from Technogenic Wastes in an Ore-Thermal Furnace,” *Metals*, vol. 15, Art. no. 1318, 2025, doi: 10.3390/met15121318.

[7] Y. Makhambetov, Z. Sadyk, A. Zhakan, A. Burumbayev, S. Kabyllkanov, A. Myrzagaliyev, D. Aubakirov, N. Lu, and A. Akhmetov, “Electric Arc Metallothermic Smelting of FeCr Using FeAlSiCa as a Reductant,” *Materials*, vol. 18, Art. no. 4221, 2025, doi: 10.3390/ma18184221.

[8] P. Papale, R. Moretti, and A. Paonita, “Thermodynamics of Multi-Component Gas–Melt Equilibrium in Magmas: Theory, Models, and Applications,” *Rev. Mineral. Geochem.*, vol. 87, pp. 431–556, 2022, doi: 10.2138/rmg.2022.87.10.

[9] K.-D. Lee, W.-G. Seo, A. Gupta, and S.-H. Choi, “Effect of composition and temperature on the viscosity and electrical conductivity of ferronickel slags,” *Metals*, vol. 15, Art. no. 1237, 2025, doi: 10.3390/met15111237.

[10] Z. Xin, J. Zhang, and Q. Liu, “Effects of Basicity, MgO, and Al₂O₃ on Thermodynamic and Physicochemical Properties of CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ Slag System,” *Molecules*, vol. 30, Art. no. 4275, 2025, doi: 10.3390/molecules30214275.

[11] H. Kim, H. Matsuura, F. Tsukihashi, W. Wang, D. J. Min, and I. Sohn, “Effect of Al₂O₃ and CaO/SiO₂ on the viscosity of calcium–silicate-based slags containing 10 mass % MgO,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 44, pp. 5–12, 2013, doi: 10.1007/s11663-012-9759-7.